

**Univerzita Palackého v Olomouci**

Přírodovědecká fakulta

Katedra zoologie



**Výskyt mikroplastů ve vodním prostředí a jeho  
dopady na vodní hmyz**

Bakalářská práce

**Viktorie Nemerádová**

Biologie a ekologie

Vedoucí práce: Mgr. Hana Šigutová, Ph.D.

Olomouc 2024

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci zpracovala samostatně pod vedením  
Mgr. Hany Šigutové, Ph.D. a uvedla veškeré použité zdroje literatury.

V Olomouci dne 20. 7. 2024

.....

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí své bakalářské práce Mgr. Haně Šigutové, Ph.D. za spolupráci, odborné vedení a cenné rady při zpracování práce.

## Bibliografická identifikace

**Jméno a příjmení:** Viktorie Nemerádová

**Název práce:** Výskyt mikroplastů ve vodním prostředí a jeho dopady na vodní hmyz

**Typ práce:** Bakalářská

**Pracoviště:** Katedra zoologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

**Vedoucí práce:** Mgr. Hana Šigutová, Ph.D.

**Rok obhajoby:** 2024

## Abstrakt

Mikroplasty, malé plastové částice menší než 5 mm, jsou široce rozšířené ve všech typech vodních ekosystémů a mohou mít vážné ekologické dopady. Práce je literární rešerší, která identifikuje nejvíce ohrožené skupiny vodního hmyzu z řádů Ephemeroptera, Odonata, Trichoptera, Hemiptera, Coleoptera, Lepidoptera a Diptera. Výzkum ukazuje, že mikroplasty mohou způsobovat mechanická poranění, oxidační stres a změny v mikrobiomu hmyzu, což vede k negativním dopadům na jejich zdraví a reprodukční schopnosti. Zejména ohrožené jsou bentické organismy, které bývají vystaveny nejvyšším koncentracím mikroplastů v sedimentech. Dále práce zdůrazňuje potřebu dalších studií zaměřených na vliv mikroplastů na sladkovodní bezobratlé, aby bylo možné lépe porozumět jejich vlivu na ekosystémy a navrhnout efektivní opatření k jejich ochraně.

**Klíčová slova:** mikroplasty, vodní hmyz, kontaminace, ekosystém

**Počet stran:** 41

**Jazyk:** český

## **Bibliographical identification**

**First name and surname:** Viktorie Nemerádová

**Title:** Occurrence of microplastics in the aquatic environment and its effects on aquatic insects

**Type of thesis:** Bachelor

**Department:** Department of Zoology, Faculty of science, Palacký University Olomouc

**Supervisor:** Mgr. Hana Šigutová, Ph.D.

**Year of defense:** 2024

## **Abstract**

Microplastics, small plastic particles less than 5 mm in size, are widely distributed in all types of aquatic ecosystems and can have severe ecological consequences. This thesis is a literature review that identifies the most vulnerable groups of aquatic insects from the orders Ephemeroptera, Odonata, Trichoptera, Hemiptera, Coleoptera, Lepidoptera and Diptera. Research indicates that microplastics can cause mechanical injuries, oxidative stress, and changes in the insect microbiome, leading to adverse effects on their health and reproductive capabilities. Particularly endangered are benthic organisms, which are exposed to the highest concentrations of microplastics in sediments. The thesis also highlights the need for further research on the impact of microplastics on freshwater invertebrates to better understand their effects on ecosystems and to propose effective conservation measures.

**Keywords:** microplastic, aquatic insect, contamination, ecosystem

**Number of pages:** 41

**Language:** Czech

# Obsah

Seznam obrázků a tabulek.....	7
Seznam zkratk .....	8
Úvod.....	10
1. Charakteristika mikroplastů.....	12
1.1. Nejčastější typy plastů.....	13
1.2. Vlastnosti mikroplastů.....	13
1.2.1. Velikost.....	13
1.2.2. Tvary .....	14
1.2.3. Hustota .....	14
1.2.4. Adheze.....	15
1.2.5. Sorpce.....	16
2. Mikroplasty ve vodním prostředí .....	16
2.1. Zdroje mikroplastů.....	17
2.2. Šíření mikroplastů .....	17
3. Působení mikroplastů na vodní biotu .....	18
3.1. Ephemeroptera .....	22
3.2. Odonata .....	22
3.3. Plecoptera .....	23
3.4. Hemiptera .....	23
3.5. Trichoptera .....	24
3.6. Coleoptera .....	26
3.7. Lepidoptera.....	26
3.8. Diptera .....	27
3.8.1. Imunitní reakce.....	27
3.8.2. Změny v genové expresi a fyziologii.....	28
3.8.3. Ekologie .....	29
Závěr.....	31
Seznam literatury.....	32

## Seznam obrázků a tabulek

### Obrázky

- Obrázek 1: Počet publikací za poslední desetiletí s klíčovými slovy „mikroplasty“ a „nanoplasty“ z databáze Web of Science Core collection (převzato ze [Shen et al., 2023](#))... 12
- Obrázek 2: Příklady mikroplastových částic. (A) modrý polypropylenový (PP) fragment, (B) žlutý akrylonitrilbutadienstyrenový (ABS) film, (C) průhledná polyetylenová (PE) koule, (D) černé PP vlákno, (E) červená termoplastická polyuretanová (TPU) fólie, (F) oranžová PP fólie (převzato z [Ehlers et al., 2019](#)) ..... 14
- Obrázek 3: Příklady přilnutí MP k (A) *Daphnia magna* (MP z opotřebených pneumatik), (B) abaxiální část listu *Lemna minor* (MP z opotřebených pneumatik) a (C) kořen *Lemna minor* (PP fragment). Šipky označují umístění mikroplastů (převzato z [Kalčíková, 2023](#))..... 15
- Obrázek 4: PET mikroplasty požitá larvami *Chironomus sancticaroli* (převzato z [Hallai et al., 2024](#))..... 18
- Obrázek 5: Ilustrativní příklad hormetických vztahů mezi dávkou a odezvou. NOAEL znamená nulovou pozorovanou úroveň nepříznivého účinku, což je toxikologický práh (převzato ze [Shen et al., 2023](#))..... 19
- Obrázek 6: Příklady zakomponování MP do pouzder chrostíků *Hydatophylax nigrovittatus*: (A) schránka bez MP (z jiného odběrového místa), (B1) – (B7) schránky s mikroplasty a mezoplasty (mezoplasty jsou označeny šipkou; převzato z [Karnaukhov et al., 2024](#)) ..... 25
- Obrázek 7: Rozkousané mikroplastové fragmenty z původních polylaktidových (PLA) obdelníků o velikosti 6×3,4 mm (převzato z [Valentine et al., 2022](#))..... 26
- Obrázek 8: Míra emergence druhu *Chironomus sancticaroli* v experimentu s environmentálně relevantními koncentracemi MP (kontrolní skupina; C1: 500 MP/kg suchého sedimentu; C2: 5000 MP/kg suchého sedimentu; převzato z [Hallai et al., 2024](#))..... 29

### Tabulky

- Tabulka 1: Rozdělení plastových částic dle velikosti ..... 13
- Tabulka 2: Přehled jednotlivých studií zabývajících se mikroplasty a jejich působením na vodní hmyz. V tabulce jsou uvedeny pozorované skupiny vodního hmyzu, hlavní cíle studií, typ studie (terénní pozorování=TP; laboratorní manipulativní experiment=LME), typ polymerního materiálu, který byl nalezen nebo se kterým se pracovalo v experimentech a hodnoty dosažených koncentrací ve vodě nebo sedimentu. .... 20

## Seznam zkratek

ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
AChE	Acetylcholinesteráza
ATP	Adenosintrifosfát
bio-MP	Biomikroplasty
BPA	Bisfenol A
CAT	Kataláza
DDT	Dichlordifenyltrichloretan
DPPH	2,2-difenyl-1-pikrylhydrazyl
EPT	Skupina Ephemeroptera, Plecoptera a Trichoptera
ETS	Elektronový transportní systém
FKBP39	FK506-binding protein 39 kDa
GST	Glutathion-S-transferáza
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
HSP	Heat shock protein
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
LPO	Lipidová peroxidace
MDA	Malondialdehyd
MP	Mikroplasty
NP	Nanoplasty
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
P(S-co-MMA)	Poly(styren-ko-methyl methakrylát)
PA	Polyamid
PAH	Polyaromatický uhlovodík
PCB	Polychlorovaný bifenylyl
PE	Polyetylen
PES	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PLA bio-MP	Biomikroplasty polymléčné kyseliny
PMMA	Polymethylmethakrylát
PO	Fenoloxidáza
POP	Perzistentní organické polutanty
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
REDOX	Oxidačně-redukční reakce
ROS	Reaktivní forma kyslíku
SDS	Dodecylsírán sodný
SOD	Superoxid dismutáza



SOD Mn	Mangan superoxid dismutáza
TBARS	Reaktivní látky kyseliny thiobarbiturové
TPU	Termoplastický polyuretan

## Úvod

Sladkovodní systémy, zahrnující řeky, jezera, rybníky, mokřady a podzemní vody, představují nesmírně cenné a komplexní ekosystémy z pohledu biologické diverzity. Tyto ekosystémy poskytují domov široké škále organismů, od mikroorganismů a rostlin až po ryby, obojživelníky, ptáky a vodní hmyz (Gatti, 2016). Biologická diverzita ve vodních systémech je kritická pro udržení ekologické rovnováhy a zdraví ekosystémů. Každý druh hraje specifickou roli v potravním řetězci a přispívá k ekologickým funkcím, jako je rozklad organického materiálu nebo cyklus živin (Voshell, 2019; Ghosh et al., 2021). Zejména hmyz hraje klíčovou roli v ekosystémech a má velký vliv na přežití celé biosféry, včetně lidí. Působí jako rozkladači, fytofágové, opylovači, predátoři nebo parazité a zároveň slouží jako potrava pro mnoho rostlin a živočichů. Pokles biodiverzity a početnosti hmyzu nejen že ohrožuje ekosystémové služby, jako je opylování rostlin, ale také ohrožuje přežití dalších organismů, které jsou na nich závislé. Tento pokles může vést k rozpadu potravních řetězců, což způsobí rozsáhlé ekologické a environmentální dopady, spolu s významnými sociálními a ekonomickými ztrátami (Outhwaite et al., 2022; Shen et al., 2023). Navzdory jejich nesmírné hodnotě čelí vodní systémy celosvětově vážným hrozbám. Globální oteplování a klimatické změny mohou mít devastující dopady na organismy citlivější ke změnám. Urbanizace, průmyslová činnost a zemědělství často vedou ke znečištění a degradaci vodních biotopů, což negativně ovlivňuje biologickou diverzitu a ekologickou funkčnost vodních ekosystémů. Znečištění chemikáliemi, mikroplasty, těžkými kovy a dalšími polutanty představuje významné riziko pro život ve sladkých vodách (Carpenter et al., 2011; Gatti, 2016; Dudgeon, 2019; Cantonati et al., 2021; Rodrigues et al., 2022).

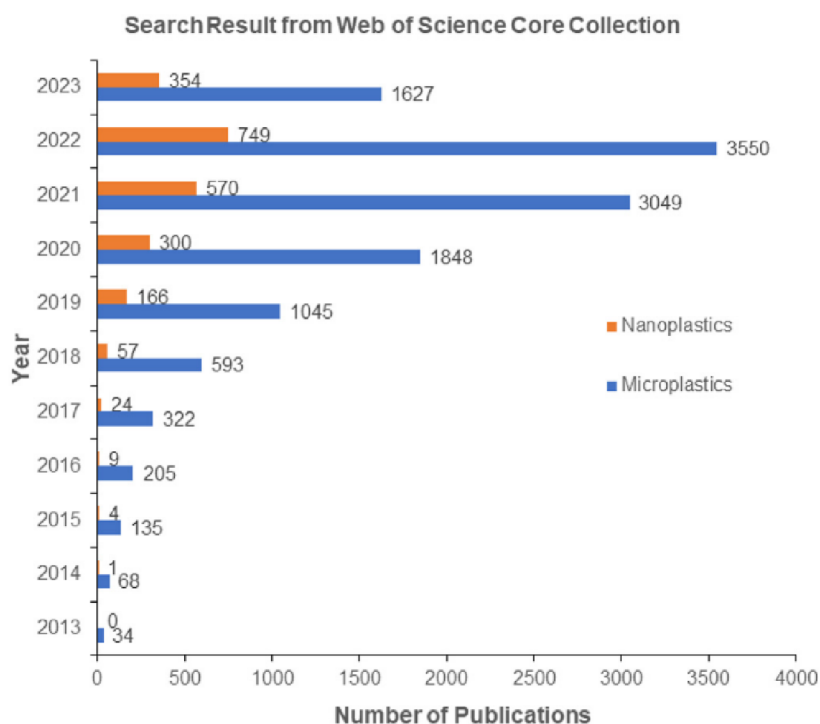
Plasty ve světě získaly významné místo díky své všestrannosti, pronikly do všech odvětví lidské činnosti a staly se běžnou součástí životů. Od roku 1950 do roku 2018 celosvětová roční produkce plastů rapidně vzrostla z 1,7 milionu tun na neuvěřitelných 359 milionů tun za rok (Osman et al., 2023). Se zvyšující se produkcí také úměrně roste množství mikroplastů a znečištění prostředí, včetně znečištění vodních ekosystémů. S přibývajícimi kontaminanty přirozeně rostou i obavy o zdraví lidí a přítomnost mikroplastů v potravinách a pitné vodě (Dehaut et al., 2016; Koelmans et al., 2019; Gruber et al., 2022; Sewwandi et al., 2023; Nantege et al., 2023; Osman et al., 2023). V poslední dekádě exponenciálně vzrostl zájem o studium mikroplastů a jejich dopadů nejen na zdraví lidí, ale také jiných organismů a celých přírodních ekosystémů (Shen et al., 2023; Sewwandi et al., 2023). Většina dosavadních prací týkajících se mikročastic plastů ve vodě byla zaměřená zejména na mořské organismy či sladkovodní obratlovce (de Sá et al., 2018; Chagas et al., 2021; Gallitelli et al., 2021). Ačkoliv je problematika mikroplastů v mořských ekosystémech dobře zdokumentována, sladkovodní ekosystémy a zejména pak vodní hmyz jsou často přehlíženy (Windsor et al., 2019a). Sladkovodní hmyz je přitom esenciální složkou přírody a slouží jako spolehlivý indikátor čistoty vody. Většina druhů je citlivých na znečištění a změny v jejich populacích mohou signalizovat ekologické problémy dříve, než by byly zjevné jinými metodami (Pongon a Owen, 2020; Nash et al., 2023; Erhenhi et al., 2024). Navíc jejich rychlý životní cyklus umožňuje vědcům pozorovat genetické a fyziologické změny v reakci na expozici mikroplastům

v průběhu několika generací, což poskytuje cenné údaje o potenciálních dlouhodobých dopadech na ekosystém (Khosrovyan et al., 2022). Jedná se tedy o ideální skupinu pro výzkum a zasloužila by více pozornosti.

Cílem práce bylo vypracování literární rešerše se zaměřením na výskyt mikroplastů ve sladkovodním prostředí a jeho dopady na vybrané funkční skupiny a potravní gildy vodního hmyzu (Ephemeroptera, Odonata, Trichoptera, Hemiptera, Coleoptera, Diptera atd.). Na základě rešerše jsou identifikovány nejvíce ohrožené skupiny vodního hmyzu, včetně skupin pro případný navazující laboratorní výzkum zaměřený na vliv mikroplastů na vybrané charakteristiky fitness.

# 1. Charakteristika mikroplastů

Mikroplasty (MP) jsou malé plastové částice menší než 5 mm, které se objevují v životním prostředí v důsledku lidské činnosti. Podmnožinou mikroplastů jsou nanoplasty (NP), nejmenší plastové částice o velikosti menší než 1  $\mu\text{m}$ , které se také běžně vyskytují v prostředí (Sorensen a Jovanović, 2021; Ahmed et al., 2022). MP jsou složeny z polymerů, dlouhých řetězců molekul tvořených opakujícími se jednotkami (Rodrigues et al., 2019). Mohou vznikat primárně, kdy již při výrobě získají své malé rozměry, nebo sekundárním rozpadem větších plastů. Jelikož mají plasty mnoho výhodných vlastností jako je odolnost, nízká hmotnost, pružnost a chemická stabilita, díky kterým si získaly četná využití (používají se od výroby obalů přes textilie až po stavební materiály), je množství mikroplastů uvolňovaných do prostředí velmi vysoké (Lokesh et al., 2023). Díky svým malým rozměrům jsou schopné výrazné disperze a dostanou se i do velmi odlehlých oblastí. Nacházejí se ve všech částech světa, od Arktidy až po Antarktidu, a to v oceánech, sladkovodních ekosystémech, půdě i ovzduší (Wang et al., 2021; Saud et al., 2023; Issac a Kandasubramanian, 2021). Výzkumy ukazují, že se mohou stát součástí potravních řetězců a představovat potenciální riziko pro organismy včetně člověka (Coffin et al., 2021; Dissanayake et al., 2022; Casillas et al., 2023; Zheng et al., 2023; Skawina et al., 2024). Kvůli jejich všudypřítomnosti a potenciálním negativním účinkům v posledních letech roste zájem o studium mikroplastů (Obr. 1). Cílem je snaha o lepší pochopení jejich vlivu na ekosystém a dopady na mořské, sladkovodní i suchozemské organismy (Casillas et al., 2023; Shen et al., 2023).



Obrázek 1: Počet publikací za poslední desetiletí s klíčovými slovy „mikroplasty“ a „nanoplasty“ z databáze Web of Science Core collection (převzato ze Shen et al., 2023)

## 1.1. Nejčastější typy plastů

Množství nalezených plastů v životním prostředí je přímo úměrné jejich výrobě. Stále se zvyšující produkce plastových materiálů a neschopnost efektivní recyklace a zbavování se odpadu neustále zvyšuje množství mikroplastů a jejich nebezpečnost v přírodě. Nejběžnějším plastem vyskytujícím se ve vodě a ve vodních živočiších je polyetylen (PE; [Issac a Kandasubramanian, 2021](#)). Jedná se o celkově nejrozšířenější druh plastu, ze kterého se vyrábí například potravinové obaly, fólie, igelitové tašky, víčka od PET lahví, izolační materiály a mnoho dalších výrobků. Polyetylen můžeme dělit na vysokohustotní (HDPE) nebo nízkohustotní (LDPE), které se od sebe liší jak hustotou, tak pružností. Dalším běžným plastem je polyethyltereftalát (PET) ze skupiny polyesterů, sloužící zejména k výrobě PET lahví. Velmi rozšířený je také polyamid (PA), jako třeba nylon, polypropylen (PP) a plastové stavební a izolační materiály, jako například polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC; [Rodrigues et al., 2019](#); [Ding et al. 2021](#); [Casillas et al., 2023](#)).

## 1.2. Vlastnosti mikroplastů

Jednotlivé mikroplasty mají rozdílné vlastnosti a v mnoha ohledech se od sebe liší. Částice jsou různých tvarů, velikostí, hustot i barev. Mají také vysokou schopnost přilnutí k organickým materiálům ([Kalčíková, 2020](#); [Kalčíková, 2023](#)). Umí absorbovat některé toxické látky z prostředí, čímž zvyšují svou míru škodlivosti v případě kontaktu s organismy ([Tumwesigye et al., 2023](#)). Každý z materiálů se svými specifickými vlastnostmi má v životním prostředí odlišnou rizikovost a na různé druhy organismů může mít rozdílný dopad.

### 1.2.1. Velikost

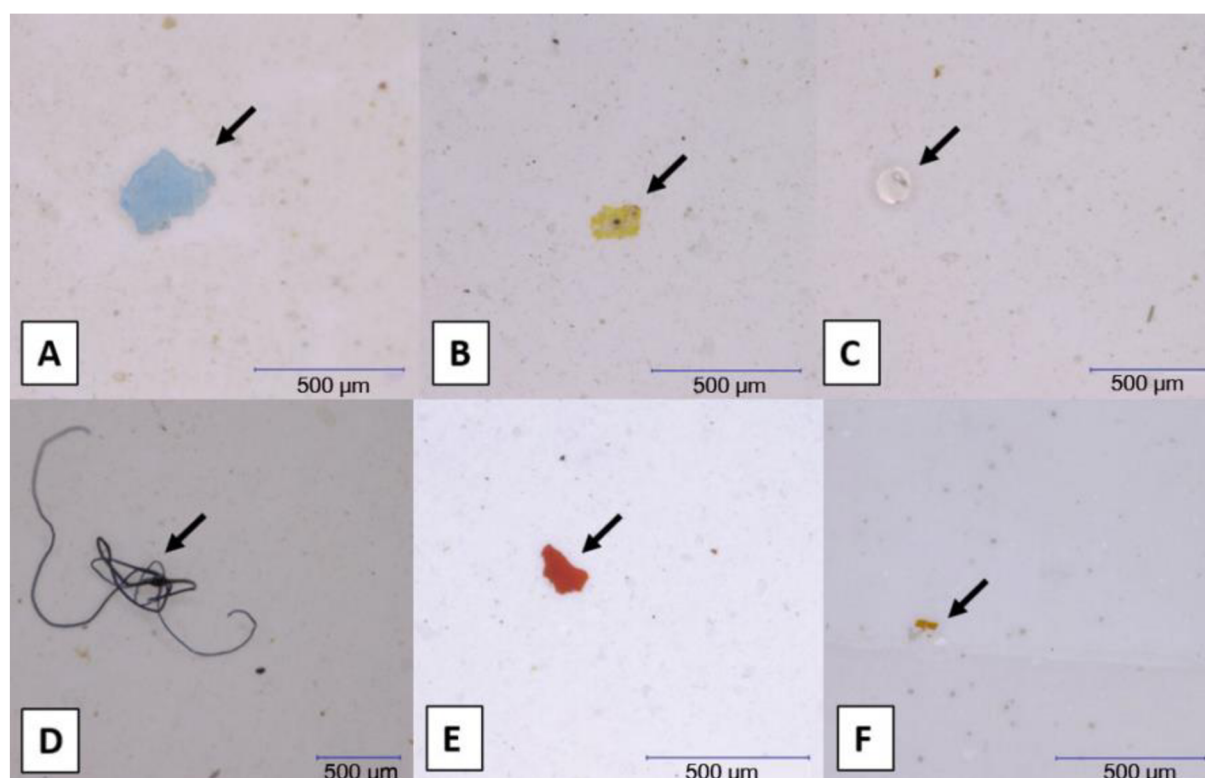
Plastové zbytky se dají jednoduše rozdělit na makroplastické a mikroplastické. Mezi makroplasty lze zařadit plastové částice větší než 25 mm a mezoplasty (5 mm až 25 mm). Do mikroplastů patří samotné mikroplasty (1 µm až 5 mm) a nanoplasty, nejmenší částice s rozměry menšími než 1 µm (Tab. 1; [Dehaut et al., 2016](#); [Blettler et al., 2019](#); [Heinlaan et al., 2020](#); [Ahmed et al., 2022](#); [Zain et al., 2022](#); [Ribeiro-Brasil et al., 2022](#)). Počáteční velikost však zpravidla nebývá konečná a plasty jsou schopné se štěpit na menší kusy, až na úroveň nanoplastů ([Akindede et al., 2020](#); [Akindede a Alimba, 2021](#)). Čím menší částice, tím bývají pro vodní hmyz nebezpečnější. Větší částice mají tendenci organismům způsobovat krátkodobou toxicitu, zatímco ty menší bývají spíše dlouhodobě toxické ([Shen et al., 2023](#)).

Tabulka 1: Rozdělení plastových částic dle velikosti.

Makroplasty	Mezoplasty	Mikroplasty (MP)	Nanoplasty (NP)
>25 mm	5 mm – 25 mm	1 µm – 5 mm	<1 µm

## 1.2.2. Tvary

MP se ve vodním prostředí vyskytují v různých formách, které lze rozdělit do základních kategorií: kuličky, vlákna, fragmenty, filmy a pěny (Obr. 2; Koelmans et al., 2019; Ehlers et al., 2019). Tyto tvary jsou určeny způsobem jejich vzniku a typem polymerního materiálu. Primární mikroplasty bývají nejčastěji tvaru malých kuliček a sekundární MP zase vlákna, pěny, fragmenty a film (Ehlers et al., 2019). Všeobecně platí, že MP ve tvaru vláken jsou v porovnání s ostatními tvary nejrozšířenějším typem (Goss et al., 2018; Datu et al., 2019; Pongon a Owen, 2020; Khedre et al., 2024a,b). Fragmentované mikroplastové částice tvrdších polymerů mívají ostré hrany a mohou organismům způsobovat mechanická poranění (Prata et al., 2023). Postupnou degradací mění tvar a zmenšují svou velikost, čímž se stávají dostupnějšími i pro drobnější živočichy a zvyšují riziko kontaminace (Weinstein et al., 2016; Issac a Kandasubramanian, 2021).



Obrázek 1: Příklady mikroplastových částic. (A) modrý polypropylenový (PP) fragment, (B) žlutý akrylonitrilbutadienstyrenový (ABS) film, (C) průhledná polyetylenová (PE) koule, (D) černé PP vlákno, (E) červená termoplastická polyuretanová (TPU) fólie, (F) oranžová PP fólie (převzato z Ehlers et al., 2019)

## 1.2.3. Hustota

Hustota plastových materiálů má zásadní vliv na rozložení MP ve vodním sloupci. Lehčí částice s menší hustotou se budou spíše vznášet na hladině nebo volně plavat ve vodním sloupci, na rozdíl od hustších materiálů, které mají tendenci se usazovat v sedimentech. Rozložení podle hustoty však nemusí vždy platit (Lobelle et al., 2021). V sedimentech se mohou nacházet i lehčí

plasty, naopak na hladině mohou plout i hustší materiály, které obsahují vzduchové bubliny, které je nadnáší. K lehčím vznášivým materiálům se řadí například PS, PE nebo PP. Mikroplasty s větší hustotou jsou některé polyestery (např. PET) nebo PVC; (Koelmans et al., 2019; Ehlers et al., 2020; Issac a Kandasubramanian, 2021; Stride et al., 2024).

Zdali se bude částice usazovat, nebo bude unášena proudem nezávisí pouze na hustotě materiálu, ale také třeba na velikosti, tvaru a povrchových vlastnostech (Lobelle et al., 2021). Postupem času a působením gravitačních sil se každá MP částice může dostat do sedimentu. Dalším faktorem, který přispívá k usazování je vazba s organickými látkami nebo organismy (Gallitelli et al., 2023). U degradovaných plastů se mohou vytvářet praskliny, do kterých se usazují organické látky, které zvyšují hmotnost a urychlují proces sedimentace (Weinstein et al., 2016).

#### 1.2.4. Adheze

Mikroplasty mají také vysokou schopnost adheze, tedy přichycení k různým povrchům (Obr. 3). Ke kontaktu dochází s největší pravděpodobností díky rozdílným elektrickým nábojům materiálů. Kladně nabité mikroplasty jsou přitahovány biotickými materiály se záporným nábojem (Kalčíková, 2020; Rozman a Kalčíková, 2022; Mizukami-Murata et al., 2021). Jejich přilnavá schopnost se odvíjí od typu plastů i jejich tvaru, stejně jako od struktury materiálu, na který se přichytí. Navázání plastových částic na svůj povrch se netýká pouze těl živočichů, ale také vodní vegetace (Kalčíková, 2023; Grgić et al., 2023). Čím složitější a členitější strukturu organismus má, tím je větší pravděpodobnost přichycení nežádoucích částic. Může se jednat o větvení a složené listy některých rostlin, ochlupení, které se nachází stejně tak u živočichů, a také výměšky a sliz, které organismy vylučují. Mikroplasty mají větší tendenci přilnutí k lepivým povrchům (Esiukova et al., 2021; Goss et al., 2018). Některé materiály se přichycují na organismy více než jiné a stejně tak jsou důležité i tvary mikroplastů. MP ve tvaru vláken v porovnání s ostatními tvary přilnou k biotickým povrchům nejjednodušeji (Goss et al., 2018; Datu et al., 2019).



Obrázek 2: Příklady přilnutí MP k (A) *Daphnia magna* (MP z opotřebených pneumatik), (B) abaxiální část listu *Lemna minor* (MP z opotřebených pneumatik) a (C) kořen *Lemna minor* (PP fragment). Šipky označují umístění mikroplastů (převzato z Kalčíková, 2023)

### 1.2.5. Sorpce

Další význačnou schopností MP je absorbovat některé organické látky, těžké kovy, změkčovadla, detergenty, či jiná aditiva (Issac a Kandasubramanian, 2021; Varg a Svanbäck, 2023). Pro lepší vlastnosti jsou mnohé látky do plastů přidávány záměrně, jako například bisfenol A (BPA), bromované zpomalovače hoření, UV stabilizátory nebo ftaláty sloužící jako změkčovadla pro lepší pružnost (Padervand et al., 2020). Sorpční schopnost mikroplastů jim umožňuje navázat na svůj povrch perzistentní organické polutanty (POP). Jedná se o toxické látky se schopností bioakumulace v organismech, které setrvávají v životním prostředí. Mezi POP se řadí například polychlorované bifenylly (PCB), polyaromatické uhlovodíky (PAH) nebo DDT. Dále jsou MP schopné reagovat s léčivými nebo těžkými kovy (Pb, Cd, Cr, Hg, As atd.; Coffin et al., 2021; Casillas et al., 2023). Bylo prokázáno, že koncentrace nežádoucích chemických látek je mnohonásobně vyšší na MP než v okolní vodě. Společnou vazbou s mikroplasty se chemické látky stávají nebezpečnější, než kdyby se vyskytovaly samostatně (Varg a Svanbäck, 2023). MP tedy mohou sloužit jako přenašeče nebezpečných látek a jejich vlastnosti způsobují, že mohou kontaminovat i odlehlá místa, kam by se polutanty normálně nedostaly (Corami et al., 2022; Tumwesigye et al., 2023).

## 2. Mikroplasty ve vodním prostředí

Doposud nebyly stanoveny žádné standardní metody pro odběr a vyhodnocování vzorků s MP, proto jsou zjištěné výsledky jednotlivých studií velmi složitě porovnatelné. Způsoby získávání vzorků z vody a extrakce MP je v každém výzkumu odlišná, a tedy i kvalita a průkaznost výsledků není jednotná (Koelmans et al., 2019). Mikroplasty se ve vodních ekosystémech nacházejí v různých velikostech i koncentracích. Velikosti MP se nejčastěji udávají v mikrometrech ( $\mu\text{m}$ ) a pohybují se v rozmezí jednotek až stovek  $\mu\text{m}$  (Prata et al., 2019). Hmotnost i velikost těchto částic je podobná planktonním organismům a při vysokém znečištění mohou převyšovat i biomasu zooplanktonu (D'Avignon et al., 2021). Samotné koncentrace MP v řekách a jezerech dosahují výrazných rozdílů. V některých terénních studiích byly zjištěny koncentrace MP v řekách v rozmezí jednotek až desítek mikroplastových částic na kubický metr ( $\text{m}^3$ ), což by se dalo považovat za relativně nízkou koncentraci (Sarijan et al., 2020; Bujaczek et al., 2021). MP koncentrace v jezerech a řekách po celém světě, včetně evropských toků, se všeobecně pohybují v rozmezí tisíců až sta tisíců  $\text{MP}/\text{m}^3$  (Scherer et al., 2020; Lu et al., 2021), některé zdroje dokonce uvádí rozmezí deseti řádů (Koelmans et al., 2019). Množství mikroplastů v sedimentech se nejčastěji udává v částicích na kilogram suché hmoty. V mnohých studiích lze najít koncentrace uváděné i v jiných jednotkách, než počet částic na  $\text{m}^3$  nebo  $\text{kg}$ , což má za následek nejednotnost a obtížné srovnávání (Tab. 2). Lze se setkat i s plošnými jednotkami jako  $\text{MP}/\text{m}^2$ ,  $\text{g}/\text{km}^2$  nebo také  $\text{mg}/\text{l}$ ,  $\text{g}/\text{m}^3$ , které už nesledují počet částic, ale hmotnost, která závisí na typu materiálu (Lu et al., 2021; Saud et al., 2023; Rossatto et al., 2023). Hodnoty mohou kolísat v závislosti na místě a zdroji znečištění, a není tedy možné stanovit jednotnou koncentraci (Mukhopadhyay a Valsalan, 2021).



## 2.1. Zdroje mikroplastů

Rozlišují se dvě základní formy MP dle jejich způsobu vzniku na primární a sekundární. Jako primární mikroplasty jsou považovány částice, které účelně získaly svou malou velikost již při výrobě a po vstupu do prostředí nejsou nijak upraveny. Primární MP se vyskytují v podobě malých kuliček přidávaných zejména do kosmetických přípravků, barev nebo průmyslových čistících prostředků. Lze je najít v krémech, zubních pastách, peelinzích a mýdlech, kde napomáhají exfoliaci staré pokožky (Geyer et al., 2017; Meng et al., 2020; Sutkar et al., 2023). Naopak sekundární mikroplasty vznikají rozpadem makroplastových výrobků. Plastové odpady podléhají fragmentaci působením fyzikálně chemických sil a biodegradacím procesům za vzniku mikročástic. Mechanickým opotřebením a působením větru a vln mohou být polymery postupně rozkládány. Důležitou roli v rozpadu plastů hraje zejména sluneční UV záření, které vysušuje MP a urychluje degradaci (Castillo et al., 2016; Lebreton a Andrady, 2019; Akindele et al., 2020; Akindele a Alimba, 2021).

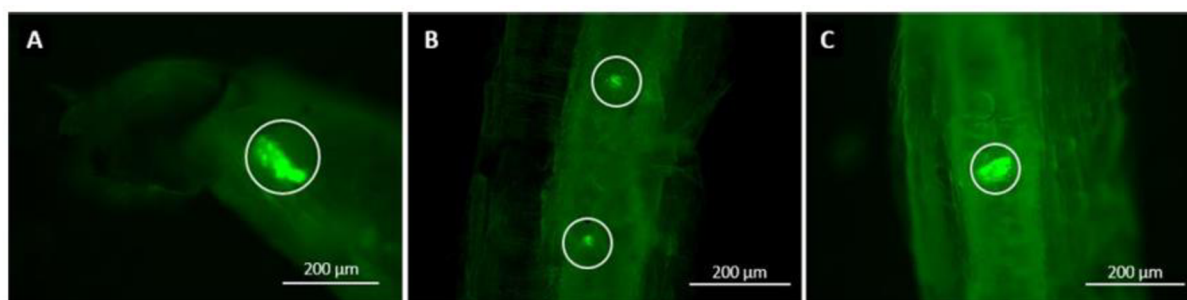
Hlavním zdrojem vzniku MP do sladkovodních ekosystémů jsou odpadní vody z domácností a technického průmyslu, nedostatečné zbavování se odpadu, rybolov, zemědělství, lodní doprava, nebo znečištění ze silnic v podobě zbytků automobilových pneumatik (Issac a Kandasubramanian, 2021; Krause et al., 2021). V oblastech s hustší populací a vyšší antropogenní činností, tedy v okolí měst, byly zjištěny větší koncentrace MP (Rossatto et al., 2023). Znečištění se hromadí v odpadních vodách, které přitékají z továren a domovů. Během praní prádla se z oděvů uvolňují syntetická vlákna, která odtékají do odpadní vody (Khedre et al., 2024b). Splašky z měst tečou skrze čistírny odpadních vod (ČOV), kde je většina MP zadržena. Odstraňování mikročástic však není stoprocentně účinné a část polymerů se tak dostane do řek (Kye et al., 2023; Lin et al., 2023). Rychlost a efektivita zbavování vody MP je ovlivněna jejich velikostí, tvarem a také technikou používanou při odstraňování. Účinnost čistíren se může lišit podle jejich typu, umístění, míry znečištění a množství srážek. Ze studií několika ČOV v Číně a Dánsku byla zjištěna relativně vysoká účinnost odstranění MP (79,3–98 %). Výsledky naznačují, že existují i jiné významné zdroje znečištění mikroplasty než pouze odpadní vody (Simon et al., 2018; Long et al., 2019; Kye et al., 2023).

## 2.2. Šíření mikroplastů

Důležitým činitelem, jenž přináší mikroplasty do sladkovodních ekosystémů, jsou srážky. Díky malým rozměrům a hmotnosti se mohou částice vznášet ve vzduchu, jednoduše se šířit prostředím a pomocí dešťových kapek dopadat na zem a do vody. Na povrchu země, v okolí měst, silnicích a zemědělských plochách se vyskytují plastové zbytky, které mohou být prostřednictvím dešťů splachovány do povrchových vod a vstupují tak do vodních ekosystémů, kde se hromadí (Krause et al., 2021; Carrasco-Navarro et al., 2021; Casillas et al., 2023; Lin et al., 2023).

Herbivorní organismy mohou nezáměrně pozřít MP společně s vegetací, na kterou jsou navázány, a stejně tak predátoři mohou pozřít MP společně s kořistí. Někdy jsou částice pojídány i záměrně, jelikož mohou být zaměněny za potravu kvůli jejich malé velikosti a často

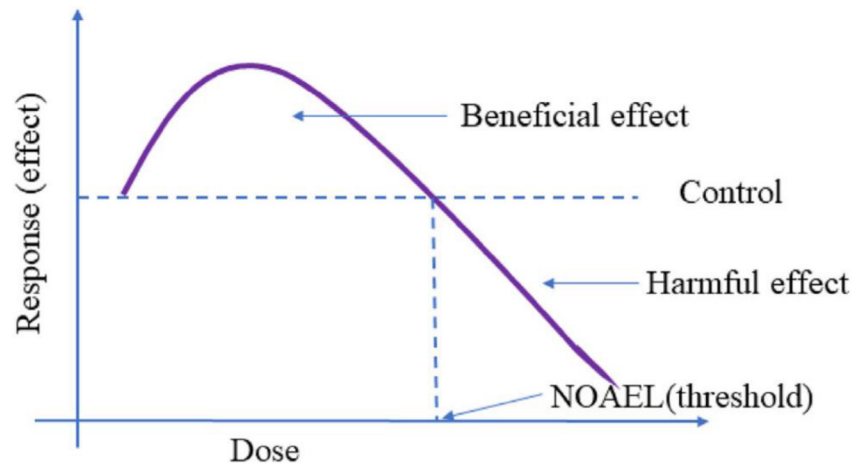
podobnému vzhledu (Immerschitt a Martens, 2020). Běžná je také kontaminace organismů prostřednictvím sedimentu, ve kterém se usazuje největší množství znečištění. Bentické organismy živící se neselektivním způsobem, jako například Chironomidae, velmi často podléhají kontaminaci (Obr. 4; Schell et al., 2022; Lu et al., 2023). Tímto způsobem se voda stává primárním prostředím vniku MP do potravních řetězců. Následným vstupem kontaminovaného hmyzu do potravních sítí dochází k bioakumulaci, tedy hromadění MP v organismech. Přenosem MP po sobě jdoucími úrovněmi trofické pyramidy do vyšších úrovní dochází také k biomagnifikaci (Thanigaivel et al., 2023; Corami et al., 2022; Li et al., 2024; Osman et al., 2023).



Obrázek 4: PET mikroplasty požitá larvami *Chironomus sancticaroli* (převzato z Hallai et al., 2024)

### 3. Působení mikroplastů na vodní biotu

Doposud provedené studie se zaměřovaly hlavně na toxicitu mikroplastů pro vodní hmyz, a proto se v experimentech pracovalo zejména s vyššími koncentracemi, než se běžně vyskytují v prostředí. Účinek na fyziologii hmyzu je však závislý na množství mikroplastů (Silva et al., 2019) a existují jisté důkazy o možnosti hormeze, což je jev, kdy malé dávky znečišťujících látek způsobují stres, který na organismus působí pozitivním způsobem a stimuluje různé fyziologické procesy (Obr. 5). Tyto látky tak mohou stimulovat růst, reprodukci, snížit imunitní odpověď, zvýšit tepelnou toleranci nebo toleranci k insekticidům (Shen et al., 2023). Ve vyšších dávkách však působí na vodní společenstva toxicky, kdy způsobují změny v mikrobiomu, poranění střev, oxidační poškození a celkový buněčný stres vedoucí k oslabení imunity a energetickým ztrátám (Silva et al., 2021b; Palacio-Cortés et al., 2022; Prata et al., 2023). Expozice mikroplastům může vést někdy i ke zvýšení mortality a populačním změnám, které mohou mít širší dopady na celkový vodní ekosystém (Al-Jaibachi et al., 2018; Khosrovyan et al., 2022; Mariani et al., 2023; Varg et al., 2023). Různé skupiny vodního hmyzu byly zkoumány ve vztahu k mikroplastům v různé míře, což vedlo k nerovnoměrnému množství informací o jejich interakcích s MP znečištěním (Tab. 2).



Obrázek 5: Ilustrativní příklad hormetických vztahů mezi dávkou a odezvou. NOAEL znamená nulovou pozorovanou úroveň nepříznivého účinku, což je toxikologický práh (převzato ze [Shen et al., 2023](#))

Tabulka 2: Přehled jednotlivých studií zabývajících se mikroplasty a jejich působením na vodní hmyz. V tabulce jsou uvedeny pozorované skupiny vodního hmyzu, hlavní cíle studií, typ studie (terénní pozorování=TP; laboratorní manipulativní experiment=LME), typ polymerního materiálu, který byl nalezen nebo se kterým se pracovalo v experimentech a hodnoty dosažených koncentrací ve vodě nebo sedimentu.

Skupina hmyzu	Cíl studie	Typ studie	Typ MP	Koncentrace	Reference
Ephemeroptera; Odonata; Trichoptera; Hemiptera; Coleoptera; Diptera	Předvídatelnost MP zatížení na základě morfologie a ekologie	TP	Různé druhy	-	Parker et al., 2022
Ephemeroptera ( <i>Siphonurus</i> sp.); Odonata ( <i>Lestes viridis</i> ); Diptera ( <i>Chironomus</i> sp.)	Výskyt MP a akumulace	TP	Různé druhy	-	Akindele et al., 2020
Ephemeroptera ( <i>Ephemera danica</i> ); Trichoptera ( <i>Odontocerum albicorne</i> )	Stavba úkrytů a zahrabávání do substrátu s MP	LME	ABS, PET, PP, PS, PVDF	-	Gallitelli et al., 2021
Ephemeroptera; Plecoptera; Trichoptera; Diptera	Koncentrace MP jednotlivých taxonů	TP	Různé druhy	-	Nash et al., 2023
Ephemeroptera; Plecoptera; Trichoptera	Přítomnost MP v organismech	TP	Různé druhy	-	Pongon a Owen, 2020
Ephemeroptera; Odonata; Hemiptera; Coleoptera	Hodnocení hladin MP	TP	PES, PE, PP, PS	2,24±0,6 až 3,76±1,1 MP/l; 298±63 až 520±80 MP/kg	Khedre et al., 2024a
Odonata; Trichoptera	Akumulace MP	TP	Celofán	-	Zain et al., 2022
Odonata ( <i>Anax imperator</i> )	Fragmentace MP vláken	LME	PE	-	Immerschitt a Martens, 2020
Odonata; Diptera (Chironomidae)	Trofický přenos MP a dopad na ekosystém	LME	Různé druhy	0,007 g/m <sup>2</sup> ; 2 g/m <sup>3</sup> ; 8 g/m <sup>2</sup>	Yıldız et al., 2022
Hemiptera (Corixidae a Notonectidae)	Sezónní výskyt, distribuce, složení a rizika MP	TP	PES, PP, PE	2,05±0,79; 3,01±0,9 MP/l	Khedre et al., 2024b
Hemiptera (Corixidae)	Dopad MP s detergenty na přežívání a mikrobiom	LME	PS	4000 MP/ml	Varg a Svanbäck, 2023
Trichoptera ( <i>Lepidostoma basale</i> )	Přítomnost MP ve schránkách	TP	Různé druhy	-	Ehlers et al., 2019
Trichoptera ( <i>Lepidostoma basale</i> )	Přítomnost MP ve schránkách	LME	PET, PVC	0,075; 1,5 mg/ml	Ehlers et al., 2020
Trichoptera ( <i>Baicalina thamastoides</i> a <i>Hydatophylax nigrovittatus</i> )	Přítomnost MP ve schránkách	TP	Různé druhy	-	Karnaukhov et al., 2024
Trichoptera ( <i>Agrypnia</i> sp.)	Fragmentace MP a stavba schránek	LME	PLA	-	Valentine et al., 2022
Trichoptera ( <i>Limnephilus</i> sp.)	Dopady různých velikostí MP	LME	PE	0,5; 1,5 mg/l	Batista et al., 2022

Trichoptera ( <i>Micropterna nycterobia</i> )	Stresové reakce na MP	LME	HDPE, PP, LDPE, PS	10 mg/l	Grgić et al., 2023
Trichoptera ( <i>Hydropsyche pellucidula</i> )	Ekotoxikologický dopad MP	LME	PP	3,33±4,16 MP/dm <sup>3</sup> sedim.; 3,73±2,1 MP/m <sup>3</sup>	Piccardo et al., 2021
Coleoptera ( <i>Cybister japonicus</i> )	Změny chování po požití MP	LME	PE	-	Kim et al., 2018
Lepidoptera ( <i>Cataclysta lemnata</i> )	Trofický přenos MP, dopady na vývoj a přežívání	LME	P(S-co-MMA)	100 mg/l	Mariani et al., 2023
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Účinky MP na genovou expresi	LME	PS, guma pneumatik	1; 10 mg/l	Carrasco-Navarro et al., 2021
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Biodegradace MP a ekotoxicita	LME	bio-MP	200; 250 mg/kg	Ferreira-Filipe et al., 2024
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Charakterizace střevních bakterií a biodegradace MP	LME	PE, PA, PVC	10 g/l	Janakiev et al., 2023
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Pochopení mechanismů příjmu MP a nepříznivých účinků	TP	Různé druhy	-	Prata et al., 2023
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Míra a rychlost emergence	LME	PE	20; 40; 80; 160; 320 mg/l	Castro et al., 2022
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Bioturbance a disperze MP v sedimentu	LME	PE	80 g/m <sup>2</sup>	Sebteoui et al., 2024
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Genomová evoluční reakce	LME	PA	1 g/kg	Khosrovyan et al., 2022
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Imunitní reakce	LME	PE	1,25; 5; 20 g/kg	Silva et al., 2021a
Diptera ( <i>Chironomus riparius</i> )	Oxidační poškození, snížení aerobní energie	LME	PE	1,25; 5; 20 g/kg	Silva et al., 2021b
Diptera ( <i>Chironomus tepperi</i> )	Metabolická odpověď	LME	PE	125; 250; 500; 1000 MP/kg	Lu et al., 2023
Diptera ( <i>Chironomus sancticaroli</i> )	Účinky expozice MP, míra emergence	LME	PET	500; 5000 MP/kg	Hallai et al., 2024
Diptera ( <i>Chironomus sancticaroli</i> )	Dopad MP na mikrobiom	LME	PA	1000 g/kg	Palacio-Cortés et al., 2022
Diptera ( <i>Culex pipiens</i> )	Ontogenetický přenos MP	LME	PS	8×10 <sup>5</sup> ; 8×10 <sup>2</sup> MP/ml	Al-Jaibachi et al., 2018
Diptera ( <i>Chaoborus crystallinus</i> a <i>Chaoborus obscuripes</i> )	Ontogenetický a trofický přenos MP	LME	PA	15; 150 mg/l	Michler-Kozma et al., 2022
Diptera ( <i>Simulium equinum</i> a <i>Simulium ornatum</i> )	Dopady požití MP	TP	Různé druhy	-	Corami et al., 2022
Diptera ( <i>Aedes aegypti</i> a <i>Aedes albopictus</i> )	Účinky požití MP a NP na přežití a reprodukci	LME	PET, PA, PP, HDPE	50; 100; 10 000 MP/ml	McConnel et al., 2024

### 3.1. Ephemeroptera

Larvy jepic jsou bentické organismy, které se pohybují v kamenitých substrátech tekoucích i stojatých vod. Většinou se živí jako seškrabávači řas, nebo sběrači detritu ze dna (Voshell, 2019). Účinky způsobené požitím mikroplastů u jepic nejsou známe, jelikož nebyly zatím studovány. Výzkumy, které se nějakým způsobem zabývaly interakcemi jepic s MP zahrnovaly čeledi Baetidae, Heptageniidae a Ephemeridae (Cera a Scalici, 2021; Gallitelli et al., 2021; Khedre et al., 2024a). U druhu *Ephemerella danica* bylo zjištěno, že spíše hledají úkryt a zahrabávají se do substrátu z MP než do přírodního substrátu. Jepice tak mohou být vystaveny velmi vysokému množství MP, ale přesné dopady dlouhodobého působení nejsou zjištěny (Gallitelli et al., 2021). Ve studii Parker et al., (2022) byl obsah požitých částic nejvyšší u skupiny Ephemeroptera v porovnání s ostatními makrobezobratlými. V Nash et al., (2023) a Khedre et al., (2024a) zase nad jepicemi dominovaly jiné taxony v počtu požitých mikroplastů, jako některé čeledi Odonata, Plecoptera nebo Coleoptera (Hydrophilidae). Důležitým závěrem těchto studií je, že míru kontaminace jednotlivých taxonů nelze předvídat na základě jejich ekologických nebo morfologických vlastností (Parker et al., 2022). Vystavení organismů škodlivým látkám závisí na charakteru stanoviště, koncentraci MP, průtoku vody a také na sezónnosti. V období sucha, převážně v letních měsících, se obsah MP zdánlivě zvyšuje v důsledku úbytku vody, naopak srážkové období zvyšuje průtok řek a ředí koncentrace MP. V odpadních vodách a oblastech, kde ČOV ústí do řek, můžou být koncentrace zvýšené a představovat riziko pro organismy (Windsor et al., 2019b; Cera a Scalici, 2021; Khedre et al., 2024a,b).

### 3.2. Odonata

Nymfy Odonata žijí ve stojatých nebo tekoucích vodách, jsou výhradními predátory a také velikostně patří k jedněm z největších zástupců z říše vodního hmyzu (Voshell, 2019). Díky jejich vysoké nutriční hodnotě a udržitelnému chovu často slouží jako alternativní zdroj bílkovin při řešení problému se zvyšující se lidskou populací. V rámci bezpečnosti proto byly s druhem anisopterní vážky *Pantala* sp. provedeny studie na obsah MP v těle larev. Přestože se může tento hmyz jevit jako ideální zdroj potravy, je schopný akumulovat mikroplasty společně s jinými škodlivými látkami a představovat riziko kontaminace potravních sítí (Maneechan a Prommi, 2022; Maneechan et al., 2022; Yıldız et al., 2022). Zjištěné výsledky také potvrzují další studie, které prokázaly bioakumulaci MP u jiných druhů vážek (Akindele et al., 2020; Zain et al., 2022; Khedre et al., 2024a). Koncentrace MP u zástupců z čeledi Aeshnidae nebo Coenagrionidae byly vyšší než u dravých Hemiptera a některých druhů Ephemeroptera (Khedre et al., 2024a). Tyto koncentrace v predátorech však nepřekonalily koncentrace v rámci skupiny sběračů *Chironomus* sp. (Diptera) a *Siphonurus* sp. (Ephemeroptera), kteří požívají vysoké množství MP ze sedimentu (Akindele et al., 2020).

V experimentu Immerschitt a Martens, (2020) byly larvy anisopterní vážky *Anax imperator* vystaveny PE vláknům v mezoplastické velikosti (asi 0,8 cm) podobajících se přirozené kořisti *Chironomus* sp. Po ulovení dokázaly larvy rozpoznat, že se nejedná o potravu

a aktivovaly ne příliš účinný obranný mechanismus odstraňování nejdých vláken pomocí labia a předních končetin. Ukázalo se, že larvy byly schopné rozložit mezoplastická vlákna na velikosti MP pomocí chitinových zubů v žaludku, které napomáhají trávení, a část z nich vyloučit zpět do prostředí. Některé kusy zůstaly zachycené v žaludku a ve větším množství by mohly způsobit ucpání střev. Mikroplasty byly ale příliš velké na to, aby pronikly do tkání nebo Malpighické trubice a způsobily metabolické změny. Větší riziko představují spíše mikroplasty v řádech desítek  $\mu\text{m}$ , nebo NP (Chagas et al., 2021; Guimarães et al., 2021).

U anisopterní vážky *Aphylla williamsoni* byly pozorovány biochemické změny při expozici NP (Guimarães et al., 2021) a PLA bio-MP (Chagas et al., 2021) při koncentracích relevantních pro životní prostředí. Oba experimenty probíhaly po stejně krátkou dobu 48 hodin a došly k velmi podobným závěrům. Po expozici došlo k REDOX nerovnováze, kdy zvýšení sledovaných biomarkerů indikovalo oxidační stres. Byly zjištěny vyšší hladiny oxidu dusnatého (NO) a reaktivních látek kyseliny thiobarbiturové (TBARS), což vedlo ke zvýšené lipidové peroxidaci (LPO) a tedy i oxidačnímu poškození. Dále byla zjištěna snížená aktivita acetylcholinesterázy (AChE), která vede k hromadění acetylcholinu a neurotoxicitě. Rozdíl, mezi sledovanými skupinami, nastal při antioxidačních procesech. Larvy *A. williamsoni* vystavené bio-MP vykazovaly nižší hladiny thiolů a superoxid dismutázy (SOD) vedoucí k oslabení antioxidačních obranných mechanismů (Chagas et al., 2021). Expozice NP, navzdory zvýšenému oxidačnímu stresu, zvýšila aktivitu antioxidantů. Projevila se větší aktivitou SOD a zachycování DPPH radikálů. Tyto výsledky poukazují na možnou adaptivní reakci ke zmírnění oxidačního poškození (Guimarães et al., 2021).

### 3.3. Plecoptera

Larvy Plecoptera žijí pouze v tekoucích a chladných vodách, některé druhy se živí rostlinným materiálem a jiné jsou zase predátoři (Voshell, 2019). Pošvatky jsou součástí takzvané EPT skupiny, která zahrnuje Ephemeroptera, Plecoptera a Trichoptera a slouží jako velmi spolehlivý ukazatel čistoty vody. Absence EPT skupiny ve vzorcích predikuje vysoké znečištění vodního zdroje mikroplasty (Let et al., 2022; Erhenhi et al., 2024; Tubić et al., 2024). Pošvatky vykazovaly nejvyšší koncentrace mikroplastů z EPT skupiny. Svými hodnotami převyšovaly jepice, chrostíky i další taxony (Pongon a Owen, 2020; Nash et al., 2023). Plecoptera z čeledi Nemouridae a Perlidae měly dlouhodobě jedny z nejvyšších hodnot mikroplastů v těle. Predátoři v porovnání s filtrátory vykazovali signifikantně vyšší hodnoty mikroplastů, což naznačuje, že predátorské druhy Plecoptera mohou být zvláště zranitelnou skupinou (Nash et al., 2023).

### 3.4. Hemiptera

Dospělci i larvy vodních druhů z řádu Hemiptera žijí v mělkých oblastech, většinou při okrajích stojatých vod, mají bodavě sací ústní ústrojí a jsou převážně dravé (Voshell, 2019). O vodních ploštících a jejich interakcích s mikroplasty není známo mnoho informací. Bylo zjištěno, že množství pozřených mikroplastů dosahuje u této skupiny spíše nižších hodnot, na rozdíl od ostatních taxonů vodních bezobratlých. Koncentrace MP byly nízké u býložravých

Hemiptera, stejně tak u dravých čeledí Gerridae a Micronectidae (Parker et al., 2022; Khedre et al., 2024a). Ve studii Khedre et al., (2024b) pozorovali Corixidae a Notonectidae žijící v odpadních vodách společně s roztoči Hydrachnidie (vodule). Samotní roztoči byli schopni akumulovat mikroplasty z odpadních vod. Ploštice žijící v přítomnosti vodulí vykazovaly vyšší hodnoty intoxikace mikroplasty než ty, které jimi nebyly infikované. Výsledky tedy naznačují, že parazitizmus vodních roztočů může mít vliv na množství požitých MP. Dále byl zjišťován vliv mikroplastů a detergentu na jedince z čeledi Corixidae a jejich střevní mikroflóru (Varg a Svanbäck, 2023). MP a běžně používaný detergent SDS dokázaly změnit složení mikrobiomu klešťanek více při samotném výskytu, než ve společné vazbě. Jinak tomu bylo ale u přežívání jedinců. Při krátké expozici (48 hodin) žádné výrazné změny nenastaly. Společná interakce SDS a MP však způsobila signifikantní zvýšení mortality. Není vyloučené, že by stejné výsledky nastaly pouze po expozici jedné ze zmíněných látek, ale jejich společná vazba tento proces značně urychlila.

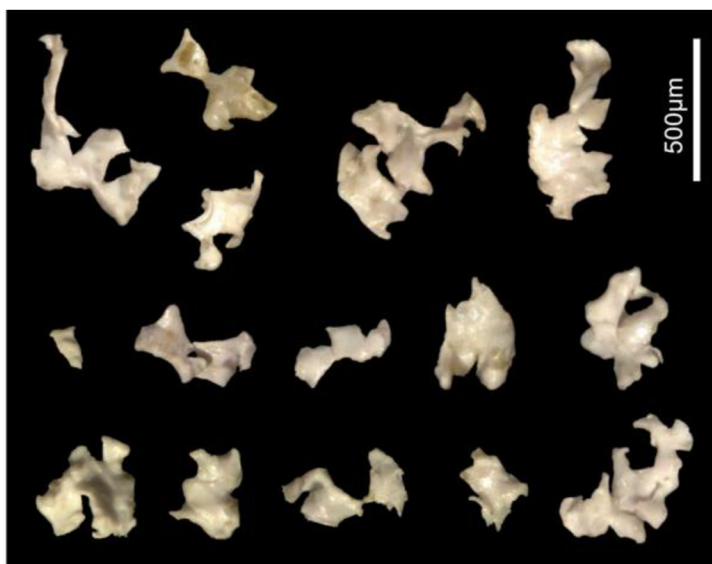
### 3.5. Trichoptera

Larvy chrostíků často preferují stanoviště s proudící vodou. Mají širokou škálu potravních strategií a některé druhy si staví úkryty z hedvábných sítí a přírodních materiálů. Ke stavbě využívají písek, drobné kamínky, listí a jiné dostupné materiály (Voshell, 2019). Se stále běžnějším výskytem mikroplastů v přírodě bylo zjišťováno, zda je chrostíci využívají při stavbě svých úkrytů. Přestože stále z většiny preferují přírodní materiály, i tak byly MP běžnou součástí jejich schránek (Obr. 6; Ehlers et al., 2019; Ehlers et al., 2020; Gallitelli et al., 2021; Valentine et al., 2022; Karnaukhov et al., 2024). Pouzdra běžně poskytují ochranu před predátory a často jejich hmotnost přispívá k udržení se v proudu. Přítomnost MP narušila jejich stabilitu a pevnost, což představuje při útoku predátora vyšší riziko. Nižší hustota MP zase schránku nadlehčuje a hrozí strhnutí organismu proudem. Takto mohou mikroplasty nepřímo ohrožovat přežívání chrostíků. Přestože tímto způsobem přicházejí MP do přímého kontaktu s těly chrostíků, dokonce ke kontaktu se samotnými žábry, přímé ohrožující dopady začleněných MP ve schránkách nejsou studované a známé (Ehlers et al., 2020). Chrostíci během stavby svých pouzder pomocí ústního ústrojí drtili dostupný materiál, včetně mikroplastů, na menší kusy (Obr. 7). Výsledky ukázaly, že i organismy, zejména drtiči, hrají velmi důležitou roli při fragmentaci mikroplastů a vzniku sekundárních MP (Valentine et al., 2022). Při hodnocení fyziologických změn bylo zjištěno, že expozice MP vedla k endokrinní nerovnováze a zvýšení hladiny juvenilních hormonů, což mělo za následek opoždění emergence. Převážná část MP byla odstraněna během metamorfózy chrostíků, ale malé množství se akumulovalo a přeneslo do dospělého stádia (Grgić et al., 2023). Zvýšené biomarkery svědčí o tom, že byly larvy vystavené oxidační stresové reakci. Peroxidace lipidů spojená s vyššími hodnotami MDA (malondialdehyd) a vyšší aktivita SOD vypovídají o celkovém zhoršení zdraví larev (Piccardo et al., 2021).





Obrázek 6: Příklady zakomponování MP do pouzder chrostíků *Hydatophylax nigrovittatus*: (A) schránka bez MP (z jiného odběrového místa), (B1) – (B7) schránky s mikroplasty a mezoplasty (mezoplasty jsou označeny šipkou; převzato z [Karnaukhov et al., 2024](#))



Obrázek 7: Rozkousané mikroplastové fragmenty z původních polylaktidových (PLA) obdelníků o velikosti 6×3,4 mm (převzato z [Valentine et al., 2022](#))

### 3.6. Coleoptera

Naprostá většina druhů brouků je terestrických, ale některé druhy mohou být i vodní. Žijí spíše ve stojatých, ale někdy i tekoucích vodách, jsou to predátoři, seškrabávači i sběrači ([Voshell, 2019](#)). Převážná část studií, které se zabývaly interakcemi Coleoptera s mikroplasty, byla zaměřena na suchozemské brouky ([Yang et al., 2021](#); [Zhu et al., 2023](#); [Li et al., 2024](#)). Výzkumy potvrzují, že i některé druhy vodních brouků konzumují mikroplasty ([Parker et al., 2022](#); [Bertoli et al., 2022](#); [Khedre et al., 2024a](#)). V experimentu [Kim et al., \(2018\)](#) se zaměřili na druh potápníka *Cybister japonicus* a jeho potravní chování při lovu ryb kontaminovaných mikroplasty. Přítomnost MP v potravě ovlivnila chování potápníků a významně snížila rychlost požití kořisti. MP se nacházely pouze v proventrikulu (žvýkacím žaludku) a voleti, v jiných tělních orgánech nebyly nalezeny. Proventrikulus je svalnatý orgán nacházející se mezi voletem a trávicím kanálem, zadržuje nestravitelné části a reguluje průchod potravy do středního a zadního střeva ([Kehl, 2014](#)). MP se zachytily v proventrikulu a během 48 hodin byly veškeré částice regurgitací vyloučeny z těla ven. Výsledky naznačují, že je potápník schopen rozpoznat nestravitelné složky a přizpůsobením svého chování se zbavit MP ze svého těla. Neměl by být v přímém ohrožení způsobeném MP, ale může sloužit jako vektor těchto látek a přenášet je až do terestrického prostředí ([Kim et al., 2018](#)).

### 3.7. Lepidoptera

Většina motýlů je suchozemských, ale některé druhy, jako je například *Cataglyphis lemnae*, mají část svého vývoje ve sladké vodě ([Mariani et al., 2023](#)). V experimentu byl pozorován trofický přenos MP od producenta k primárnímu konzumentovi pomocí kontaminovaných vodních rostlin *Lemna minuta*. Sledovaly se účinky na přežívání a vývoj jedinců. V porovnání s kontrolou byla mortalita u kontaminovaných motýlů mnohonásobně vyšší a nebyli schopni dokončit svůj vývojový cyklus. Výsledky prokázaly, že expozice

mikroplastům má negativní vliv na přežívání a vývoj larev *Cataclysta lemnata*, což může mít širší ekologické důsledky pro ekosystémy.

### 3.8. Diptera

Jedná se o početný řád dvoukřídlého hmyzu s dokonalou proměnou. Nedospělá stádia některých čeledí, jako například Chironomidae (pakomárovití), Simulidae (muchničkovití) nebo Culicidae (komárovití), se vyvíjí ve sladkovodních ekosystémech. Žijí ve stojatých i tekoucích vodách, pohybují se volně ve vodním sloupci nebo sedimentu a mají širokou škálu potravních strategií (Voshell, 2019). Právě Diptera jsou nejvíce pozorovanou skupinou v souvislosti s MP znečištěním. Nejvíce sledovanou čeledí jsou Chironomidae v čele s druhem *Chironomus riparius*, který byl podle Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) vybrán jako modelový organismus (Heinlaan et al., 2020). Byl zvolen pro jeho širokou distribuci a ekologickou významnost, kdy je běžnou součástí potravních sítí a také indikátorem čistoty vod. Larvy žijí v sedimentu a jsou tak přímo vystaveny usazujícím se MP a znečišťujícím látkám. Mají krátký životní cyklus s vysokou reprodukční kapacitou, což umožňuje sledování evolučních odpovědí více generací v krátkém čase. Tyto vlastnosti z něj dělají ideální druh pro laboratorní experimenty a sledování ekotoxikologických dopadů mikroplastů na organismy (Silva et al., 2021a; Silva et al., 2021b Carrasco-Navarro et al., 2021; Khosrovyan et al., 2022; Sebteoui et al., 2024). Přestože u druhu *C. riparius* bylo provedeno nejvíce studií, byly zkoumány i další druhy z čeledi Chironomidae, jako jsou *Chironomus sancticaroli* nebo *Chironomus tepperi* (Hallai et al., 2024; Castro et al., 2022; Lu et al., 2023). Některé studie se také zabývaly čeleděmi Simulidae, Chaoboridae nebo druhem *Culex pipiens* (Culicidae) (Al-Jaibachi et al., 2018; Corami et al., 2022; Michler-Kozma et al., 2022).

Přestože Diptera vystavená i vysokým koncentracím MP patří k odolnějším taxonům, (Voshell, 2019; McConnel et al., 2024), mohou vykazovat mechanická poškození trávicího traktu se zánětlivými reakcemi, které vedou k oxidačnímu stresu (Prata et al., 2023). Tento stres může narušit jejich růst, vývoj a reprodukci (Silva et al., 2019; Navarro et al., 2021; Castro et al., 2022). MP mohou také změnit střevní mikroflóru a imunitní odpověď jedinců, což zvyšuje jejich náchylnost k infekcím (Palacio-Cortés et al., 2022). Celkově MP ovlivňují nejen přežití a zdraví, ale mohou mít i širší ekologické důsledky na populace a potravní řetězce (Al-Jaibachi et al., 2018; Khosrovyan et al., 2022).

#### 3.8.1. Imunitní reakce

MP pozřené druhem *Chironomus riparius* se mohou hromadit ve střevech a způsobovat takzvané pseudonasyčení, kdy organismus nepřijímá dostatek nutričně bohaté potravy a dochází k energetickým ztrátám. Pokud jsou částice dostatečně velké a ostré, mohou způsobovat obstrukci střeva, která následně vyvolává zánětlivé procesy a komplexní kaskádu imunitních reakcí (Prata et al., 2023). Dle Silva et al., (2021a) dojde ke zvýšení aktivace fenoloxidázy (PO), která je úzce propojena s produkcí reaktivních forem kyslíku (ROS) jako je například peroxid vodíku nebo superoxid (Silva et al., 2021a). Tyto látky mají imunitní význam při zbavování těla patogenů a cizorodých látek. Při nadměrné aktivitě způsobují buňkám

oxidační stres a dochází k poškození tkání. Vlivem oxidačního stresu dochází k lipidové peroxidaci (LPO), což je proces, při němž ROS poškozují lipidy v buněčných membránách, vedoucí k narušení funkce buněk (Silva et al., 2021b; Prata et al., 2023). Dále se také snižuje aktivita některých antioxidantních enzymů, konkrétně tedy katalázy (CAT) a glutathion-S-transferázy (GST), které jsou zodpovědné za detoxikaci organismu. Při nižších hodnotách těchto enzymů není tělo schopné se dostatečně zbavovat toxinů, což vede k oxidačnímu poškození. MP navíc způsobují pokles aerobní produkce energie snížením aktivity elektronového transportního systému (ETS) v mitochondriích (Silva et al., 2021b). ETS je klíčový pro produkci ATP, při nedostatečném fungování systému dochází k úbytku energie. Metabolický stres nutí buňky přecházet na méně efektivní anaerobní metabolismus. To má za následek zvýšení energetických nákladů na udržení homeostázy, což dále přispívá k úbytku lipidových zásob. Za určitých podmínek, jako je expozice bio-MP vystavených stárnutí UV zářením, může zase dojít k opačné reakci aktivací aerobního metabolismu a zvýšení aktivity CAT a GST. Podobně jako u Odonata se může jednat o adaptivní chování a snahu zbavit se cizorodých látek z těla (Ferreira-Filipe et al., 2024). Kromě toho byla pozorována zvýšená aktivita AChE u larev vystavených vyšším koncentracím mikroplastů. Zvýšená aktivita AChE může být spojena s peristaltickými pohyby jako odpověď na obstrukci střeva a s reakcí na zánět (Silva et al., 2021b). Zvýšení aktivity AChE se projevuje narušením normálního přenosu nervových impulzů, což může mít negativní dopad na celkové zdraví organismu. Tímto způsobem MP způsobují nejen mechanické a zánětlivé poškození, ale také komplexní biochemické změny, které ovlivňují energetický metabolismus, antioxidantní obranu a nervový systém hmyzu.

### 3.8.2. Změny v genové expresi a fyziologii

Expozice mikroplastů u druhu *Chironomus riparius* způsobuje významné změny v genové expresi (Carrasco-Navarro et al., 2021; Khosrovyan et al., 2022). Studie zkoumají účinky různých typů mikroplastů a ukazují, že larvy tohoto druhu reagují na jejich přítomnost změnou několika klíčových genů. V experimentu Carrasco-Navarro et al. (2021) byly pozorovány geny kódující některé heat shock proteiny (HSP), geny pro enzym mangan superoxid dismutázu (SOD Mn) a FK506-binding protein 39 kDa (FKBP39). Některé HSP geny byly nadměrně exprimovány, stejně jako SOD Mn, jako reakce na stresové faktory a oxidační stres. Změna exprese FKBP39 zase naznačuje možné narušení vývojových procesů larev. Přestože během krátké doby experimentu nebyla zaznamenána žádná mortalita, změny v genové expresi poukazují na potenciální dlouhodobé efekty na zdraví a vývoj organismů.

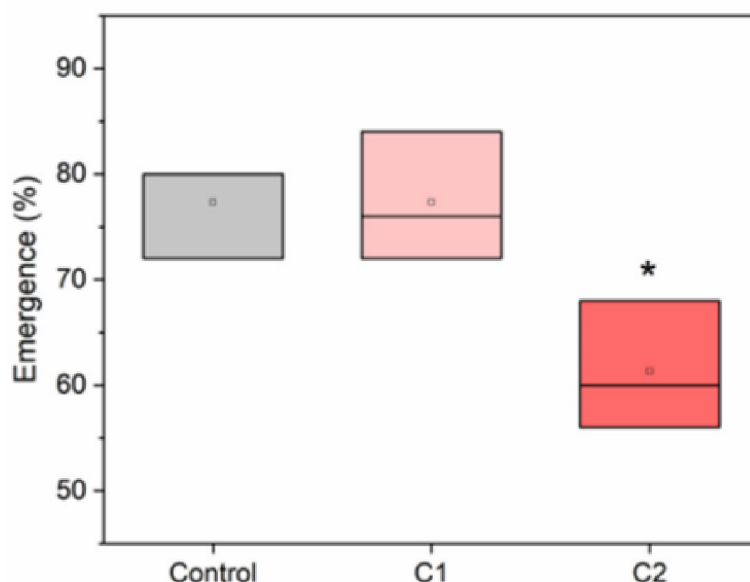
Studie Khosrovyan et al., (2022) zkoumala genomové reakce sedmi po sobě jdoucích generací larev vystavených PA MP. Počáteční expozice MP vedla k významnému snížení míry emergence v první generaci, nicméně během nadcházejících tří generací došlo k rychlé obnově. Byly zaznamenány výrazné změny v alelových frekvencích, což indikovalo silný selekční tlak, zejména v genech spojených s oxidačním stresem. Pakomáři se během několika generací dokázali přizpůsobit tomuto selekčnímu tlaku a provést adaptivní změny na úrovni genomu. Tyto výsledky naznačují, že mikroplasty nejen způsobují akutní buněčný stres, ale mohou také

vyvolávat evoluční adaptace na molekulární úrovni, což má potenciál ovlivnit zdraví a přežití populací ve vodních ekosystémech.

Chironomidae hrají důležitou roli v procesu bioturbace (proces prohrabávání a přemísťování sedimentů organismy) a usazování MP částí do sedimentů. Larvy jsou svým pohybem v substrátu schopné posouvat MP do hlubších vrstev, kde se akumulují (Sebteoui et al., 2024). Mikroplasty nalezené v sedimentu byly větších rozměrů než ve střevech. Výsledky poukazují na možnost fragmentace, nebo dokonce na degradační procesy probíhající ve střevech larev. Například výzkum Janakieva et al., (2023) potvrzuje, že některé střevní bakterie tohoto hmyzu skutečně mohou biologicky rozkládat určité plasty. Konkrétně bakterie *Peribacillus simplex* a *P. frigoritolerans* prokázaly schopnost intenzivně růst na PE, PVC a PA. Biodegradace plastů byla také pozorována u několika dalších druhů z terestrického prostředí, jak uvádí například studie Cucini et al., (2020), Luo et al., (2021), Yang et al., (2021), Lou et al., (2022) a Goveas et al., (2023). Některé bakteriální kmeny izolované ze střev hmyzu mají slibný potenciál pro rozvoj ekologické strategie degradace plastů.

### 3.8.3. Ekologie

Kromě obranných mechanismů a fyziologických změn může mít mikroplastové znečištění vliv na vývoj jedinců. U druhu *Chironomus sancticaroli* nebyla zjištěna žádná signifikantní změna v míře emergence larev do dospělého stádia, ale emergence byla významně urychlena asi o 5–6 dní (Castro et al., 2022). Ve výzkumu Hallai et al., (2024) bylo snížení emergence signifikantní a mortalita vyšší (Obr. 8). Rozdílné výsledky experimentů jsou důvodem využití různých typů mikroplastů při jiných koncentracích.



Obrázek 8: Míra emergence druhu *Chironomus sancticaroli* v experimentu s environmentálně relevantními koncentracemi MP (kontrolní skupina; C1: 500 MP/kg suchého sedimentu; C2: 5000 MP/kg suchého sedimentu; převzato z Hallai et al., 2024)

U některých druhů z čeledi Chaoboridae a u *Culex pipiens* (Culicidae) byla sledována míra ontogenetického přenosu přes různá vývojová stádia. V experimentu [Al-Jaibachi et al., \(2018\)](#) byly MP nalezeny v Malpighických trubicích dospělců. Jestliže jsou částice dostatečně malé, jsou schopné pronikat do tkání a usazovat se i v tubulech. Tímto způsobem se mohou MP dostávat přímo z vodních ekosystémů na souš a být součástí terestrických potravních řetězců ([Yıldız et al., 2022](#)). Na rozdíl od komárů byl ontogenetický přenos u Chaoboridae minimální. Odpadní částice byly pozřeny společně se zooplanktonem, na nějž se přichytily a většina MP společně s nestravitelnými částmi potravy byla vyloučena regurgitací z těla. Chaoboridae by neměli být v přímém ohrožení účinků MP, ale svým potravním chováním vrací MP zpět do vodního sloupce, kde se akumulují a mohou potenciálně škodit dalším organismům ([Michler-Kozma et al., 2022](#)).

## Závěr

Z přehledu literatury vyplývá, že se MP vyskytují ve všech typech sladkovodních ekosystémů a jejich negativní dopady na vodní hmyz jsou stále více zjevné. Organismům způsobují zánětlivé reakce, změny v endokrinním systému a vývojových procesech, mění mikrobiom střev a způsobují metabolické změny, které vedou k oxidačnímu stresu a celkovému zhoršení fitness.

Diptera jsou nejprozkoumanější skupinou s nejvíce známými negativními dopady MP. Některé závěry studií se shodují i s jinými řády hmyzu a dalo by se předpokládat, že působení MP bude mít podobné účinky i na doposud neprobádané čeledi. Vodní brouci z řádu Coleoptera by neměli být výrazně ohroženi, jelikož jsou do jisté míry schopni rozpoznat nejdle plastové kusy a vyloučit je ze svého těla. Ani plošnice z řádu Hemiptera by neměly být v přímém ohrožení z důvodu jejich potravních strategií. Díky jejich bodavě sacímu ústnímu ústrojí a přijímání potravy v tekuté podobě jsou vystaveny nižšímu riziku požití MP, kdy se vyhnou přichyceným částicím na povrchu kořisti. Vzhledem k tomu, že sedimenty mají tendenci akumulovat vyšší množství MP než samotná voda, bentické druhy se stávají ohroženějšími než ty pelagické. Zvláště ohrožené skupiny jsou Ephemeroptera, Plecoptera a Trichoptera, které běžně slouží jako indikátor čistoty vody a jsou tedy citlivé na znečištění. Ačkoli mohou být jepice při zahrabávání do substrátu, stejně jako chrostíci při stavbě schránek, vystaveny přímému kontaktu vysokých koncentrací MP, jejich účinky nebyly zatím studovány. Predátorské skupiny pošvatek mohou být ve větším ohrožení než zástupci s jinou potravní strategií, ale kvůli nedostatku dat nejsou tyto výsledky jednoznačné. Tyto druhy jsou v ekosystému velmi významné, ale dopady MP na ně nejsou téměř známy a měly by být více zapojeny do výzkumů v otázce mikroplastového znečištění.

O některých skupinách není známo mnoho informací a budoucí výzkumy by se měly zaměřit právě na tyto málo prozkoumané skupiny. Bylo by vhodné studovat jednotlivé potravní gildy různých taxonů, aby bylo možné je navzájem porovnávat a určit nejrizikovější potravní strategie. V experimentálních studiích se často pracuje s nepřirozeně vysokými koncentracemi MP, bylo by dobré provádět více studií s koncentracemi relevantními pro životní prostředí. Většina dosavadních studií se zabývala akutními účinky MP v krátkodobých experimentech. Budoucí výzkum by měl zahrnovat dlouhodobé studie, které by se zaměřily na chronické účinky a možné adaptivní změny, které mohou mít dopad na životní cyklus hmyzu, včetně jejich vývoje a reprodukci. Je potřeba pokračovat v intenzivním výzkumu sladkovodních ekosystémů pro lepší porozumění a vyplnění mezer ve znalostech mikroplastového znečištění a jeho dopadů na sladkovodní hmyz.

## Seznam literary

- Ahmed, R., Hamid, A.K., Krebsbach, S.A., He, J. & Wang, D. 2022. Critical review of microplastics removal from the environment. *Chemosphere* **293**: 133557.
- Akindele, E.O. & Alimba, C.G. 2021. Plastic pollution threat in Africa: current status and implications for aquatic ecosystem health. *Environ Sci Pollut Res* **28**: 7636–7651.
- Akindele, E.O., Ehlers, S.M. & Koop, J.H.E. 2020. Freshwater insects of different feeding guilds ingest microplastics in two Gulf of Guinea tributaries in Nigeria. *Environ Sci Pollut Res* **27**: 33373–33379.
- Al-jaibachi, R., Cuthbert, R. & Callaghan, A. 2018. Up and away: Ontogenic transference as a pathway for aerial dispersal of microplastics. *Biology letters* **14**.
- Batista, D., Pradhan, A., Pascoal, C. & Cássio, F. 2022. Evidence of micro and macroplastic toxicity along a stream detrital food-chain. *Journal of Hazardous Materials* **436**: 129064.
- Ben Stride, Abolfathi, S., Bending, G.D. & Pearson, J. 2024. Quantifying microplastic dispersion due to density effects. *Journal of Hazardous Materials* **466**: 133440.
- Bertoli, M., Pastorino, P., Lesa, D., Renzi, M., Anselmi, S., Prearo, M., *et al.* 2022. Microplastics accumulation in functional feeding guilds and functional habit groups of freshwater macrobenthic invertebrates: Novel insights in a riverine ecosystem. *Science of The Total Environment* **804**: 150207.
- Blettler, M.C.M., Garello, N., Ginon, L., Abrial, E., Espinola, L.A. & Wantzen, K.M. 2019. Massive plastic pollution in a mega-river of a developing country: Sediment deposition and ingestion by fish (*Prochilodus lineatus*). *Environmental Pollution* **255**: 113348.
- Bujaczek, T., Kolter, S., Locky, D. & Ross, M.S. 2021. Characterization of microplastics and anthropogenic fibers in surface waters of the North Saskatchewan River, Alberta, Canada. *FACETS* **6**: 26–43. Canadian Science Publishing.
- Cantonati, M., Poikane, S., Pringle, C.M., Stevens, L.E., Turak, E., Heino, J., *et al.* 2020. Characteristics, Main Impacts, and Stewardship of Natural and Artificial Freshwater Environments: Consequences for Biodiversity Conservation. *Water* **12**: 260. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Carpenter, S.R., Stanley, E.H. & Zanden, M.J.V. 2011. State of the World's Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes. *Annual Review of Environment and Resources* **36**: 75–99. Annual Reviews.
- Carrasco-Navarro, V., Muñoz-González, A.-B., Sorvari, J. & Martínez-Guitarte, J.-L. 2021. Altered gene expression in *Chironomus riparius* (insecta) in response to tire rubber and polystyrene microplastics. *Environmental Pollution* **285**: 117462.



- Casillas, G., Hubbard, B.C., Telfer, J., Zarate-Bermudez, M., Muianga, C., Zarus, G.M., *et al.* 2023. Microplastics Scoping Review of Environmental and Human Exposure Data. *Microplastics* **2**: 78–92. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Castillo, A.B., Al-Maslamani, I. & Obbard, J.P. 2016. Prevalence of microplastics in the marine waters of Qatar. *Marine Pollution Bulletin* **111**: 260–267.
- Castro, G.B., Bernegossi, A.C., Felipe, M.C., Ogura, A.P., de Lima e Silva, M.R. & Corbi, J.J. 2022. Polyethylene microplastics and substrate availability can affect emergence responses of the freshwater insect *Chironomus sancticaroli*. *Ecotoxicology* **31**: 679–688.
- Cazzolla Gatti, R. 2016. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats. *International Journal of Environmental Studies* **73**: 887–904. Routledge.
- Cera, A. & Scalici, M. 2021. Freshwater wild biota exposure to microplastics: A global perspective. *Ecology and Evolution* **11**: 9904–9916.
- Chagas, T.Q., Araújo, A.P. da C. & Malafaia, G. 2021. Biomicroplastics *versus* conventional microplastics: An insight on the toxicity of these polymers in dragonfly larvae. *Science of The Total Environment* **761**: 143231.
- Coffin, S., Wyer, H. & Leapman, J.C. 2021. Addressing the environmental and health impacts of microplastics requires open collaboration between diverse sectors. *PLOS Biology* **19**: e3000932. Public Library of Science.
- Corami, F., Rosso, B., Iannilli, V., Ciadamidaro, S., Bravo, B. & Barbante, C. 2022. Occurrence and Characterization of Small Microplastics (<100 µm), Additives, and Plasticizers in Larvae of Simuliidae. *Toxics* **10**: 383. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Cucini, C., Leo, C., Vitale, M., Frati, F., Carapelli, A. & Nardi, F. 2020. Bacterial and fungal diversity in the gut of polystyrene-fed *Alphitobius diaperinus* (Insecta: Coleoptera). *Animal Gene* **17–18**: 200109.
- Datu, S.S., Supriadi & Tahir, A. 2019. Microplastic in *Cymodocea rotundata* Seagrass Blades. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* **4**.
- D'Avignon, G., Gregory-Eaves, I. & Ricciardi, A. 2022. Microplastics in lakes and rivers: an issue of emerging significance to limnology. *Environ. Rev.* **30**: 228–244. NRC Research Press.
- 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.
- Dehaut, A., Cassone, A.-L., Frère, L., Hermabessiere, L., Himber, C., Rinnert, E., *et al.* 2016. Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. *Environmental Pollution* **215**: 223–233.

- Ding, R., Tong, L. & Zhang, W. 2021. Microplastics in Freshwater Environments: Sources, Fates and Toxicity. *Water Air Soil Pollut* **232**: 181.
- Dissanayake, P.D., Kim, S., Sarkar, B., Oleszczuk, P., Sang, M.K., Haque, M.N., *et al.* 2022. Effects of microplastics on the terrestrial environment: A critical review. *Environmental Research* **209**: 112734.
- Dudgeon, D. 2019. Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Current Biology* **29**: R960–R967.
- Ehlers, S., Manz, W. & Koop, J. 2019. Microplastics of different characteristics are incorporated into the larval cases of the freshwater caddisfly *Lepidostoma basale*. *Aquat. Biol.* **28**: 67–77.
- Ehlers, S.M., Al Najjar, T., Taupp, T. & Koop, J.H.E. 2020. PVC and PET microplastics in caddisfly (*Lepidostoma basale*) cases reduce case stability. *Environ Sci Pollut Res* **27**: 22380–22389.
- Erhenhi, O.H., Enwemiwe, V.N., Micheal, O.E., Aghahowa, E., Esiwo, E., Obi, C.C., & Omokoro, F. 2024. Studies on the Impact of Microplastics in Freshwater Systems: Biota Could Be Vital Indicators in Delta State, Nigeria. *Uttar Pradesh Journal of Zoology* **45(14)**: 34-44.
- Esiukova, E.E., Lobchuk, O.I., Volodina, A.A. & Chubarenko, I.P. 2021. Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bulletin* **171**: 112738.
- Ferreira-Filipe, D.A., Paço, A., Pinho, B., Silva, R., Silva, S.A.M., Jesus, F., *et al.* 2024. Microplastics from agricultural mulch films: Biodegradation and ecotoxicity in freshwater systems. *Science of The Total Environment* **912**: 169287.
- Gallitelli, L., Cera, A., Cesarini, G., Pietrelli, L. & Scalici, M. 2021. Preliminary indoor evidences of microplastic effects on freshwater benthic macroinvertebrates. *Sci Rep* **11**: 720. Nature Publishing Group.
- Gallitelli, L., Cesarini, G., Sodo, A., Cera, A. & Scalici, M. 2023. Life on bottles: Colonisation of macroplastics by freshwater biota. *Science of The Total Environment* **873**: 162349.
- Geyer, R., Jambeck, J.R. & Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* **3**: e1700782. American Association for the Advancement of Science.
- Ghosh, S.S., Saikia, K. & Deka, P. n.d. Aquatic insect ecology, threats and challenges for its conservation-A Review. *International Journal of Entomology Research*.
- Goss, H., Jaskiel, J. & Rotjan, R. 2018. *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bulletin* **135**: 1085–1089.

- Goveas, L.C., Nayak, S., Kumar, P.S., Rangasamy, G., Vidya, S.M., Vinayagam, R., *et al.* 2023. Microplastics occurrence, detection and removal with emphasis on insect larvae gut microbiota. *Marine Pollution Bulletin* **188**: 114580.
- Grgić, I., Cetinić, K.A., Karačić, Z., Previšić, A. & Rožman, M. 2023. Fate and effects of microplastics in combination with pharmaceuticals and endocrine disruptors in freshwaters: Insights from a microcosm experiment. *Sci Total Environ* **859**: 160387.
- Gruber, E.S., Stadlbauer, V., Pichler, V., Resch-Fauster, K., Todorovic, A., Meisel, T.C., *et al.* 2023. To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro- and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity. *Expo Health* **15**: 33–51.
- Guimarães, A.T.B., de Lima Rodrigues, A.S., Pereira, P.S., Silva, F.G. & Malafaia, G. 2021. Toxicity of polystyrene nanoplastics in dragonfly larvae: An insight on how these pollutants can affect benthic macroinvertebrates. *Science of The Total Environment* **752**: 141936.
- Hallai, L. de O., Rani-Borges, B., Pompêo, M. & Queiroz, L.G. 2024. Understanding the microplastic pollution impact on *Chironomus sancticarloi* larvae development and emergence. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* 12. EDP Sciences.
- Heinlaan, M., Kasemets, K., Aruoja, V., Blinova, I., Bondarenko, O., Lukjanova, A., *et al.* 2020. Hazard evaluation of polystyrene nanoplastic with nine bioassays did not show particle-specific acute toxicity. *Science of The Total Environment* **707**: 136073.
- Immerschitt, I. & Martens, A. 2020. Ejection, ingestion and fragmentation of mesoplastic fibres to microplastics by *Anax imperator* larvae (Odonata: Aeshnidae). *Odonatologica* **49**: 57–66.
- Issac, M.N. & Kandasubramanian, B. 2021. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environ Sci Pollut Res Int* **28**: 19544–19562.
- Janakiev, T., Milošević, Đ., Petrović, M., Miljković, J., Stanković, N., Zdravković, D.S., *et al.* 2023. *Chironomus riparius* Larval Gut Bacteriobiota and Its Potential in Microplastic Degradation. *Microb Ecol* **86**: 1909–1922.
- Kalčíková, G. 2020. Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution* **262**: 114354.
- Kalčíková, G. 2023. Beyond ingestion: Adhesion of microplastics to aquatic organisms. *Aquatic Toxicology* **258**: 106480.
- Karnaukhov, D.Yu., Lavnikova, A.V., Nepokrytykh, A.V., Zhdanov, I.A., Salovarov, K.V., Guligiev, A.T., Osadchy, B.V., Biritskaya, S.A., Ermolaeva, Y.K., Maslennikova, M.A., Bukhaeva, L.B., Golubets, D.I., Okholina, A.I., Kulbachnaya, N.A., Milovidova, I.V., & Silow, E.A. 2024. Baikal endemic and Palearctic species of caddisflies (Trichoptera) build cases from microplastics. *Acta Biologica Sibirica* **10**: 649–659.

- Kehl, S. 2014. Morphology, Anatomy, and Physiological Aspects of Dytiscids. In: *Ecology, Systematics, and the Natural History of Predaceous Diving Beetles (Coleoptera: Dytiscidae)* (D. A. Yee, ed), pp. 173–198. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Khedre, A.M., Ramadan, S.A., Ashry, A. & Alaraby, M. 2024a. Abundance and risk assessment of microplastics in water, sediment, and aquatic insects of the Nile River. *Chemosphere* **353**: 141557.
- Khedre, A.M., Ramadan, S.A., Ashry, A. & Alaraby, M. 2024b. Can water mites' parasitism influence the number of microplastics ingested by aquatic insects? *Appl Water Sci* **14**: 134.
- 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.
- Kim, S.W., Kim, D., Chae, Y. & An, Y.-J. 2018. Dietary uptake, biodistribution, and depuration of microplastics in the freshwater diving beetle *Cybister japonicus*: Effects on predacious behavior. *Environmental Pollution* **242**: 839–844.
- Koelmans, A.A., Mohamed Nor, N.H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S.M. & De France, J. 2019. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Res* **155**: 410–422.
- Krause, S., Baranov, V., Nel, H.A., Drummond, J.D., Kukkola, A., Hoellein, T., *et al.* 2021. Gathering at the top? Environmental controls of microplastic uptake and biomagnification in freshwater food webs. *Environmental Pollution* **268**: 115750.
- Kye, H., Kim, J., Ju, S., Lee, J., Lim, C. & Yoon, Y. 2023. Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards. *Heliyon* **9**: e14359.
- Lebreton, L. & Andrady, A. 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Commun* **5**: 1–11. Palgrave.
- Let, M., Černý, J., Nováková, P., Ložek, F. & Bláha, M. 2022. Effects of Trace Metals and Municipal Wastewater on the Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera of a Stream Community. *Biology* **11**: 648. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Li, J.-Y., Yu, Y., Craig, N.J., He, W. & Su, L. 2024. Interactions between microplastics and insects in terrestrial ecosystems—A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials* **462**: 132783.
- Lin, C.-T., Chiu, M.-C. & Kuo, M.-H. 2023. Seasonality can override the effects of anthropogenic activities on microplastic presence in invertebrate deposit feeders in an urban river system. *Journal of Hazardous Materials* **443**: 130272.
- Lobelle, D., Kooi, M., Koelmans, A.A., Laufkötter, C., Jongedijk, C.E., Kehl, C., *et al.* 2021. Global Modeled Sinking Characteristics of Biofouled Microplastic. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **126**: e2020JC017098.

- Lokesh, P., Shobika, R., Omer, S., Reddy, M., Saravanan, P., Rajeshkannan, R., *et al.* 2023. Bioremediation of plastics by the help of microbial tool: A way for control of plastic pollution. *Sustainable Chemistry for the Environment* **3**: 100027.
- Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., *et al.* 2019. Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China. *Water Research* **155**: 255–265.
- Lou, H., Fu, R., Long, T., Fan, B., Guo, C., Li, L., *et al.* 2022. Biodegradation of polyethylene by *Meyerozyma guilliermondii* and *Serratia marcescens* isolated from the gut of waxworms (larvae of *Plodia interpunctella*). *Science of The Total Environment* **853**: 158604.
- Lu, H.-C., Kumar, A., Melvin, S.D., Ziajahromi, S., Neale, P.A. & Leusch, F.D.L. 2023. Metabolomic responses in freshwater benthic invertebrate, *Chironomus tepperi*, exposed to polyethylene microplastics: A two-generational investigation. *Journal of Hazardous Materials* **459**: 132097.
- Lu, H.-C., Ziajahromi, S., Neale, P.A. & Leusch, F.D.L. 2021. A systematic review of freshwater microplastics in water and sediments: Recommendations for harmonisation to enhance future study comparisons. *Science of The Total Environment* **781**: 146693.
- Luo, L., Wang, Y., Guo, H., Yang, Y., Qi, N., Zhao, X., *et al.* 2021. Biodegradation of foam plastics by *Zophobas atratus* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) associated with changes of gut digestive enzymes activities and microbiome. *Chemosphere* **282**: 131006.
- Maneechan, W. & Prommi, T. 2022. Occurrence of microplastics in edible aquatic insect *Pantala* sp. (Odonata: Libellulidae) from rice fields. *PeerJ* **10**.
- Maneechan, W., Vitheepradit, A. & Prommi, T.O. 2022. Nutritional Compositions of Aquatic Insects Living in Rice Fields, with a Particular Focus on Odonate Larvae. *Insects* **13**: 1131. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Mariani, F., Di Lernia, D., Venditti, I., Pelella, E., Muzzi, M., Di Giulio, A., *et al.* 2023. Trophic transfer of microplastics from producer (*Lemna minuta*) to primary consumer (*Cataclysta lemnata*) in a freshwater food chain. *Science of The Total Environment* **891**: 164459.
- McConnel, G., Lawson, J., Cañas-Carrell, J.E. & Brelsfoard, C.L. 2024. The effects of nano- and microplastic ingestion on the survivorship and reproduction of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Environmental Entomology* nvae038.
- Meng, Y., Kelly, F.J. & Wright, S.L. 2020. Advances and challenges of microplastic pollution in freshwater ecosystems: A UK perspective. *Environmental Pollution* **256**: 113445.
- Michler-Kozma, D.N., Kruckenfellner, L., Heitkamp, A., Ebke, K.P. & Gabel, F. 2022. Uptake and Transfer of Polyamide Microplastics in a Freshwater Mesocosm Study. *Water* **14**: 887. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- Mizukami-Murata, S., Suzuki, Y., Sakurai, K. & Yamashita, H. 2021. Freshwater alga *Raphidocelis subcapitata* undergoes metabolomic changes in response to electrostatic adhesion by micrometer-sized nylon 6 particles. *Environ Sci Pollut Res* **28**: 66901–66913.
- Mukhopadhyay, P. & v, S. 2022. Presence of Microplastics in Freshwater Ecosystems: An Unheeded Emerging Concern - A Global Review. *Pollution* **8**: 69–104.
- Nantege, D., Odong, R., Auta, H.S., Keke, U.N., Ndatimana, G., Assie, A.F., *et al.* 2023. Microplastic pollution in riverine ecosystems: threats posed on macroinvertebrates. *Environ Sci Pollut Res* **30**: 76308–76350.
- Nash, R., O’Sullivan, J., Murphy, S., Bruen, M., Mahon, A.M., Lally, H., Heerey, L., O’Connor, J., Wang, X., Koelmans, A., & O’Connor, I. 2023. Sources, Pathways and Environmental Fate of Microplastics. EPA Research Report No. 430. Environmental Protection Agency, Ireland. ISBN: 978-1-80009-092-7.
- Osman, A.I., Hosny, M., Eltaweil, A.S., Omar, S., Elgarahy, A.M., Farghali, M., *et al.* 2023. Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review. *Environ Chem Lett* **21**: 2129–2169.
- Outhwaite, C.L., McCann, P. & Newbold, T. 2022. Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature* **605**: 97–102. Nature Publishing Group.
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D. & Wang, C. 2020. Removal of microplastics from the environment. A review. *Environ Chem Lett* **18**: 807–828.
- Palacio-Cortés, A.M., Horton, A.A., Newbold, L., Spurgeon, D., Lahive, E., Pereira, M.G., *et al.* 2022. Accumulation of nylon microplastics and polybrominated diphenyl ethers and effects on gut microbial community of *Chironomus sancticarloi*. *Science of The Total Environment* **832**: 155089.
- Parker, B., Andreou, D., Pabortsava, K., Barrow, M., Green, I.D. & Britton, J.R. 2022. Microplastic loads within riverine fishes and macroinvertebrates are not predictable from ecological or morphological characteristics. *Science of The Total Environment* **839**: 156321.
- Piccardo, M., Bertoli, M., Pastorino, P., Barceló, D., Provenza, F., Lesa, D., *et al.* 2021. Lethal and Sublethal Responses of Hydropsyche pellucidula (Insecta, Trichoptera) to Commercial Polypropylene Microplastics after Different Preconditioning Treatments. *Toxics* **9**: 256.
- Pongon, M. & Owen, A. 2020. Presence of Microplastics in Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera of North Cascades National Park. *Scholars Week*.
- Prata, J.C., da Costa, J.P., Duarte, A.C. & Rocha-Santos, T. 2019. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **110**: 150–159.

- Prata, J.C., Silva, C.J.M., Serpa, D., Soares, A.M.V.M., Gravato, C. & Patrício Silva, A.L. 2023. Mechanisms influencing the impact of microplastics on freshwater benthic invertebrates: Uptake dynamics and adverse effects on *Chironomus riparius*. *Science of The Total Environment* **859**: 160426.
- Ribeiro-Brasil, D.R.G., Brasil, L.S., Veloso, G.K.O., Matos, T.P. de, Lima, E.S. de & Dias-Silva, K. 2022. The impacts of plastics on aquatic insects. *Science of The Total Environment* **813**: 152436.
- Rodrigues, M.O., Abrantes, N., Gonçalves, F.J.M., Nogueira, H., Marques, J.C. & Gonçalves, A.M.M. 2019. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? *Environmental Toxicology and Pharmacology* **72**: 103239.
- Rodrigues, T., Prado, H., Farjalla, V. & Pires, A. n.d. The major threats to biodiversity affects freshwater ecosystems across multiple ecological levels.
- Rossatto, A., Arlindo, M.Z.F., de Moraes, M.S., de Souza, T.D. & Ogradowski, C.S. 2023. Microplastics in aquatic systems: A review of occurrence, monitoring and potential environmental risks. *Environmental Advances* **13**: 100396.
- Rozman, U. & Kalčíková, G. 2022. The Response of Duckweed Lemna minor to Microplastics and Its Potential Use as a Bioindicator of Microplastic Pollution. *Plants* **11**: 2953. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Sarijan, S., Azman, S., Said, M.I.M. & Jamal, M.H. 2021. Microplastics in freshwater ecosystems: a recent review of occurrence, analysis, potential impacts, and research needs. *Environ Sci Pollut Res* **28**: 1341–1356.
- Saud, S., Yang, A., Jiang, Z., Ning, D. & Fahad, S. 2023. New insights in to the environmental behavior and ecological toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials Advances* **10**: 100298.
- Schell, T., Martinez-Perez, S., Dafouz, R., Hurley, R., Vighi, M. & Rico, A. 2022. Effects of Polyester Fibers and Car Tire Particles on Freshwater Invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry* **41**: 1555–1567.
- Scherer, C., Weber, A., Stock, F., Vurusic, S., Egerci, H., Kochleus, C., *et al.* 2020. Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river. *Science of The Total Environment* **738**: 139866.
- Sebteoui, K., Milošević, D., Stanković, J., Baranov, V., Jovanović, B., Krause, S., *et al.* 2024. Beneath the surface: Decoding the impact of *Chironomus riparius* bioturbation on microplastic dispersion in sedimentary matrix. *Science of The Total Environment* **919**: 170844.
- Sewwandi, M., Wijesekara, H., Rajapaksha, A.U., Soysa, S. & Vithanage, M. 2023. Microplastics and plastics-associated contaminants in food and beverages; Global trends, concentrations, and human exposure. *Environmental Pollution* **317**: 120747.

- Shen, J., Liang, B. & Jin, H. 2023. The impact of microplastics on insect physiology and the indication of hormesis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **165**: 117130.
- Silva, C.J.M., Beleza, S., Campos, D., Soares, A.M.V.M., Patrício Silva, A.L., Pestana, J.L.T., *et al.* 2021a. Immune response triggered by the ingestion of polyethylene microplastics in the dipteran larvae *Chironomus riparius*. *Journal of Hazardous Materials* **414**: 125401.
- Silva, C.J.M., Patrício Silva, A.L., Campos, D., Machado, A.L., Pestana, J.L.T. & Gravato, C. 2021b. Oxidative damage and decreased aerobic energy production due to ingestion of polyethylene microplastics by *Chironomus riparius* (Diptera) larvae. *Journal of Hazardous Materials* **402**: 123775.
- Silva, C.J.M., Silva, A.L.P., Gravato, C. & Pestana, J.L.T. 2019. Ingestion of small-sized and irregularly shaped polyethylene microplastics affect *Chironomus riparius* life-history traits. *Science of The Total Environment* **672**: 862–868.
- Simon, M., van Alst, N. & Vollertsen, J. 2018. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* **142**: 1–9.
- Skawina, A., Dąbrowska, A., Bonk, A., Paterczyk, B. & Nowakowska, J. 2024. Tracking the micro- and nanoplastics in the terrestrial-freshwater food webs. Bivalves as sentinel species. *Science of The Total Environment* **917**: 170468.
- Sorensen, R.M. & Jovanović, B. 2021. From nanoplastic to microplastic: A bibliometric analysis on the presence of plastic particles in the environment. *Marine Pollution Bulletin* **163**: 111926.
- Sutkar, P.R., Gadewar, R.D. & Dhulap, V.P. 2023. Recent trends in degradation of microplastics in the environment: A state-of-the-art review. *Journal of Hazardous Materials Advances* **11**: 100343.
- Thanigaivel, S., Vickram, S., Dey, N., Jeyanthi, P., Subbaiya, R., Kim, W., *et al.* 2023. Ecological disturbances and abundance of anthropogenic pollutants in the aquatic ecosystem: Critical review of impact assessment on the aquatic animals. *Chemosphere* **313**: 137475.
- Tubić, B., Andjus, S., Zorić, K., Vasiljević, B., Jovičić, K., Čanak Atlagić, J., *et al.* 2024. Aquatic Insects (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera) Metric as an Important Tool in Water Quality Assessment in Hilly and Mountain Streams. *Water* **16**: 849. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Tumwesigye, E., Felicitas Nnadozie, C., C Akamagwuna, F., Siwe Noundou, X., William Nyakairu, G. & Odume, O.N. 2023. Microplastics as vectors of chemical contaminants and biological agents in freshwater ecosystems: Current knowledge status and future perspectives. *Environmental Pollution* **330**: 121829.



- Valentine, K., Cross, R., Cox, R., Woodmancy, G. & Boxall, A.B.A. 2022. Caddisfly Larvae are a Driver of Plastic Litter Breakdown and Microplastic Formation in Freshwater Environments. *Environmental Toxicology and Chemistry* **41**: 3058–3069.
- Varg, J.E. & Svanbäck, R. 2023. Multi stress system: Microplastics in freshwater and their effects on host microbiota. *Science of The Total Environment* **856**: 159106.
- Voshell, J.R. 2019. Sustaining America's Aquatic Biodiversity: Aquatic Insect Biodiversity and Conservation. Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech, Blacksburg, VA. CNRE-81.
- Wang, C., Zhao, J. & Xing, B. 2021. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials* **407**: 124357.
- Weinstein, J.E., Crocker, B.K. & Gray, A.D. 2016. From macroplastic to microplastic: Degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat. *Environmental Toxicology and Chemistry* **35**: 1632–1640.
- Windsor, F.M., Durance, I., Horton, A.A., Thompson, R.C., Tyler, C.R. & Ormerod, S.J. 2019a. A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Global Change Biology* **25**: 1207–1221.
- Windsor, F.M., Tilley, R.M., Tyler, C.R. & Ormerod, S.J. 2019b. Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. *Science of The Total Environment* **646**: 68–74.
- Yang, L., Gao, J., Liu, Y., Zhuang, G., Peng, X., Wu, W.-M., *et al.* 2021. Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence. *Chemosphere* **262**: 127818.
- Yıldız, D., Yalçın, G., Jovanović, B., Boukal, D.S., Vebrová, L., Riha, D., *et al.* 2022. Effects of a microplastic mixture differ across trophic levels and taxa in a freshwater food web: In situ mesocosm experiment. *Science of The Total Environment* **836**: 155407.
- Zain, N.M., Fauzi, N., Subki, N.S. & Ghazali, Z.Z. 2022. Occurrence Of Microplastics in Immature Aquatic Insects of Gua Musang Tributaries in Kelantan. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **1102**: 012047.
- Zheng, X., Wu, X., Zheng, Q., Mai, B.-X. & Qiu, R. 2023. Transfer of Microplastics in Terrestrial and Aquatic Food Webs: The Impact of E-Waste Debris and Ecological Traits. *Environ. Sci. Technol.* **57**: 1300–1308. American Chemical Society.
- Zhu, J., Wu, P., Zhao, N., Jiang, S., Zhu, H. & Jin, H. 2023. Microplastics in terrestrial insects, long-horned beetles (Coleoptera: Cerambycidae), from China. *Science of The Total Environment* **888**: 164197.