

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA PLÁNOVÁNÍ KRAJINY A SÍDEL



MIKROPLASTY V PŮDĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. JAN GREGAR

BAKALANT: HENRIETA HIPPI

2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Henrieta Hipp

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Mikroplasty v půdě

Název anglicky

Microplastics in Soil: Sources, Fate, and Environmental Impact

Cíle práce

Identifikovat a zhodnotit zdroje mikroplastů v půdě, včetně jejich původu a mechanismů transportu. Analyzovat fyzikální, chemické a biologické interakce mezi mikroplasty a půdním prostředím. Posoudit vliv mikroplastů na půdní mikroorganismy, rostliny a ekosystém jako celek. Hodnotit environmentální rizika spojená s přítomností mikroplastů v půdě a možné dopady na lidské zdraví. Navrhnout strategie a opatření pro snižování znečištění mikroplasty v půdním prostředí.

Metodika

Bude provedena rešerše dostupné literatury týkající se zdrojů mikroplastů v půdě. Zahrnuty budou studie, které se budou zabývat různými zdroji mikroplastů, jako budou odpadky z plastových výrobků, textilní vlákna, plastové hmoty používané v zemědělství nebo průmyslové činnosti.

Budou prozkoumány metody, které se používají k analýze mikroplastů v půdě. Zahrnuty budou techniky jako mikroskopie, spektroskopie, Ramanova spektroskopie, fluorescenční analýza nebo extrakce mikroplastů z půdy.

Bude studován výzkum týkající se dopadů mikroplastů na půdní ekosystém. Zahrnuty budou informace o vlivu mikroplastů na půdní mikroorganismy, půdní faunu, rostliny a půdní procesy, jako bude vodní retence, biodegradace organických látek nebo půdní struktura.

Budou provedeny přehledy studií, které se zabývají environmentálními riziky spojenými s přítomností mikroplastů v půdě. Zahrnuty budou informace o možných dopadech na biodiverzitu, šíření kontaminace do potravního řetězce a potenciálními zdravotními riziky pro člověka.

Budou prozkoumány existující postupy a opatření pro prevenci a řízení znečištění mikroplasty v půdě. Zahrnuty budou informace o opatřeních na úrovni odpadového hospodářství, legislativních opatřeních a iniciativách k omezení používání plastových materiálů a podpoře recyklace.

Doporučený rozsah práce

dle Nařízení děkana č.01/2020 – Metodické pokyny pro zpracování bakalářské práce na FŽP

Klíčová slova

mikroplasty, půda, znečištění, půdní ekosystém, environmentální rizika

Doporučené zdroje informací

- Bergmann, M., et al. (2019). "White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic." *Science Advances*, 5(8), eaax1157.
- De Souza Machado, A.A., et al. (2018). "Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems." *Global Change Biology*, 24(4), 1405-1416.
- Eriksen, M., et al. (2014). "Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea." *PLoS ONE*, 9(12), e111913.
- Horton, A.A., et al. (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.
- Horton, A.A., et al. (2020). "Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current evidence to identify the knowledge gaps and future research priorities." *Science of the Total Environment*, 721, 137544.
- Li, J., et al. (2020). "Microplastics in soil-plant system: Effects on plants and potential transfer to human health." *Science of the Total Environment*, 703, 134722.
- McCormick, A., et al. (2014). "Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river." *Environmental Science & Technology*, 48(20), 11863-11871.
- Nizzetto, L., et al. (2016). "Plastic in the environment: much more than a waste management issue – A systems approach for countries to address mismanaged plastic waste." *Environmental Science & Policy*, 56, 1-10.
- Wagner, M., et al. (2014). "Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know." *Environmental Sciences Europe*, 26(1), 12.
- Zhang, W., et al. (2019). "Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, and fate." *Environmental Pollution*, 254(Pt A), 112915.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jan Gregar

Garantující pracoviště

Katedra plánování krajiny a sídel

Elektronicky schváleno dne 5. 9. 2023

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 03. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Mikroplasty v půdě vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze 26.3.2024

.....

Poděkování

Děkuji zejména vedoucímu práce, panu inženýrovi Gregarovi, za umožnění zpracovat bakalářskou práci na dané téma pod jeho vedením, a za udělování prospěšných rad a připomínek. Dále bych ráda poděkovala svému zaměstnavateli za vstřícnost po dobu celého studia a zejména při psaní této bakalářské práce. V neposledním řadě, bych ráda poděkovala svému manželovi za trpělivost a podporu.

V Praze 26.3.2024

.....

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the issue of microplastics in soil, a growing area for research in environmental sciences. Microplastics are becoming an increasing problem in a global context. This thesis provides an exploratory review of the current state of scientific knowledge regarding the occurrence, distribution, action, and potential solutions of microplastics in soil. The aim of this work is to review the available information on the most important sources, transport, pathways, measurement, and research methodologies, impacts on human and other organisms, as well as known and proposed future solutions to this environmental problem. The results could contribute to a better understanding of this issue and serve as a starting point for further research and protection of our environment.

Key words: microplastics, soil, environment, pollution

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku mikroplastů v půdě, což je stále se rozvíjející oblast pro výzkum v oblasti environmentálních věd. Mikroplasty se stávají stále větším problémem v globálním kontextu. Tato práce poskytuje rešeršní přehled aktuálního stavu vědeckých poznatků ohledně výskytu, distribuce, působení a potenciálních řešení mikroplastů v půdě. Cílem této práce je zhodnotit dostupné informace o nejvýznamnějších zdrojích, způsobech transportu, metodikách měření a výzkumu, dopadů na lidské a jiné organismy a taky známé i do budoucna navrhované způsoby řešení tohoto environmentálního problému. Výsledky by mohly přispět k lepšímu porozumění této problematice a sloužit jako východisko pro další výzkum a ochranu našeho životního prostředí.

Klíčová slova: mikroplasty, půda, životní prostředí, znečištění

OBSAH

1. Úvod.....	1
1.1 Co jsou mikroplasty	1
1.2 Zdroje mikroplastů.....	2
1.3 Transport a způsoby šíření mikroplastů.....	3
2. Cíle práce	4
3. metody extrakce, detekce a kvantifikace	4
3.1 Odběr půdního vzorku	4
3.2 Separace a extrakce.....	5
3.2.1 Mechanická separace	5
3.2.2 Flotace – hustotní oddělování	5
3.2.3 Elektrostatická separace.....	6
3.2.4 Magnetická separace	7
3.2.5 Tlakové extrakční metody.....	7
3.2.6 Cirkulační zařízení	7
3.4 Kvantifikace.....	8
3.4.1 Optická mikroskopie.....	8
3.4.2 Vibrační spektroskopie	9
3.4.3 Terahertzová spektroskopie	11
3.4.4 Hyperspektrální spektroskopie.....	11
3.4.5 Hmotnostní spektrometrie.....	11
3.4.6 Termogravimetrická analýza (TGA).....	12
3.4.7 Identifikace in-situ	12
3.5 Závěr a shrnutí metod	12
4. Vlivy na životní prostředí	13
4.1 Vliv na vlastnosti půdy	13
4.2 Rizika pro půdní mikrobiální společenstvo	14
4.3 Rizika pro půdní živočichy	14
4.4 Rizika pro floru.....	17
4.5 Potravinový řetězec a rizika pro pozemskou faunu	18
4.6 Riziko pro lidstvo.....	21
4.6.1 Chemické vlivy	22
4.6.2 Fyzikální vlivy	22
4.6.3 Biologické vlivy.....	22
5. snížení rizik a výhledy do budoucna.....	24

5.1 Spotřebitelská opatření.....	25
5.2 Politické opatření	26
5.2.1 Evropská strategie pro plasty v oběhovém hospodářství	26
5.2.2 Plastics 2030	27
5.2.3 Zákaz prodeje jednorázových plastů.....	27
5.2.4 Rozšíření odpovědnosti výrobce (EPR).....	27
5.2.5 Podpora trhu s recyklovaným plastem	28
5.2.6 Plasty a legislativa České republiky.....	28
5.3 Technická opatření a alternativy	29
5.3.1 Omezení výroby a produkce mikroplastů	29
5.3.2 Ekodesign plastových obalů.....	29
5.3.3 Biologicky rozložitelné plasty (bioplasty)	29
5.3.4 Úprava půdy vedoucí k odstranění kontaminantů.....	30
5.3.5 Mikrobiální technologie.....	31
5.3.6 Minimalizace ztrát předvýrobních plastových pelet	31
5.3.7 Zlepšení technologie čištění odpadních vod	31
5.3.8 Úprava praček	32
6. Výsledné zhodnocení	32
7. diskuse	33
8. Závěr a přínos práce.....	35
9. Terminologický slovníček	35
10. Přehled literatury a použitých zdrojů.....	36
10.1 Odborné publikace	36
10.2 Legislativní zdroje	41
11. Seznam obrázků, tabulek a příloh	42
11.1 Seznam obrázků.....	42
11.2 Seznam tabulek	42

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PM_{2,5} – Suspendované prachové částice, znečišťující látka

g/kg – hmotnostní koncentrace látky 1 v gramech v látce 2 v kilogramech

mg/kg – hmotnostní koncentrace látky 1 v miligramech v látce 2 v kilogramech

g/cm³ – hmotnostní koncentrace látky 1 v gramech na objem látky 2 v cm³

mg/ml – hmotnostní koncentrace látky 1 v miligramech na objem látky 2 v mililitrech

w/w – z angl. weight per weight, hmotnostní koncentrace

km – kilometr, jednotka délky

cm – centimetr, jednotka délky

mm – milimetr, jednotka délky

μm – mikrometr, jednotka délky

ml – mililitr, jednotka délky

l – litr, jednotka objemu

cm³ – centimetr kubický, jednotka objemu

°C – stupeň Celsia, jednotka teploty

W – Watt, jednotka výkonu

h – hodina, jednotka času

Cu – Měď, chemický prvek

Ni – Nikl, chemický prvek

Pb – Olovo, chemický prvek

As – Arsen, chemický prvek

NaI – Jodid sodný, anorganická sloučenina

ZnCl² – Chlorid zinečnatý, anorganická sloučenina

SEM – Skenovací elektronová mikroskopie, metoda

FTIR – Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací, metoda

NIR – Blízká infračervená spektroskopie, metoda

NMR – Nukleární magnetická rezonance, metoda

TGA – Termogravimetrická analýza, metoda

PS – Polystyrén, druh plastu

PE – Polyethylen, druh plastu

PP – polypropylen, druh plastu

PET – polyethylentereftalát, druh plastu

EPS – expandovaný pěnový polystyren, druh plastu

PA – polyamid, druh polymeru
PBAT – Polybutylene adipate terephthalate, druh kopolymeru
PVC – polyvinylchlorid, druh plastu
LDPE – low density polyethylen, Polyethylen s nízkou hustotou
HDPE – high density polyethylen, polyethylen s vysokou hustotou
DNA – Deoxybonukleová kyselina, nositel genetické informace organismů
PLA – Polyaktidová vlákna, chemické textilní výrobky
Ache – Acetylcholinesteráza, degradující enzym
HBCDD – Hexabromcyklododekan, cyklická sloučenina bromu, toxická látka
PCB – Polychlorované bifenyly, syntetické, organické látky
PAH – Polycyklické aromatické uhlovodíky, skupina látek na bázi uhlíku a vodíku
BFR – Bromované zpomalovače hoření, skupina organických sloučenin bromu
RM – Malajsijský ringgit, měna státu Malajsie
Kč – Česká koruna, měna České republiky
EU – Evropská Unie, mezinárodní organizace
EU-28 – Evropská unie, kterou tvoří spolek 28 zemí

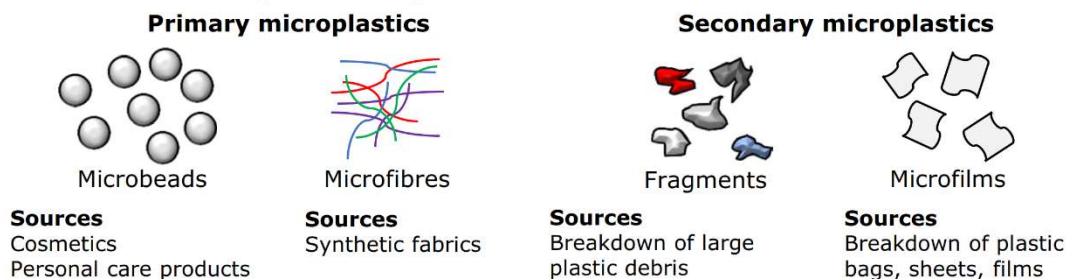
1. ÚVOD

1.1 Co jsou mikroplasty

Mikroplasty, kterým je v poslední době věnována stále větší pozornost, jsou všechny plastové částice o velikosti menší než 5 mm (Qing et al. 2020), ale větší než 0,1 μm (Helmberger et al. 2019). V porovnání s jasným velikostním zatříděním existují tvarově rozmanité druhy mikroplastů např. v podobě mikrokuliček, vláken nebo pelet z pěnové hmoty (Tirkey et Upadhyay, 2021).

Dle způsobu vzniku dělíme mikroplasty na primární a sekundární. Primární mikroplasty se týkají především plastových částic, které jsou již při výrobě produkovány v mikrometrové velikosti. Jedná se například o různé kosmetické výrobky, do kterých se přidávají plastové mirkoperličky. Dalším typem primárních mikroplastů jsou tzv. mikrovlákná, která jsou základním stavebním prvkem pro výrobu syntetických tkanin (Helmberger et al. 2019). Takový typ tkanin se v sledovaném období druhého desetiletí 21. století podílel na celosvětové spotřebě textilních materiálů až ze 2/3.¹ Sekundární mikroplasty více rozšířené než primární vznikají rozkladem a fragmentací velkoformátových plastů (Haobo et al. 2021) nebo je můžeme najít v podobě mikrofilmů z rozkládajících se sáčků, fólií a pytlů (Helmberger et al. 2019). Plasty jsou chemicky různorodé skupiny syntetických polymerních materiálů s mnohostranným využitím v moderním životním stylu (Kumar et al. 2020). Stali se jedním z nejpoužívanějších materiálů moderní doby díky nízkým nákladům na výrobu, tvarové poddajnosti a trvanlivosti (Kumar et al. 2020). Sajjad et al. (2022) uvádí statistiku, která říká, že roční produkce plastů přesáhla v roce 2017 až 348 milionů tun a dle odhadu Cincinelli et al. (2019) by se roční produkce plastů mohla do roku 2050 zvýšit až na 33 miliard tun

(a) Common microplastic shapes



obr. 1 - Tvary, zdroje a základní dělení mikroplastů (Helmberger et al, 2019)

1 – Global fiber production [online]. Chemical Fibers International, 2014

1.2 Zdroje mikroplastů

Většina studií poměrně do hloubky zkoumá zdroje a původ mikroplastů v souvislosti se znečištěním vodních prostředí, zejména mořského. Kumar et al. (2020) konstatuje, že téměř všechny mikroplasty, které nalezneme v mořském prostředí již předtím prošly prostředím půdním. Je tedy nutno příčiny generálně hledat ve zdrojích a činnostech působících v suchozemském prostředí. Z tohoto poznatku by mělo plynout, že při zamezení znečišťování půdy mikroplastovými částicemi zároveň zpomalíme další znečišťování světových oceánů.

Jedním z veřejnosti nejznámějších zdrojů, proti kterému často v médiích slyšíme o protestech aktivistů jsou částice ze syntetické pryže z opotřebovaných pneumatik především motorových vozidel. Odhaduje se, že 3-7 % z celkového objemu pevných částic ($PM_{2,5}$) v ovzduší tvoří právě tento typ plastových částic. Dalším ze zdrojů, který může ovlivnit i jedinec svým chováním ve spotřebním světě je používání výrobků osobní péče. Těmi mohou být například gely, prostředky na mytí rukou, šampony a čisticí prostředky na obličej (Manish et al. 2020).

Pokročilé zpracovávání odpadů může v tomhle směru působit na životní prostředí i negativně. Čistírny odpadních vod zcela jistě posunuli lidstvo dál, avšak zjistilo se, že kal z těchto čistíren může obsahovat až 15 385 mikroplastických částic na 1 kg kalu. Proto každé další ukládání kalu na půdu, obzvlášť tu zemědělskou, způsobuje další znečištění (Haobo et al. 2021). Početní zastoupení primárně suburbánních domácností využívá kompostování jako způsob zpracovávání bioodpadů. Toto je hromadně podporováno i dotacemi v českých obcích. Kompostování je ovšem také enormní příčinou toho, jak se mikroplasty do půdy dostávají. Vysoká teplota a mikrobiální aktivity během kompostovacích procesů urychlují fragmentaci větších plastů na mikroplasty a zvyšují tak jejich koncentraci v půdě. Objemové a hmotnostní zastoupení je ale řádově nižší než u čistírenských kalů – 1,20 g/kg (Tian et al. 2022).

Dalším menšími, ale n zanedbatelným původcem je nahrazování přírodních travnatých ploch pro sport a rekreaci těmi umělými. To může jako nepřímá příčina vyprodukovat až 2630 tun mikroplastů ročně. Spolu s tím jako další nepřímý původce působí odpadky podél silnic a nelegální i legální skládky (Haobo et al. 2021).

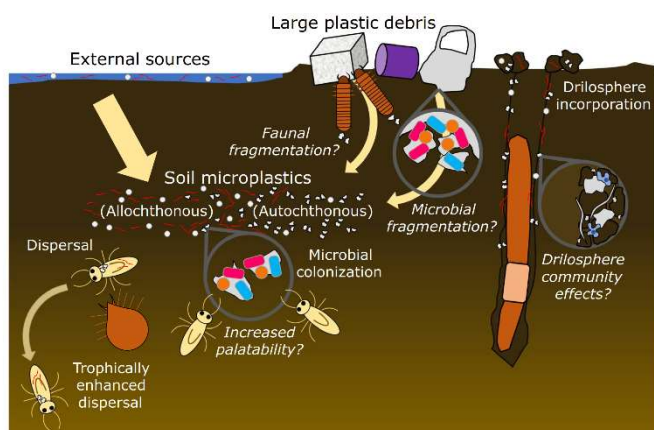
1.3 Transport a způsoby šíření mikroplastů

Jakmile se mikroplasty dostanou do půdy nebo v ní vzniknou degradací, mohou se šířit biotickými a abiotickými mechanismy (Helmberger et al. 2019). Dalším dělením způsobu transportu a šíření je pohyb horizontální a vertikální (Haobo et al. 2021). Na základě těchto poznatků je možno podrobně popsat, případně do budoucna vyzkoumat každou jednu z možností šíření.

Migraci mikroplastů v půdě může ovlivňovat mnoho faktorů, včetně vlastností půdy (např. půdní trhliny a póry), půdní bioty (např. houby, bakterie, rostliny a půdní živočichové) a lidských činností jako je zemědělství, zavlažování. Kromě vlastností půdy jakožto prostředí, ve kterém k šíření dochází, ovlivňují proces migrace i vlastnosti samotných mikroplastů. Bylo prokázáno, že mikroperličky, mikrovlákna a mikrofolie se při aglomeraci v půdě vzájemně odlišují. Kulovité a granulovité mikroplasty se s větší pravděpodobností dostanou do hlubokých půd (Haobo et al. 2021).

K šíření abiotickému a horizontálnímu můžeme s určitostí zařadit distribuci větrem, povrchovým odtokem nebo erozí půdy (Haobo et al. 2021). Dle Helmberger et al. (2019) může vítr šířit mikroplasty až na vzdálenost 95 km vzduchem. Haobo et al. (2021) dále popisuje i to, že kromě odnášení a následného opětovného usazování na půdě může dojít i k odváti a následnému setrvání částic v tzv. atmosférickém oběhu, kdy se stanou součástí tzv. pevných částic (PM_{2,5}) ve vzduchu.

Naopak k šíření biotickým a vertikálním způsobem přispívají především půdní živočichové (Tian et al. 2022). Sekundárně všichni půdní živočichové dopomáhají šíření tak, že půdní prostředí dělají víc porézní, když vytvářejí chodbičky. (Helmberger et al.



obr. 2 - Schéma různých způsobů, jak mohou půdní organismy ovlivnit výskyt mikroplastů, jejich distribuci a potenciální účinky na další půdní organismy (Helmberger et al, 2019)

2019). Kromě žížal mají schopnost přenášet a rozptylovat mikroplasty také další půdní živočichové jako roztoči a ryjící savci (Ya et al. 2022). Experiment, který provedli Maaß et al. (2017) zjistil, že mikroplasty mohou přenášet a distribuovat i půdní chvostokoci.

2. CÍLE PRÁCE

Vzhledem k malému počtu předchozích výzkumů je v současné době vliv mikroplastů v suchozemském prostředí nedostatečně prozkoumán. Z celkového počtu všech článků a výzkumů obsahujících jako klíčový termín mikroplasty, tvoří ty, které se věnují zastoupení v půdě jen 5 % (Petersen et Hubbart, 2021). Tohle tvrzení se mi potvrdilo při hledání dostupných zdrojů, které by sloužili jako relevantní podklad pro tuto rešeršní práci. Ještě horší je to s vědeckými a výzkumnými pracemi na toto téma v České republice. Cílem této práce je proto sepsat a srovnat základní informace o této problematice, popsat, jak mikroplasty vznikají a šíří se. Práce by měla také popsat různé metody, jak mikroplastické částice zkoumat a tím vytvořit i jednoduchý návod pro další výzkumy. Cílem je i zachytit všechny možné negativní dopady na lidské a ostatní organismy a celkový dopad na životní prostředí, což je jeden z důvodů, proč se toto téma i ve velkém začalo řešit. Na konec seřadit a popsat všechny dosud známe výsledky a připravit je k porovnání pro budoucí zkoumání. Ze všech těchto poznatků by měl plynout závěr, kde budou sepsané všechny existující, ale i mnou navrhované způsoby všech možných opatření na omezování znečišťování půdy mikroplastickými částicemi.

3. METODY EXTRAKCE, DETEKCE A KVANTIFIKACE

Analýza kontaminace mikroplastů v půdě se provádí v několika krocích, které můžeme jednoduše pojmenovat a seřadit v jejich časové posloupnosti od odběru půdního vzorku, následné separace přes extrakci až po konečnou kvantifikaci. (Kasa et al. 2022).

3.1 Odběr půdního vzorku

Špatné metody agregace a nedostatečně homogenizovaný postup jsou hlavními zdroji chyb při kvantifikaci mikroplastů. Mezi kritické parametry variability při odběru a extrakci patří hloubka a poloha vzorkování, počet opakovaných extrakcí a doba usazování. Všechny tyto parametry se liší v závislosti na lokalitě a podmínkách prostředí (Debraj et Lavanya, 2023). Půda je trojrozměrné médium, a proto je důležité odebírat vzorky půdy v různých hloubkách (Perez et al. 2022). Oblast odběru vzorků a postupy odběrů je nutno zdokumentovat pomocí terénních poznámek a fotografií. Hloubka odběru vzorků by měla být definována a priori a měla by odrážet půdní profil a způsoby hospodaření v něm, jako je orba. Například německá spolková vyhláška o ochraně půdy a kontaminovaných místech stanovuje pro zemědělská pole minimální hloubku vzorků 30 cm. Přesto většina zemědělských screeningových studií pracovala se vzorky pouze svrchní vrstvy do hloubky 5 cm (Thomas et al. 2020).

3.2 Separace a extrakce

Po odběru vzorku následuje separační krok k odstranění ulpívajících hrubých částic a organických látek z matric vzorku. Tento krok je rovněž náročný, protože půdní částice mají tendenci vyvářet relativně stabilní agregáty, což omezuje jejich analýzu (Kasa et al. 2022).

3.2.1 Mechanická separace

Vizuální třídění a prosévání je ideální, pohodlná a nenákladná metoda pro odstranění rostlinné hmoty, písku, šterku a organické hmoty (Turkey et Upadhayay, 2021). Plasty se často oddělují pomocí sít o velikosti ok od 0,038 do 4,75 mm. Tato oka pomáhají rozlišit mikroplasty od malých makroplastů a vytvořit kategorizaci na základě jejich velikosti. Další hrubou metodou je vizuální třídění, při němž se zkoumají nasbírané sedimenty, nečistoty a plasty volným okem nebo pomocí mikroskopu (Debraj et Lavanya, 2023).

Manuální separace obsahuje i techniku sušení, při níž se vzorky půdy suší přirozenou cestou nebo v sušárně. Některé studie však naznačují, že sušení v sušárně při teplotě 40-70 °C jako rychlejší alternativa, může tepelně deformovat mikroplasty v důsledku působení zvýšené teploty. Jakmile je dokončeno sušení, lze zahájit ruční třídění, při němž se vyloučí biogenní a minerální látky ve vzorku. Tato metoda však může být extrémně pracná a časově náročná. Další její nevýhodou je, že nedokáže plně detekovat částice o velikosti <500 μm, což vede k chybné identifikaci (Kasa et al. 2022).

Grause et al (2022) se ve své studii zaměřili na mechanické vytěžení mikropplastů z půdy pomocí centrifugace. Tento způsob zkombinovali s fentonovou oxidací k odstranění biologického materiálu. Závěrem je účinná metoda separace pomocí centrifugace při 3700 otáčkách za minutu při celkovém čase 10 minut. Všechny pokusy skončily s výsledkem výtěžnosti víc než 95 % hmotnosti plastů.

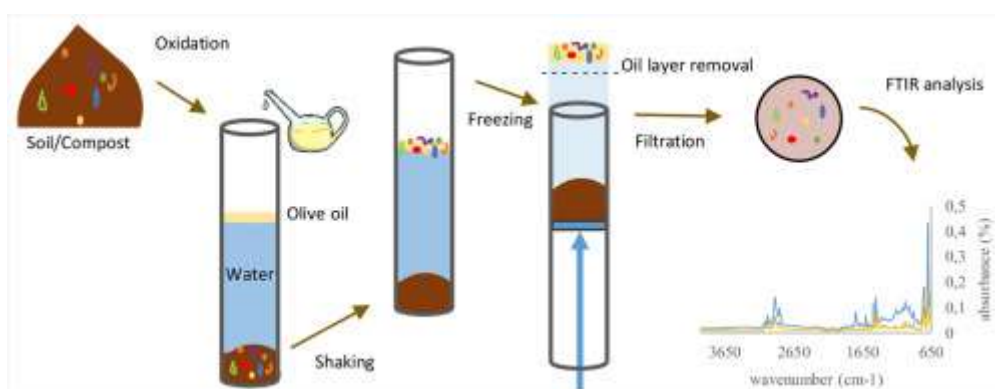
3.2.2 Flotace – hustotní oddělování

Flotace se používá k oddělení plastů od hustšího sedimentu. Při typické separaci plastů na základě hustoty hmot se používají roztoky solí, aby na plastové částice působil vztlak. Výběr solí závisí na nákladech a dopadech na životní prostředí. Plasty se vznesou (flotují) na povrch pasivně nebo pomocí elutriace (řízený tok tekutiny) (Nguyen et al. 2019). Přestože je metoda hustotní flotace snadná a pohodlná, má svá omezení. Je třeba vhodně zvolit sůl, aby bylo dosaženo správné hustoty roztoku pro separaci co největšího množství plastů (Debraj et Lavanya, 2023).

Byla také vyvinuta levná a proveditelná metoda extrakce flotací s použitím destilované vody místo solného roztoku. V této variantě dosáhneme výtěžitelnost 90 % (Kumar et al. 2020). Tuto variantu prakticky odzkoušeli i Zhang et al. (2018). Do odebraného vzorku půdy (10g) přidali 50 ml destilované vody a směs ručně míchali skleněnou tyčkou. Po usazení pevných částic a dalších nečistot byly vzorky vylity a přefiltrovány pomocí filtračního papíru. Postup se opakoval do momentu, kdy se neobjevil žádný materiál plovoucí na hladině. Nakonec prošly vzorky ještě 2 hodinami ultrazvukových vibrací. Výsledkem je, že regresní koeficienty výtěžitelnosti byly vyšší než 98,5 % s nutností trojnásobné flotace, kdy čtvrtá flotace výsledek neměnila.

Další výzkumy navrhují, že extrakční roztok bude účinný pro rozsah hustoty 1,6-1,8 g/cm³, což je dosažitelné použitím NaI nebo ZnCl₂ spolu s přidavkem roztoku kyseliny. Tyto roztoky však nejsou šetrné k životnímu prostředí. Kyselý roztok taky může změnit charakteristiku mikroplastů ve vzorcích půdy.

Jedním z inovativních řešení hustotního oddělování je přidávání olejů do destilované vody. Mechanismus extrakce na bázi oleje se opírá o oleofilní vlastnosti plastů, což naznačuje, že interakce mezi dlouhými řetězci mastných kyselin oleje a páteří polymeru je dostatečně silná, aby extrahovala husté polymery do olejové vrstvy. K tomuto můžeme využívat ricinové, olivové nebo řepkové oleje. Extrakční metody na bázi oleje jsou přímočaré a účinné z hlediska času, nákladů a zdravotních či environmentálních rizik, protože nejsou potřeba žádné nebezpečné roztoky solí (Perez et al. 2022).



obr. 3 - Schema postupu extrakce mikroplastů s použitím olivového oleje (Scopetani et al. 2020)

3.2.3 Elektrostatická separace

Metoda umožňuje poměrně vysokou úspěšnost se ztrátou hmotnosti vzorku až 99 % a výtěžností 90-100 % pro částice mikroplastů od 63 μm do 5 mm. K dosažení takové velké výtěžnosti je však nutno postup opakovat třikrát s časovou náročností cca 3-4 h na 150 g vzorku. Výhodou je, že metoda je nezávislá na obsahu organických látek, hustotě částic, jejich tvaru, stáří nebo

biologickém znečištění. Velkou brzdou v masovém zavedení metody je nemožnost použití pro vlhké vzorky (Möller et al. 2020).

3.2.4 Magnetická separace

Magnetická separace využívá funkcionalizované nanočástice železa s hydrofobním chvostem, které se vážou na povrch mikroplastů a dočasně je magnetizují. Tyto mikroplasty pak lze snadno extrahovat. Magnetické sorbenty se ukázaly jako účinné při removalenci mikroplastů, nejsou však ani nákladově efektivní, ani šetrné k životnímu prostředí (Debraj et Lavanya, 2023). Möller et al. (2020) upozorňují na neúčinnost metody u vzorků, kde se nachází starší mikroplasty, které jsou náchylné na fragmentaci.

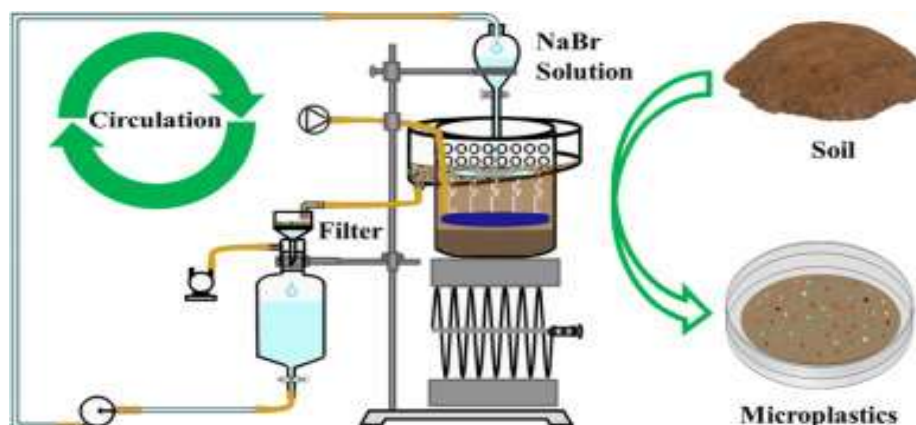
3.2.5 Tlakové extrakční metody

Metoda extrakce tlakovou kapalinou, označována i jako PFE používá rozpouštědla při podkritické teplotě a tlaku k získání organických znečišťujících látek ze vzorku. Tato extrakční metoda se ukázala jako jednoduchá, rychlá a levná s potenciálem být využívána i jako plně automatizovaná (Perez et al. 2022).

3.2.6 Cirkulační zařízení

Liu et al. (2019) sestrojili cirkulační zařízení jako novou metodu extrakce pevných a plastických částic ze vzorků půdy jako ekonomičtější, efektivnější variantu k flotaci nebo elektrostatické disociaci. Zařízení se skládá ze tří částí, tj. separačního systému, vakuového filtračního systému a systému cirkulace roztoku. Zařízení dokáže pracovat se vzorky v hmotnostech 50–200 g. Vzorky půdy jsou v separátoru smíchány s roztokem soli a po 2 hodinách stání usazeny. Po usazení půdy je zapnuto provzdušňovací čerpadlo a postupně je přidáván roztok soli. V důsledku zvyšující se hladiny kapaliny a provzdušňování kapaliny se mikroplasty vznášejí na horním povrchu separátoru. Dvěma řadami otvorů o průměru 5 mm jsou přetékající roztoky obsahující mikroplasty průběžně zachycovány šikmou vaničkou ve vnější části separátoru a poté filtrovány vakuovým filtračním systémem. Mikroplasty zůstanou zachyceny na filtračním papíře pro další pozorování a identifikaci. Dle experimentu je toto zařízení efektivnější časově, ekonomicky i s ohledem k životnímu prostředí, protože dokáže pracovat s roztokem NaBr, který sice může ovlivňovat mikrobiální aktivitu v půdě, avšak není toxický pro člověka. Cenově je NaBr dostupnější než jiné roztoky. Výzkum neuvádí procentuální vyjádření

vytěžitelnosti mikroplastických částic, avšak dle závěrů je na lepších hodnotách než všechny ostatní metody.



obr. 4- Schéma zařízení pro cirkulační separaci mikroplastů z půdy (Liu et al. 2019)

3.4 Kvantifikace

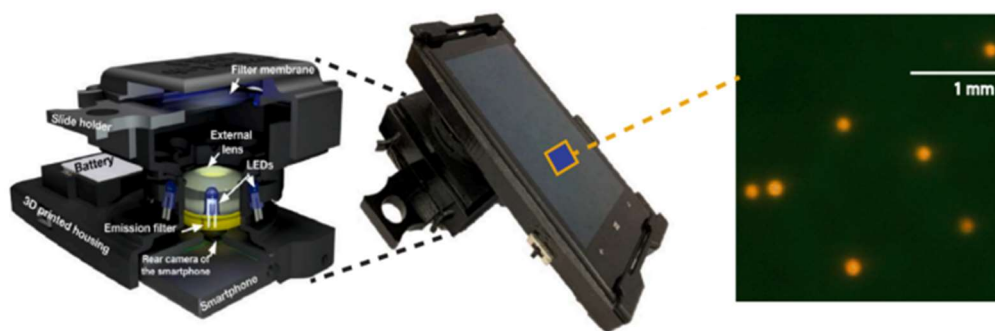
Posledním, ne však nejméně důležitým krokem procesu je identifikace a kvantifikace. Identifikace se provádí zaznamenáním velikosti, tvaru a barvy (Kasa et al. 2022). Kvantitativní množství mikroplastů je zvláště důležité, protože tato hodnota odráží i skutečnou úroveň znečištění zkoumané oblasti (Lv et al. 2021).

3.4.1 Optická mikroskopie

Vizuální pozorování obsahuje pozorování volným okem nebo za pomoci mikroskopu (Lv et al. 2021). Vizuální metoda je časově náročný proces s 20-70 % chybovostí, protože závisí na individuální analýze. Kromě toho může být příčinou špatného výsledku také kvalita a chybovost mikroskopu. Za účelem zlepšení vizuální metody bylo vyvinuto několik pomocných mikroskopických technik, mezi které patří skenovací elektronová mikroskopie (SEM), test barvení nilskou červení a test horkou jehlou. Z navrhovaných technik využívá SEM sekundární elektrony k lokalizaci morfologie povrchu objektu a může rychle snímat objekty menší než 200 nm, ale je nákladným nástrojem pro identifikaci vzorku. Naproti tomu technika horké jehly využívá termoplastické povahy plastů, která porovnává fotografie pořízené před a po tepelném zpracování, ale může vést k degradaci vzorku právě tepelným zpracováním. Podobně slibně to vypadá s technikou barvení nilskou červení. Tato technika však může vést k obarvení jiných nedůležitých organických látek přítomných ve vzorku a tím pádem ke kvantifikačním nepřesnostem (Kasa et al. 2022).

Kvantifikace fluorescenčním mikroskopem na bázi chytrého telefonu

Metoda zahrnuje izolaci mikroplastů pomocí hustotní separace a vakuové filtrace, obarvení izolovaných plastových polymerů niiskou červení a kvantifikaci mikroplastů o velikosti pouhých 10 μm pomocí fluorescenčního mikroskopu na bázi chytrého telefonu s opticko-mechanickým nástavcem. Kvantifikace pomocí chytrého telefonu s využitím algoritmu eliminuje časově náročné rozkladné kroky a ruční počítání, čímž umožňuje kvantifikovat koncentraci mikroplastů ve vzorcích životního prostředí během hodin. Metoda úspěšně detekovala širokou škálu plastových polymerů, ale často bylo nutné provést krok ředění, pokud vzorky obsahovaly vysoké koncentrace neplastových zbytků, aby se minimalizovalo optické překrývání nebo blokování. Tato metoda by mohla sloužit jako počáteční hodnotící nástroj pro rychlou kvantifikaci mikroplastů v životním prostředí v odlehlých místech s omezeným přístupem (Leonard et al. 2022).



obr. 5 - 3D vykreslení opticko-mechanického nástavce pro chytré telefony a jeho součástí používaných k pořizování mikroskopických snímků s příkladem snímku pořízeného tímto přístrojem (Leonard et al. 2022)

3.4.2 Vibrační spektroskopie

Vibrační spektroskopie ve spojení s optickou mikroskopií může poskytnout jak vizuální informace, tak informace o složení plastových částic. Získaný signál však závisí na velikosti analyzovaných částic a obvykle je zapotřebí dobře separovaný vzorek (Nguyen et al. 2019). Tyto metody jsou nedestruktivní, vyžadují minimální množství vzorku a poskytují další informace týkající se distribuce velikosti částic vzorků. Pro získání ucelených výsledků je však nutné tyto metody kombinovat s dalšími technikami (Penalver et al. 2020). K nevýhodám spektroskopických metod náleží drahé zařízení, požadavek na specializované pracovníky a obvykle dlouhé časové nároky na analýzu. Také vyžadují vývoj a použití automatizovaných metod (Mansa et Zou, 2021).

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)

K identifikaci mikroplastů v prostředí se běžně používá infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací, která poskytuje možnost přesně identifikovat částice plastových polymerů na základě jejich charakteristických infračervených spekter. Tato metoda však nedokáže identifikovat nepravidelné mikroplasty (Lv et al. 2021).

Metoda vyžaduje, aby vzorek před analýzou ležel na plochem filtračním kotouči. Je však nemožné jediným záběrem pojmout celý vzorek, a proto se vybírají konkrétní oblasti zájmu. Ruční výběr oblastí zájmu je však extrémně náchylný k chybám. Proto se využívá automatizovaných postupů jako například mikrospektrometr s ohniskovou rovinou (FPA), kde mřížka detekovaných prvků umožňuje chemické mapování větších ploch. Nicméně i při použití FTIR s DPA může pořízení snímku na jednom 47 mm filtru trvat až 10 hodin. Další problémy jsou spojeny s citlivostí na interference vody, oxidu uhličitého a zakrytí jílovými částicemi, což vyžaduje důsledné odstranění matrice při přípravě vzorku. Ačkoliv jsou teda tato měření klíčová pro stanovení morfologie vzorků, jejich časová náročnost může stále omezovat použitelnost pro analýzu mikroplastů v půdě, zejména pro screeningové a monitorovací metody (Thomas et al. 2020).

Blízká infračervená spektroskopie (NIR)

Zatímco jiné techniky vibrační spektroskopie zahrnují spektrální rozsah $600\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ a znamenávají převážně dobře rozlišitelné základní molekulární vibrace, NIR vyplňuje mezeru mezi nimi a UV částí elektromagnetického spektra, od 4000 do 15000 cm^{-1} . NIR spektrum teda dokáže zkoumat i jiné než základní vibrace. Spektrální vyhodnocení ve smyslu interpretace molekulových struktur je obecně špatné, avšak pokud jde o klasifikační úlohy nebo kvantitativní analýzy, je NIR v kombinaci s chemometrickými metodami mocným nástrojem. Může proniknout hlouběji do zkoumaných částic a tím pádem zvládnout větší objemy vzorků než FTIR. Tato metoda se například používá pro automatizované třídění plastového odpadu, kterého základů je možno vycházet při nastavení kvantifikace a kvalifikace mikroplastů ve vzorcích půdy nebo jiných prostředí (Paul et al. 2019).

Ramanova spektroskopie

Princip této spektroskopické metody spočívá v Ramanově rozptylu, což je jev, kdy monochromatické světlo interaguje s molekulami a následně dochází k rozptylu světla na jiné frekvence. Tento jev vytváří charakteristické Ramanovo spektrum. Ve srovnání s FTIR má vyšší rozlišení a dokáže rychle identifikovat plasty o velikosti menší než 500 nm s lepší efficientností a není ovlivněna velikostí, tvarem a tloušťkou částic. Hlavní nevýhodou je nemožnost použití pro

fluorescenční částice a taky pořizovací cena přístroje sloužícího k uplatnění této metody (Kasa et al. 2022).

Nukleární magnetická rezonance (NMR)

Tato metoda na základě absorpce radiofrekvenčního záření vzorkem umístěným v silném magnetickém poli poskytuje informace o struktuře zkoumané látky (Moravec, 2023). NMR může dosáhnout přesné kvantifikace a vysoké kvantitativní přesnosti více než 98 %. Při této metodě je nutné rozpouštění mikroplastů ve vhodném deuterovaném rozpouštědle (Aceton, Acetonitril, benzen, chloroform, ... (pozn. autora)) (Tirkey et Upadhayay, 2021).

3.4.3 Terahertzová spektroskopie

Kromě NIR pásma je možné analyzovat půdu a charakterizovat plasty i v dalším spektru elektromagnetického záření, a to v terahertzových pásmech. Na rozdíl od vibrační spektroskopie by mohlo terahertzové zařízení pronikat do pevných vzorků a díky jedinečné penetrační vlastnosti vyvolat změny v rotačních, translačních a vibračních stavech molekul (Zhao et al. 2022). Tento postup se již dlouho používá při samotné výrobě polymerů pro sledování kvality. Nedávno bylo prokázáno, že je možno ho naopak využít i na konci využitelnosti polymerů při zjišťování koncentrace mikroplastických částic v půdním prostředí (Zhao et al. 2022).

Zhao et al. (2022) porovnávali metodu terahertzové spektroskopie s NIR, kde dospěli k výsledku, že je vhodná na rychlou kvantifikaci s přesností podobnou jako NIR, avšak je nutné ji dále testovat i na jiných typech půdy a plastů. Výsledky totiž platí jen pro PVC a PS.

3.4.4 Hyperspektrální spektroskopie

Hyperspektrální zobrazování obsahuje desítky až stovky úzkých spektrálních pásem od viditelné po infračervenou oblast a desítky tisíc prostorových pixelů. Vzhledem k tomu je možné identifikovat chemické sloučeniny každého prostorového pixelu podle jejich spektrální informace. Zobrazování používá CCD kameru v kombinaci s digitálně řízeným panorámováním pro pořízení snímků. Systém je přenosný a použitelný pro odběr půdních vzorků v terénu. Při pořizování snímku je jako zdroj světla použitý wolframhalogen o výkonu 250 W. Kalibrace snímků je prováděna pomocí teflonového panelu s odrazivostí 99 %. Přestože technologie hyperspektrálního zobrazování prokázala potenciál detekovat mikroplasty bez oddělení od půdy, studovány byly prozatím jen plasty na povrchu (Shan et al. 2018).

3.4.5 Hmotnostní spektrometrie

Tato metoda je vhodná ke kvalitní identifikaci směsi plastových částic. Některé konfigurace umožňují i kvantifikaci, i když spíše v relativních množstvích než v diskrétních počtech částic.

Na principech hmotnostní spektroskopie funguje například termická disorpce nebo pyrolýza spojená s plynovou chromatografií. (Nguyen et al. 2019).

Pyrolyzní plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií

Tato metoda (Py-GC-MS) je považována za slibnou techniku pro identifikaci a kvantifikaci díky své schopnosti analyzovat vzorky bez nutnosti jejich předúpravy (Mansa et Zou, 2021). Tato metoda umožňuje kvantifikaci v půdách, ale i v jiných sedimentech či kalech z čistíren odpadních vod za méně než 7 hodin. Je třeba podotknout, že metoda není schopna určit počet a velikost částic, a tak je nutné ji považovat za metodu doplňkovou k jiným, jako například Ramanově spektroskopii nebo FTIR. Je vhodná na použití na rychlou screeningovou analýzu před tou další, podrobnou (Dierkes et al. 2019).

3.4.6 Termogravimetrická analýza (TGA)

V zásadě se TGA liší od ostatních metod tím, že zahrnuje měření úbytku hmotnosti vzorku při jeho zahřívání řízenou rychlostí. Obecně jsou s TGA spojeny výhody jako je snadnost, rychlost a schopnost přizpůsobit se různým velikostem vzorku. V porovnání s mikroskopickými metodami chybí destruktivním metodám termické analýzy možnost určit distribuci velikosti, protože většina mikroplastů se před pyrolýzou roztaví. (Mansa et Zou, 2021).

3.4.7 Identifikace in-situ

Momentálně nejvíc zkoumanou metodou je možnost nedestruktivní identifikace plastů na místě bez nutnosti celého procesu odebrání vzorků a separace. Metoda kombinuje spektroskopii v blízké infračervené oblasti (NIR) s chemometrií. Blízké infračervené záření může proniknout hlouběji než střední infračervené záření, což umožňuje analýzu částic, i když jsou pokryty silným biofilmem. Metoda obecně není citlivá na vodu. Momentálními omezujícími faktory metody jsou vysoká nepřesnost a nedostatečný objem dosavadních výzkumů, podle kterých by se přístroje nastavily na jednotlivé typy půd. Kromě toho je uvedena pouze koncentrace bez znalosti konkrétních typů, velikostí nebo tvarů částic polymerů (Möller et al. 2020).

3.5 Závěr a shrnutí metod

Půda je komplexní a heterogenní médium, což činí identifikaci mikroplastů z ní velmi náročnou disciplínou. Ačkoliv bylo zavedeno několik analytických metod, které prokazatelně mají svoje výhody, univerzální, účinná, rychlá a levná analytická metoda stále není k dispozici. Absence standardizovaných metod navíc ztěžuje hodnocení kontaminace půdy mikroplasty kvůli různému rozptylu chybovosti v jednotlivých metodách.

4. VLIVY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Vzhledem k obavám mnoha výzkumníků z rizik, která mikroplasty představují ve vodním prostředí, se některé studie zaměřily také na ekologická rizika mikroplastů pro půdní ekosystém (Li et al. 2020). Jejich vysokou koncentraci nelze zanedbat, protože je potenciální hrozbou pro životní prostředí, neboť mění vlastnosti půdy, ovlivňují mikrobiální aktivitu půdy, ničí půdní faunu a ovlivňují růst rostlin (Sajjad et al. 2022). Obecně platí, že mikroplasty obsahují velké množství škodlivých látek, jako jsou plniva, retardéry hoření, antioxidanty, změkčovadla a barviva (Zhang et al. 2022).

4.1 Vliv na vlastnosti půdy

Výsledky vícero studií ukázaly, že mikroplasty ovlivňují objemovou hmotnost, schopnost zadržovat vodu a vodostálé agregáty půdy. Různé mikroplasty však měly na tyto ukazovatele odlišný vliv. Například půdy kontaminované polystyrenovými vlákny vykazovaly výrazný pokles objemové hmotnosti a vodostálých agregátů se zvyšující se koncentrací polyesteru, zatímco žádný z ostatních druhů plastů tento jev nevyvolal (Li et al. 2020).

Mikrovlákna mohou také vyplňovat prostory půdních mikropórů, což jim dovoluje jejich lineární tvar. Tato vlastnost jim umožňuje na sebe lépe navazovat částice půdy a tím tvořit větší ucelené hrudky, které vytvářejí makropóry. Tyto nově vzniklé makropóry jsou vstupním faktorem pro další eroze půdních systémů (Li et al. 2020).

Rillig (2018) dále tvrdí, že mikroplasty skrytě pomáhají ukládání uhlíku v půdě, protože uhlík je prvkem, který se v plastech nachází ve většinovém zastoupení (například u PS nebo PE obsah až 90 %).

Wan et al. (2019) uvádějí, že přítomnost mikroplastů v půdě může způsobit pokles její vlhkosti až o 1 %, což je zásadní změna pro složení typů mikroorganismů v půdě.

Hüffer et al. (2019) studovali dopady mikroplastů PE na transport atrazinu a kyseliny máselné v půdě. Jejich výsledky naznačují, že přítomnost mikroplastů v půdách může zvýšit mobilitu organických kontaminantů snížením sorpční kapacity přírodních půd. V důsledku toho mohou tyto organické kontaminanty pronikat do podzemních vod nebo jiných okolních vodních zdrojů a následně představovat velké nebezpečí pro člověka.

Dalším potenciálně negativním vlivem je změna klimatu půdy zvyšováním teploty. Plasty interagují se slunečním zářením díky své sorpční schopnosti, odrazivosti a propustnosti. Vzhledem k těmto vlastnostem mohou přímo ovlivňovat mikroklima v kořenové zóně. Vyšší teploty půdy zvyšují aktivitu a populace půdních mikroorganismů, dostupnost a příjem živin kořeny

a urychlují klíčení a růst sazenic. To by však bylo prospěšné pouze v chladných klimatech. Zahřívací vlastnosti mohou také způsobit vážné problémy rostlinám. Zvýšená teplota mikroklimatu v půdě může podporovat výpar a ztráty vody (Khalid et al. 2020).

4.2 Rizika pro půdní mikrobiální společenstvo

Mikroorganismy nebo mikroby je třída živých bytostí, která je extrémně malá, má specifickou strukturu a je snadno kultivovatelná. Hromadění mikroplastů v půdě může narušit mikrobiální aktivitu, protože mikroplasty absorbují na svém povrchu škodlivé kontaminanty, jako jsou toxické ionty kovů a hydrofobní organické polutanty. Různé výzkumy dokázaly, že povrch mikroplastů může být hostinným prostředím pro různé kolonie mikroorganismů, například bakterie rodu *Vibrio*. V důsledku toho mohou mikroplasty působit jako přenosné médium a podporovat další přenos mikrobů do tkání a orgánů rostlin a živočichů. Tenhle přenos může způsobit poškození organických tkání, které může vyústit až v infekci, nebo například změnu střevního mikrobiomu u organismů jako je chvostoskok *Folsomia Candida* (Sajjad et al. 2022). De Tender et al. (2015) prokázali, že bakteriální populace nacházející se na povrchu mikroplastů se liší od bakteriální populace nacházející se v přilehlém prostředí. Přesné mechanismy škodlivých vlivů a dalšího poškození však nejsou stále známy a jsou vhodným tématem na další zkoumání.

4.3 Rizika pro půdní živočichy

Půdní fauna je důležitým rezervoárem biologické rozmanitosti a hraje zásadní roli v půdních ekosystémech. Přítomnost mikroplastů má přímý i nepřímý vliv na půdní faunu, což bylo prokázáno v předchozích studiích (viz tabulka 1).

Mikroplasty v půdě mohou být konzumovány půdními organismy, což má různé fyziologické účinky na jejich růst, vývoj, reprodukci, imunitní systém, a dokonce i na střevní mikroflóru (Sajjad et al. 2022).

Žížaly jsou převládajícími bezobratlými živočichy v půdním prostředí a jsou zodpovědné za řadu životně důležitých funkcí, jako je recyklace živin, rozklad organické hmoty a přetváření půdní struktury. Vzhledem k tomu, že jsou žížaly citlivé na řadu půdních kontaminantů, jako jsou toxické kovy, polychlorované bifenylly a pesticidy, jsou uváděny jako důležití modelové bezobratlí v toxikologických testech (Sajjad et al. 2022). Mohou zlepšovat úrodnost půdy a proto jsou často považovány za „ekosystémové inženýry“ a používají se jako indikátory zdraví půdy (Wang et al. 2022). Huerta Lwanga et al. (2016) studovali přežívání žížaly (*Lumbricus terrestris*) vystavené mikroplastům z LDPE (<400 μm) v písčité půdě v různých

koncentracích (0,7,28,45,60 %). Zjistili, že malé plastové částice (<50 µm) mohou žížaly snadno požít. Mortalita oproti kontrolní skupině v nezamořené půdě lineárně stoupala se stoupající koncentrací. Rychlost růstu byla výrazně omezena při vysokých koncentracích (> 28 %). Je třeba poznamenat, že koncentrace mikroplastů použitých ve studii byla velmi vysoká a že se s ní v reálném životě nepotkáme a tím pádem její závěry nemusí být vhodné ke zkoumání. Další studie prokázaly, že mikroplasty nemají vliv na mortalitu a růst žížal při menších koncentracích (< 20 %) (Rodriguez-Seijo et al. 2017; Wang et al. 2019). Avšak histopatologické a imunogenní reakce již byly potvrzeny. Například Rodriguez-Seijo et al. (2017) uvedli, že PE pelety způsobily poškození tkání a imunitního systému žížal. Hlístice jsou nejhojnějšími metazoany v půdě a významně přispívají k rozkladným procesům (Wang et al. 2022).

tab. 1 - Nepříznivé účinky mikroplastů na půdní živočichy (Zhang Y. et al. 2022)

Druh živočicha	Druh a tvar mikroplastů	Velikost mikroplastů	Koncentrace	Efekty
Chvostokoci	PE kuličky	<50–500 µm	0,005-1 % (w/w)	Zjevně vyhýbavé chování
	Částice PVC	80–300 µm	1 g/kg	Výrazný pokles rozmnožování a růstu
	PS, PE kuličky	0,47-200 µm	4-1000 mg/kg	Inhibice pohybu
	Fragmenty PE	2-66 µm	10 mg/120mL	
Žížaly	HDPE, PP částice	13-25 µm	0,25 % (w/w)	Požítí mikroplastů bez narušení střevní mikrobioty
	PE	30 a 100 µm	0,1-10 % (w/w)	Zvýšená přítomnost kovů (Cu, Ni)
	PE	<300 µm	0-30 % (w/w)	Histopatologické změny a poškození DNA
	Částice PE	100–200 µm	0-200 tis částic/kg	Změna AChE
	Částice LDPE	<400 µm	0,1-1,5 g/kg	Inhibice AChE, neurotoxicita, poškození kůže, zvýšená mortalita a snížený růst
	Kusy PE	550-1000 µm	0,25 % (w/w)	Kombinace oxidačního stresu a účinků atrazinu
	Mikroplasty	40-50 µm	300 s 3000 g/kg	Silná bioakumulace difulinu
	PE koule	180–300 µm	1000 mg/kg	Poškození reprodukčních orgánů
	PS	0,1-100 µm	10 mg/kg	Zvýšená akumulace fenantrenu
	Částice PEP, PS, PET, LDPE	250 µm	2,5-7 % (w/w)	Poškození sliznice
	EPS	<2000 µm	0,25 % (w/w)	Kumulované HBCDD

Druh živočicha	Druh a tvar mikroplastů	Velikost mikroplastů	Koncentrace	Efekty
	Nylon, PVC	částice 13-18 a 90-150 μm	2-12 % (w/w)	Větší nebezpečí tvoření menších mikroplastů
	HDPE, PVC	PLA, 0,48 – 316 μm	0,1 % (w/w)	Snížená tělesná hmotnost
	Částice PE, PS	/	2000 mg/kg	Výrazně snížená akumulace As
Hlístice	PS	1,002 \pm 0,005 mm	0,1 – 100 $\mu\text{g/kg}$	Transgenerační neurotoxicita a oxidační stres
	PA, PE, PP, PVS a PS	0,1-70 μm	0,5 – 10 mg/m ²	Inhibice reprodukce a oxidační stres
	Částice PS	0,1-5 μm	1 mg/l	Lokomoční toxicita
	PS korálky	1 a 6 μm	5x 10 ⁻⁷ – 5x 10 ⁻⁸ ku-liček /ml	Výrazně potlačený příjem potravy
	HDPE	0–68 μm	2,21 x 10 ⁵ – 16,9 x 10 ⁵ částic /ml	Ovlivnění transformačního růstu beta
	PS	1 a 5 μm	10 ⁷ -10 ⁹ částic/m ²	Akumulace pS
	LDPE PLA/PBAT	57 a 40 μm	1-100 mg/l	Inhibice reprodukce
	PS korálky	0,1 – 10 μm	0,04-12,5 mg/l	Inhibice příjmu potravy
	Částice PS	42 a 530 nm	0,01-100 $\mu\text{g/kg}$	Toxicita větších částic
	Částice PS	1 μm	0,1-100 $\mu\text{g/l}$	Oxidační stres, akumulace lipofuscinu a střevní bariéra
Stínka obecná	PET vlákna	12-2870 μm	0,05 – 1,5 % (w/w)	Snížená biologická dostupnost chlorpyrofify
	LDPE	39,8 a 205 μm	0,2 – 15 g/kg	Rozdílné subletální reakce při expozici recyklovanému LDPE ve srovnání s primárním LDPE
	PET vlákna	12 μm – 2,8 mm a 4-24 mm	0,02 – 1,5 % (w/w)	Změny v objemu požívání
Šnek	PET	1257,8 a 76,3 μm	0,01 – 0,71 g/kg	Snížený příjem potravy a vylučování plžů, významné poškození klků ve střevních stěnách
	Částice PET	12,6-1065 μm	1 a 10 % (w/w)	Znační změny v růstu
	EPS	1,343 \pm 0,625 mm	/	Biodegradace mikroplastů

4.4 Rizika pro floru

Pochopení vlivu mikroplastů na růst rostlin a rostlinnou produkci má pro zemědělský systém zásadní význam a může se týkat i lidského zdraví v případě, že se kontaminanty dostanou do potravinového řetězce. Plasty obsahují různé perzistentní a bioakumulativní chemické přísady, které mohou mít širokou škálu škodlivých účinků na rostliny. Posouzení jejich ekotoxicity však není ovlivněno pouze typem, velikostí a tvarem polymeru, ale také množstvím, složením a koncentrací chemických přísad, které obsahují (Zhang Z. et al. 2022).

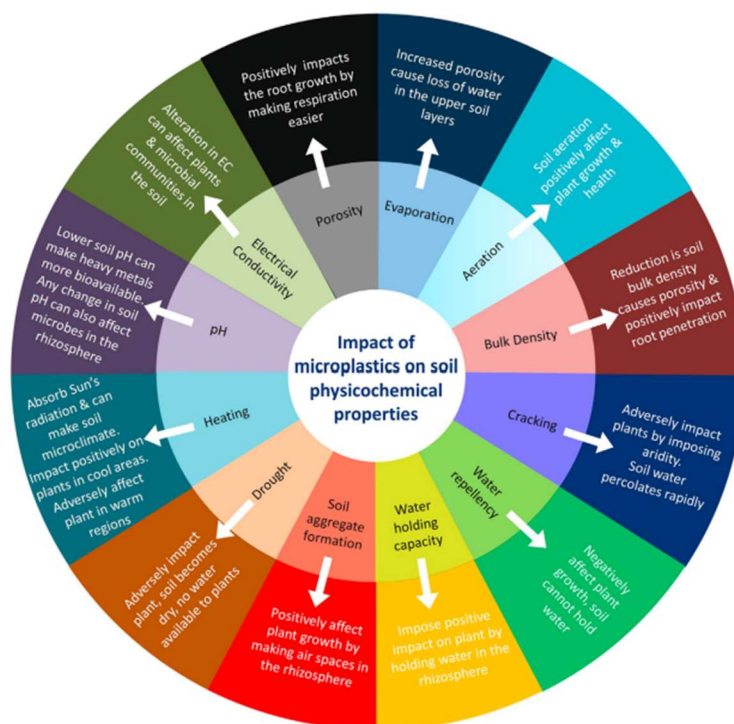
Trhliny kořenů rostlin mohou být ideální cestou pro vstřebávání mikroplastů do rostlin, kde se dostávají do výhonků, což ovlivňuje různé funkce rostlin (Sajjad et al. 2022). Sun et al. (2020) prokázali ve své práci potenciální dopad na schopnost růstu rostlin, což v konečném důsledku může snižovat produkci potravin. Qi et al. (2018) zkoumali jednu z hlavních obilnin, pšenici, a její vlastnosti ovlivněné půdou s jistou koncentrací mikroplastů. Oba dva výzkumy dospěly k závěru, že tenhle znečišťující faktor půdy má negativní vliv na vývoj a reprodukci pšenice.

Další studie zabývající se dopadem mikroplastů na obilniny objasňují, že jejich přítomnost v půdě může bránit růstu a vývoji kukuřice (Wang et al. 2020) a jsou nebezpečné taky pro rajčata a řeřichu (Bosker et al. 2019).

Slovenští vědci Botyanszká et al. (2022) zkoumali ve své práci vliv mikroplastů na růst ředkviček. Potvrzené posuny hydrofyzikálních vlastností půdy při ošetření mikroplasty, které mohly ovlivnit dostupnost vody a živin pro rostliny, nevedly k přímému významnému zvýšení celkové biomasy ředkviček. Naměřené hodnoty efektivního kvantového výtěžku fotosystému II rovněž neprokázaly jednoznačný vliv přidaného mikroplastového materiálu.

Důležitým zjištěním je taky to, že velikost mikroplastů je rozhodujícím faktorem v toxicitě. Horší pro další vývoj rostlin jsou mikroplasty menších rozměrů. Malé částice jsou schopny přilnout k povrchu semen a zcela zabránit příjmu živin a vody zablokováním pórů (Bosker et al. 2019).

Informace o korelaci mezi počtem mikroplastů a jejich konečným dopadem na produkci plodin většinou nejsou známy. V této oblasti je potřeba dalšího výzkumu.



obr. 6 - Vliv mikroplastů na fyzikálně-chemické vlastnosti půdy a jejich vliv na růst rostlin; zdroj: Khalid et al. 2020

Růst rostlin a vývoj kořenů významně závisí na činnosti mikroorganismů, které hrají klíčovou roli v koloběhu živin prostřednictvím rozkladu organické hmoty. Mikroplasty jsou z velké části tvořeny uhlíkem. Ať už jsou biologicky rozložitelné, nebo ne, nakonec se z nich do prostředí uvolní značné množství uhlíku, jehož přebytek může zvýšit růst mikrobů. Mikroby však potřebují pro svůj další růst i další základní živiny, které následně čerpají z okolní půdy a nechávají rostlinám tím pádem menší objem dostupných živin. To může mít negativní vliv na růst. Mohlo by taky dojít k změně poměru uhlíku a dusíku v půdě, což by mohlo vést k ovlivnění celého rostlinného společenstva (Khalid et al. 2020).

4.5 Potravinový řetězec a rizika pro pozemskou faunu

Při zkoumání výskytu mikroplastů v potravinovém řetězci můžeme rozlišovat dvě hlavní transportní osy. První je přítomnost v potravinovém řetězci s počátkem v mořském prostředí, kde od řas k zooplanktonu, přes ryby dostaneme mikroplastické částice na naše stoly. Druhou, méně známou cestou je osa s počátkem v půdním prostředí. Jelikož člověk je všežravec, může tato trajektorie mít více či méně zastávek u organismů. Například, když při přijetí rostlinné potravy vynecháme tradiční potravinový řetězec a mikroplastické částice pozřeme jako druzí v pořadí. Při potravě masové se k nám dostanou cestou delší, o to však víc prověřené jinými organismy.

První cesta může kromě kořenových rostlin zahrnovat i rostliny s plodinami, do kterých se mikroplastické částice dostaly delší cestou přes kořeny a stonek. Mluvíme například o brokolici, salátech, hruškách a jablkách. Největší koncentrace byly odhaleny u jablka, naopak, nejmenší u salátů (Allouzi et al. 2021).

Koncentrace mikroplastů vzrůstá každým krokem při průchodu potravinovým řetězcem. Když na počátku studie ukázala koncentraci v půdě $0,87 \pm 1,9$ částic/g, u výkalů žíhal to bylo již $14,8 \pm 28,8$ částic/g a v třetím kroku, u výkalů slepic to bylo $129,8 \pm 82,3$ částic/g, což je víc než stonásobek koncentrace na počátku cesty. Až 91,4 % částic nalezených u 5 zkoumaných slepic tvořili zbytky PE lahví (Allouzi et al. 2021).

Mikroplasty přijímané organismy způsobují záněty, fyzická poškození a také jsou možnou cestou pro vstup řady environmentálních polutantů do potravinového řetězce, jako jsou PTE, plastová aditiva nebo změkčovadla, perzistentní organické polutanty, polychlorované bifenyly, polycyklické aromatické uhlovodíky, dichlordifenyiltrichlorethan a mikroby způsobující nemoci (Sajjad et al. 2022).

tab. 2 - Výskyt a charakteristika mikroplastů v různých komoditách potravin a nápojů (Cverenkárová et al. 2021)

Zboží	Umístění	Typ MP	Materiál MP	Rozsah velikosti	Úroveň MP
Plody moře Obchodně důležité ryby druhu Australský sled, Australský losos, Australské sardinky, Chňapal australský, Ploskohlavec tmavý, Král jiží, Treska bezbousá, Parmice jižní	Austrálie	vlákna, úlomky, filmy	PE, PP, polyblends, akrylát, nylon, barva, PES, polyvinyl	38 μ m-> 1 mm	$0,96 \pm 0,08$ MP/rybu
Indické bílé krevety (Fenneropenaeus indicus)	Indie	vlákna, úlomky	PA, PES, PE, PP	157-2785 μ m	$0,04 \pm 0,07$ MP/g
Zlatá ančovička (Coilia dussumieri)	Indie	vlákna, filmy, úlomky, palety, korálky	PE, PP, PA, PES, PS	<100 -> 1000 mm	$6,75 \pm 2,73$ MP / rybu
Komerční mořské řasy nori	Čína	vlákna, filmy, úlomky, palety	PES, umělé hedvábí, PP, PA, celofán	0,11 - 4,97 mm	$1,8 \pm 0,7$ MP/g

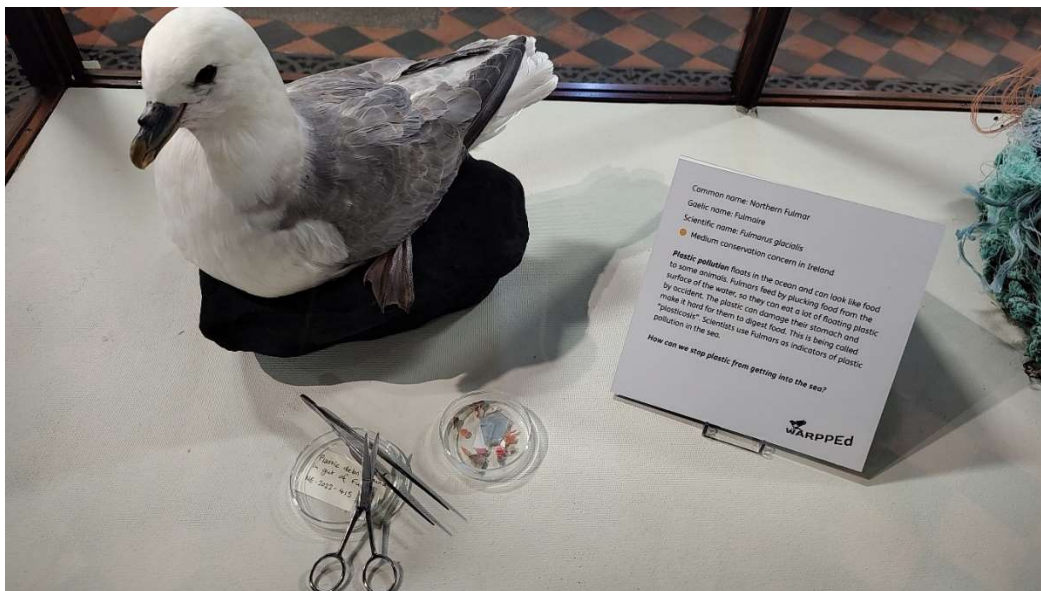
Jídlo	Kuře a krůta (balené v PS zásobníky)	Francie	vlákna, částice	extrudovaný PS	300 µm	4,0 - 18,7 MP/kg
	Rybí konzervy /makrela a tuňák)	Írán	vlákna, úlomky, filmy	PET, PS, PP, PS-PP, PS-PET, PVC, LDPE	vlákna 100–8000 µm, úlomky 10 - 1100 µm, fólie 70 - 1000 µm	1,28 ± 0,04 MP/g
	Nevařená rýže	Austrálie	NR	PE, PP, PET	NR	67 ± 26 µg/g 283
	Instantní rýže					± 50 µg/g
	Stolní soli	Afrika	mikro- vlákna, částice	polyvinylacetát, PP, PE	3,3 - 4460 µm	38,42± 24,62 MP.kg 1
	Ocet	Írán	vlákna, úlomky	PE, HDPE	1 - 500 µm	51,35 ± 20,73 MP.L 1
	Mléko	Mexiko	vlákna, úlomky	Polyethersulfon, polysulfon	0,1 - 5 mm	6,5 ± 2,3 MP/l
Nápoje	Bílé víno	Itálie	NR	PE	7 -475 µm	2563 - 5857 MP/l
	Voda z vodovodu	Hongkong	Vlákna, filmy	NR	50 - 4830 µm	2,181 ± 0,165 MP/l
	Studený čaj	Mexiko	Vlákna	PA, HRACH	<1 mm	11 ± 5,26 MP/nápoj
	Nealkoholické nápoje		Vlákna	PA, PEA, akrylonitrilbutadienstyren	0,1 - 3 mm	40 ±24,53 MP/ nápoj
	Energetické nápoje		Vlákna	PA	<1 mm	14 ± 5,79 MP/nápoj
	Pivo		Vlákna, úlomky	PA, PEA, PET	<1 mm - 2 mm	152 ± 50,97 MP/ nápoj

Mezitím publikovaná studie poskytla důkazy o přenosu mikroplastů v rámci suchozemského potravinového řetězce (půda-země-žížala-slepice) (Huerta Lwanga et al. 2017). Autoři předpokládali, že mikroplasty nahromaděné v kuřatech mají potenciálně negativní důsledky pro lidské zdraví. Kromě toho nedávná studie naznačila, že mikroplasty mohou být absorbovány kořeny salátu a následně transportovány do stonky a listů (Li et al. 2020).

Cverenkárová et al. (2021) ve svém článku uvádí s odkazem na předchozí studie, že barevná a průhledná vlákna a fragmenty mikroplastů byly identifikovány ve vzorcích medu. Počty vláken se pohybovali na úrovni 660 částic/kg medu. Počty fragmentů byly nižší, cca na úrovni 0-38 částic/kg medu. Studie se prováděla v Německu, kde se stejně tak prováděly studie

přítomnosti mikroplastů v cukru a pivu. U cukru výsledky říkají 217 ± 123 částic/kg. U piva se zkoumalo 24 vzorků, kde se našly převážně plastové fragmenty. Vlákna a granule byly zastoupené méně. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí 2-79 vláken/l a 2-66 granulí/l.

Experimentální odběr vzorků pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací provedený na kohoutkové, balené a pramenité vodě ukázal, že mikroplasty jsou přítomny ve všech těchto zdrojích vody. Testována byla voda z kohoutku ze 159 světových zdrojů a bylo zjištěno, že 81 % z nich obsahuje mikroplastové částice. Testy byly provedeny na 259 jednotlivých lahvích vody 11 různých značek a 27 různých šarží a výsledky prokázaly, že 93 % z nich obsahovaly mikroplastické částice. Studie zároveň ukazují, že člověk, který pije vodu balenou, přijme ročně kolem 90 tisíc plastových částic navíc, což je oproti 4 tisícům z kohoutkové vody 22,5násobkem nadbytečně přijatých částic (Li Yee et al. 2021).



obr. 7 Burňák lední a množství extrahovaných plastů z jeho těla, vystaveno v Národním přírodovědném muzeu Dublin (Irsko). Zdroj: Soukromý archiv autorky práce

4.6 Riziko pro lidstvo

Mikroplasty vstupují do lidského potravinového řetězce především z kontaminovaných potravin a mohou mít potenciální dopad na lidské zdraví. Mezi dalšími menšími příčinami kontaminování lidského těla mikroplasty můžeme zmínit např. inhalaci ze vzduchu nebo kontakt s pokožkou.

Plasty jako PE, PP nebo PA jsou ve své čisté podobě pro člověka zdravotně nezávadné. Avšak základní plasty nejsou v dnešním využití dostačující a proto se „vylepšují“ různými přísadami, které už zdravotní následky vyvolávají. Mluvíme o přísadách jako ftaláty, barviva, stabilizátory, zpevňující látky, plnidla a ochranné látky proti ohni (Lepší život bez plastů, 2019).

4.6.1 Chemické vlivy

Existují důkazy, že přísady, jako jsou barviva nebo plastifikátory, mohou způsobovat toxicitu, karcinogenitu a mutagenitu (Gasperi et al. 2018). Ftaláty se běžně používají jako změkčovadla, která dodávají plastům pružnost. Jsou to příměsi, které nejsou chemicky vázány na polymer, a proto je větší pravděpodobnost, že se uvolní a přenesou do životního prostředí. Více než 80 % změkčovadel používaných na celém světě tvoří ftaláty. Bylo prokázáno, že se objevují v prachu z domácností, lidské moči a mateřském mléce. Existují záznamy o přímém vlivu ftalátů na výskyt astma a alergií, speciálně u dětí. (Blackburn et Green, 2021).

4.6.2 Fyzikální vlivy

Fyzikální vlivy na lidský organismus můžeme hledat především u mikroplastů, které se do těla dostávají z jiného zdroje, než je půdní. Blackburn et Green (2021) popisuje kvantum fyzikálních vlivů na lidský organismus pomocí inhalace vzdušných mikroplastů, dále vystavení těla vodnímu prostředí, například při koupání v moři nebo dokonce vliv plastových protéz, které nahrazují lidské končetiny. Žádná ze studií však nehovoří o plastech z půdního prostředí a fyzikálním vlivu na lidský organismus.

4.6.3 Biologické vlivy

Účinek mikroplastů v lidském trávicím traktu po konzumaci je poměrně nevysvětlený jev (Cverenková et al. 2021). Předpokládá se, že člověk zkonsumuje až 80 gramů mikroplastických částic za jediný den, přičemž však 90 % z nich vyloučí ve své stolici. Když už jsou požitá avšak nevyložená, soustřeďují se v gastrointestinálním traktu, což může vést k jeho blokacím a poklesu energie. (Allouzi et al. 2021). Absorpce mikroplastů střevním epitelem se pravděpodobně vyskytuje u mikroplastů velikosti do 150 μm . Větší mikroplasty mohou vyvolat pouze lokální účinky na imunitní systém (např. zánět střeva). Naopak, menší částice se mohou putováním tělem dostat až do jader orgánů (Cverenková et al. 2021), jako například do jater, ledvin a žaludku. Expozice těchto orgánů mikroplastům vyvolala energetické poruchy lipidového metabolismu, oxidační stres a neurotoxicitu a změnila několik biomarkerů, které naznačují potenciální toxicitu (Allouzi et al. 2021).

Mikroplasty, které do těla člověka vstupují inhalací ze vzduchu mají vliv na plíce a respirační systém, což vede k počátku astma a zhoršuje průběh této choroby u lidí, kteří jí trpěli už předtím. Cesta přes pokožku je náchylná hlavně na používání kosmetických výrobků s mikroplastickými částicemi, které mohou vyvolávat podráždění kůže (Allouzi et al. 2021).

Dalším rizikem spojeným s konzumací mikroplastů v potravinách je mikrobiální asociace s jejich povrchem. Na povrchu mikroplastů byla potvrzena přítomnost různých patogenních druhů a konzumace mořských plodů zvyšuje expozici člověka těmto mikroorganismům. Z mikroplastů se můžou do potravin uvolňovat škodlivé chemikálie jako bisfenol A, PCB, PAH, chlórované pesticidy, BFR a antibiotika (Cverenková et al. 2021).

Bisfenol A je látka, která je často používána jako přísada plastů pro dosažení určitých vlastností. Nyní je prokázáno, že již i v nepatrném množství může BPA napomáhat rozvoji nemocí jako cukrovka, poruchy štítné žlázy, neplodnost nebo jiné vývojové vady. BPA nejlépe přístupné pro člověka se nachází například na účtenkách, kde zajišťuje, že se při vysoké teplotě tento kus termopapíru zbarvuje do tmava. Používá se taky v polykarbonátových výrobcích u obalů potravin, PET lahví a kuchyňských potřeb. Po zjištění škodlivosti této látky, se je mnoho výrobců snaží nahradit, avšak nahrazují je bisfenoly S a F, které podle všeho vykazují stejné účinky. (Lepší život bez plastů, 2019).

Ftaláty, jako podskupina změkčovadel, jsou dalším škodlivým prvkem obsaženým v plastech. Ovlivňují především plodnost. Tato látka se do těla dostává všemi způsoby: potravou, dýcháním i přes pokožku. Na jejich přítomnost upozorňuje typický zápach, například pach nového auta, koberce, nebo nábytku s plastovým povrchem. Změkčovadla dále nalezneme v ve výrobcích PVC (potrubí, podlahy, hračky, šampony,...), protože původně tvrdý materiál dělají pružným (Lepší život bez plastů, 2019).

Větší problém pro lidské tělo představují tzv. nanoplasty (plastové částice menší jak mikroplasty). Jejich velikost jim umožňuje procházet placentou a hematoencefalickou bariérou a dostávají se do krve a lymfatického systému, odkud mohou kontaminovat játra a žlučník. V roce 2021 byly poprvé v lidské placentě zaznamenány částice nanoplastů. (Cverenková et al. 2021). Vystavování ftalátům má taky biologický efekt na dělohu a vyvolává předčasný porod u těhotných žen (Blackburn et Green, 2021).

tab. 3 - Souhrn potenciálních toxických účinků mikro a nanoplastů na lidské zdraví (Swee-li Yee et al. 2021)

Toxické účinky	Charakteristika plastových částic	Velikost částic	Podrobnosti
Zánět	Polystyrenové částice	202 nm a 535 nm	-Upregulace exprese IL-8
	Nezměněný Karboxylovaný polystyren nanočástice	20 nm, 44 nm, 500 nm, a 1000nm	-Indukovaný zánět v lidských plicích buňkách -Upregulace exprese IL-6 a IL-8 -Zvýšený zánět u mnoha lidských malignit
	Karboxylované a aminomodifikované částice polystyrenu	120 nm	-Změněná na exprese scavengerových receptorů -Buňky M2 zvýšily produkci IL-10 -Zvýšený TGFβ1 (M1) a energetický metabolismus

	Nezměněné polyethylenové částice	0,3 um, 10 um	(M2). -Zvýšená sekrece IL-6, IL-1p a TNFa v myších makrofázích
	Polyetylenové částice z plastové protetiky implantáty	0,2 um a 10 um	-Vyvolání exprese TNFa, IL-1 a RANKL -Výsledkem je periprottická kostní resorpce
	Polystyrenové mikroplastové částice	5 um a 20 um	-Indukovaná zánětlivá reakce v oblasti implantátu -Vyvolaný zánět v játrech -Indukované nepříznivé účinky na neurotransmisi
Oxidační stres a apoptóza	Polystyrenové nanočástice modifikované aminem	60 nm	-Silná interakce a agregace s mucinem -Indukovaná apoptóza ve všech buňkách střevního epitelu
	Kationtové nanočástice polystyrenu	60 nm	-Indukovaná tvorba ROS a ER stres
	Nezměněný nebo funkcionalizovaný polystyren polyvinylchlorid (PVC) a poly(methyl methakrylát) (PMMA)	20 nm, 40 nm, 50 nm, a 100 nm 120 nm, 140 nm	-Indukovaná autofagická buněčná smrt myších makrofágů a plicních epitelálních buněk -Indukovaná apoptóza několika typů lidských buněk -Snížená životaschopnost buněk se snížením ATP a zvýšením koncentrací ROS
Metabolická homeostáze	Nečistý a fluorescenční polystyren mikroplasty	5 um	-Změny v metabolismu aminokyselin a žlučových kyselin
	Aniontové karboxylovaný polystyren nanočástice	20 nm	-Indukovaná dysbióza střevní mikroflóry a dysfunkce střevní bariéry
	Polystyrenové nanočástice	30 nm	-Změněná funkce iontového kanálu a iontová homeostáza
	Kationtové nanočástice polystyrenu	50 nm a 200 um	-Aktivované bazolaterální K ⁺ kanály -Indukovaný eflux iontů Cl ⁻ a HCO ₃ ⁻
	Nedotčené polystyrenové mikročástice	5 um a 20 um	-Blokovaný transport vezikul a distribuce proteinů spojených s cytokinezi
	Mikroplasty	0,5 um a 5 um	-Přerušovaný střevní transport železa a buněčný příjem -Snížení hladiny ATP v játrech -Porucha energetického metabolismu -Metabolická porucha spojená s dysbiózou střevní mikroflóry a dysfunkcí střevní bariéry -Zvýšená rizika metabolických poruch u potomků

5. SNÍŽENÍ RIZIK A VÝHLEDY DO BUDOUCNA

Podle globálních trendů ve výrobě plastů, spotřebitelských vzorců používání, nesprávné likvidace plastového odpadu a demografie se odhaduje, že používání plastů bude v budoucnu exponenciálně narůstat. Velké množství emitovaných a nahromaděných mikroplastů však díky své stabilitě a nerozložitelnosti zůstane kvazipermanentně v životním prostředí, a proto může představovat potenciální riziko pro ekosystémy (Zhang Y. et al. 2022).

Znečištění mikroplasty ve vodním prostředí (zejména v oceánech) vyvolává celosvětový zájem, zatímco půdním systémům se věnuje mnohem méně vědecké pozornosti. Ve znalostech o znečištění půdy jsou stále mezery a řada otázek zůstává nejasná. V současné době nejsou terénní údaje o naměřených koncentracích v půdních systémech široce dostupné, což omezuje naše chápání současného stavu znečištění. Přesto existuje pár opatření, které tuto problematiku řeší. Díky tomu, že mikroplasty jsou těžko rozložitelné médium, existuje jen pár cest k minimalizování dopadů na půdní prostředí a lidi. Tyto metody můžeme rozdělit do rovin legislativní (regulace a zlepšení managementu nakládání s plastovým opadem), technické (biologicky odbouratelné bioplasty a mikrobiální biotechnologie) a sociální (veřejné vzdělávání ohledně redukce používání plastů na jedno použití, adoptování recyklačních návyků a používání biorozložitelných náhražek).

5.1 Spotřebitelská opatření

Rozšiřování veřejného povědomí je důležitou součástí redukce mikroplastů v životním prostředí. Osvěta veřejnosti také pomáhá zvyšovat povědomí veřejnosti o negativních důsledcích mikroplastů na životní prostředí. Veřejnost je třeba vzdělávat, aby ve svém životě uplatňovala metodu 3R, například opakovaně používala plastové tašky, omezila používání jednorázových plastů, plastových lahví nebo plastových brček a osvojila si recyklační návyky. Při nákupu potravin je vhodné nosit si vlastní nákupní tašky, používat recyklovatelné sáčky a kupovat krabice místo lahví, aby se snížilo používání plastů. Při nákupu potravin s sebou v kavárně nebo restauraci si nosit vlastní nádoby na jídlo, kvůli omezení používání polystyrenu (Allouzi et al. 2021).

Knížka od skupiny autorů sdružujících se pod hnutím smarticular.net s názvem „Lepší život bez plastů“ (2019) popisuje nejzákladnější opatření, které můžeme jako jednotlivci činit pro omezení mikroplastů v našich životech. Samozřejmě nejrizikovější cestou vstupu těchto látek do našeho těla je konzumace potravin. Téměř ve všech minerálních vodách prodávaných v PET lahvích jsou k nalezení mikroplasty. Jednoduchým řešením může být konzumace vody kohoutkové, upravené výrobníkem sodы. Další běžnou cestou, jak se vystavujeme mikroplastům v naší potravě, je ignorování faktu, že vysoké teploty a UV záření urychluje vylučování přírodních látek v plastech. Tohle se týká například plastových rychlovarných konvic, ohřívání jídel v plastových nádobách nebo skladování plastů v teplotně exponovaných místech, jako je například interiér auta v horkých letních dnech. Dobrou alternativou k prodávaným potravinám v plastových obalech je pěstování vlastních plodin. Je potřeba však myslet na to, že neuvážené používání plastových fólií proti plevelu, plastových cedulek, nebo pěstování potravin ve

fóliovnících z plastu může mít za následek možná ještě škodlivější variantu, než jaká je ta, kterou kupujeme v supermarketu.

Nárůst zájmu veřejnosti o uvolňování mikrovláken při praní oděvů vedl k vývoji zařízení, která mohou uživatelé vkládat do praček, a která zachycují a zadržují vlákna uvolněná při praní. Například Guppyfriend je sáček z jemné síťoviny, do něhož lze vložit oblečení určené k praní, zatímco Cora Bell zachycuje vlákna, která se uvolní při praní. V dalších studiích bylo zjištěno, že nejúčinnějším možným prostředkem k zamezení šíření mikrovláken z praní, které může široká veřejnost používat je zařízení XFiltera, které po nasazení na odtokovou vodu snížilo uvolňování vláken až o 78 % (Gaylarde et al. 2021).

5.2 Politické opatření

Politická situace hraje obrovskou roli v tom, jaké bude směřování tzv. „zelené“ politiky, jejímž hlavním cílem je zachování a obnova životního prostředí. V současné době se celosvětově zkoumají některá odpovídající opatření. Evropa například navrhla *Evropskou strategii pro plasty v oběhovém hospodářství* a dobrovolný závazek *Plastic 2030*. Největší polutant a producent plastů, Čína, také vydala dokumenty *Názory a další posílení kontroly znečištění plasty*. Kromě toho dne 30. října 2019 vydala Čínská národní komise pro rozvoj a reformy také *Průvodní katalog pro úpravu průmyslové struktury*, kde stanovuje, že každodenní chemické výrobky obsahující plastové kuličky jsou zakázány ve výrobě do 31. prosince 2020 a stažené z prodeje do 31. prosince 2022. (Zhang Z. et al. 2022). Další Asijská krajina, Malajsie, implementovala kampaň „Ne plastickým taškám“, tím, že zavedla poplatek za jejich pořízení ve výši RM 0,20 (4,9 Kč, pozn. autorky), a tím motivovala obyvatele nosit k nákupům vlastní tašku (Allouzi et al. 2021).

5.2.1 Evropská strategie pro plasty v oběhovém hospodářství

Tento dokument popisuje aktuální stav plastového odpadu na území Evropské Unie, jeho zdroje a poptávku po něm. Představuje a zavazuje k opatřením ve dvou krocích – vizi a přetavení do reality. Všechny závazky navržené v tomto dokumentu by v současné době (březen 2024, pozn. autorky) měli být úspěšně aplikované ve všech členských krajínách EU. Nařízení se týkají například nových opatření v oblasti ekodesignu plastových obalů, recyklovatelnosti plastových obalů, postupů ke zlepšení odděleného sběru plastového odpadu, opatření na omezení plastů na jedno použití, na sledování množství plastů v mořích a jeho omezování a mnoho dalších. Tato ustanovení podporuje EU pomocí investic a inovací k celkovému oběhovému řešení. Kromě závazných navrhuje i opatření dobrovolná, které však některé členské země

převzaly do svých národních alternativ za povinné. Nalezneme zde například ustanovení, kdy je při práci na veřejných zakázkách nutno upřednostňovat a hodnotit projekty na základě opětovně použitelných a recyklovatelných plastů a jiná strategická opatření vedoucí k dosažení cílů stanovených v tomto dokumentu (Evropská strategie pro plasty v oběhovém hospodářství, 2018).

5.2.2 Plastics 2030

Evropský dobrovolný závazek na zlepšení cirkularity a využívání zdrojů do roku 2030. Zaměřuje se na prevenci unikání plastů do životního prostředí, navrhuje zlepšení efektivity využívání obnovitelných zdrojů jako alternativu k plastům a zkoumá aplikaci cirkularity plastových obalů. Nejdůležitějším cílem je ze **100 %** používání recyklovatelných, znovupoužitelných nebo obnovitelných plastových obalů v EU-28, Norsku a Švýcarsku do roku 2040. Do roku 2030 určuje hranici 60 % ze všech plastových obalů. (Plastics 2030).

5.2.3 Zákaz prodeje jednorázových plastů

Vlády několika zemí světa zakázaly některé jednorázové plasty, aby zmírnily znečišťování planety. Mezi jednorázové plasty můžeme zařadit sáčky, obaly na potraviny, láhve nebo nádoby, které se použijí pouze jednou, než se promění v odpad (Calero et al. 2021).

Evropská Unie upravuje pravidla používání jednorázových plastů *Směrnici 2019/904 o omezení dopadu některých plastových výrobků na životní prostředí*. Ta se vztahuje na výrobky vyrobené z plastu určené k tomu, aby byly před vyhozením použity pouze jednou nebo krátkodobě. Omezuje evropský trh ve smyslu zákazu uvádění na trh výrobky jako plastové příbory, talíře, brčka a vatové tyčinky, nápojová míchátko, tyčky k uchycení a podporu balónek, nádoby na potraviny z expandovaného polystyrenu a výrobky z oxo-rozložitelných plastů. Směrnice dále určuje povinnost členských států EU snižovat spotřebu a určuje požadavky na tříděný sběr. Nastavuje jednotný systém povinnosti označování jednorázových plastů a obsahuje i zásadu rozšíření odpovědnosti výrobce.

5.2.4 Rozšíření odpovědnosti výrobce (EPR)

Institut rozšíření odpovědnosti výrobce byl vyvinut za účelem snížení uvolňování plastového odpadu. Odpovědnost výrobce je rozšířená z období, kdy spotřebitel výrobek užívá, také na období, kdy výrobek již dosloužil a ve kterém se ho chce dosavadní uživatel zbavit. V Evropské Unii se při zavádění EPR projeví některé obtíže, včetně nedostatku závazných nástrojů s konkrétními opatřeními a nedostatku pobídek pro inovace (Calero et al. 2021).

5.2.5 Podpora trhu s recyklovaným plastem

Specifický trojúhelník ze šipek nebo podobný symbol, který vytváří dojem, že je materiál recyklovatelný je k nalezení téměř na každém plastovém obalu. Například jako nejvíc puntičkářsky třídící národ je známo Německo. Ve skutečnosti se recyklace daří jen u materiálů jako je sklo nebo papír. I takový recyklační gigant jakým je Německo vytřídí něco mezi 5 a optimistickými 20 % všech plastů v oběhu. Teoreticky je všechno plastový odpad recyklovatelný, ale praxe ukazuje něco jiného. Plasty například nejsou donekonečna obnovitelné s dosažením stejných vlastností jako například ocel nebo sklo. U plastů je potřeba mnohem komplexnější proces pro extrakci původních materiálů, což má za následek, že každá další recyklace bude mít za výsledek plast s nižší kvalitou. Tomuhle jevu se říká downcycling (Lepší život bez plastů, 2019).

V současné době není výroba recyklovatelných plastů ekonomicky konkurenceschopná. Recyklačním centrům ve velkém konkurují spalovny, které k dosažení rentability potřebují spalovat velké množství odpadu (Lepší život bez plastů, 2019). Některá možná opatření na podporu trhu s recyklovatelnými plasty se mohou zaměřit na stanovení daní z používání primárních plastů, zavedení kampaní týkajících se environmentálních výhod používání recyklovatelných plastů nebo pobídky k výrobě recyklovatelných plastů (Calero et al. 2021).

5.2.6 Plasty a legislativa České republiky

Česká republika jakožto součást Evropské unie ve velké míře přebírá legislativu z Bruselu, případně upravuje předpisy do tuzemského tvaru. Přesně jako u zákona číslo 243/2022 Sb., který zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje pravidla, práva a povinnosti jak při uvádění plastových výrobků na trh, tak i pravidla nakládání s takovým odpadem. Tento zákon zavádí zákaz uvádění vybraných plastových výrobků na trh a do oběhu. Jedná se například o vatové tyčinky, příbory, brčka, nápojová míchátká atd. Dále upravuje podmínky pro označování plastových výrobků a určuje povinnost osvětové činnosti. Popisuje podmínky, za jakých je možné provozovat kolektivní systém, určuje matici odpovědnosti a pokuty v případě nedodržování. Taky popisuje úlohu státní správy a ministerstva při aplikaci tohoto zákona.

V roce 2022 došlo k významné úpravě legislativy o obalových materiálech v České republice. Novela zákona č.244/2022 Sb. přináší řadu změn, které přispívají k efektivnějšímu řešení environmentálních problémů spojených s obaly, snižují produkci odpadu a podporují cirkulární ekonomiku. Hlavními změnami jsou rozšíření odpovědnosti výrobců a dovozců, zavedení záloh na nápojové obaly, podpora prevence vzniku obalového materiálu, osvěta a podpora obnovitelných a recyklovatelných materiálů.

Novějším legislativním rámcem, který stanovuje omezení dopadu vybraných plastových výrobků na životní prostředí je vyhláška č. 47/2023 Sb. Tato vyhláška upravuje a doplňuje předchozí zákon č. 243/2022 Sb. Nově je nutno například vést evidenci pro jednotlivé typy plastového odpadu zvláště (hygienické vložky, tampony a aplikátory tamponů; před vlhčené ubrousky pro osobní hygienu a péči o domácnost; tabákové výrobky s filtry;...). Dále upravuje a přibližuje způsob osvětové činnosti a obsahuje vzorový formulář pro kolektivní systém.

5.3 Technická opatření a alternativy

5.3.1 Omezení výroby a produkce mikroplastů

Nejlepším způsobem, jak zabránit vzniku mikroplastů je snížit množství plastového odpadu. Toho lze dosáhnout snížením výroby plastových materiálů, používáním alternativních materiálů, jako je sklo, lepenka nebo jiné recyklovatelné či biologicky rozložitelné výrobky. Jednou ze strategií, která se ukazuje jako poměrně úspěšná, je zavedení zálohování PET lahví, a to především kvůli ekonomické motivaci občanů. Další alternativou je recyklace, která šetří zdroje a energii a také snižuje emise znečišťujících látek, čímž prospívá společnosti i životnímu prostředí (Calero et al. 2021).

5.3.2 Ekodesign plastových obalů

V posledních několika desetiletích byla vydána řada norem a různých environmentálních předpisů, jejichž cílem bylo pokrýt environmentální aspekty výrobků. Mezi tyto normy patří i norma ISO 14006, v české variantě ČSN EN ISO 14006 z roku 2020, která poskytuje vodítka pro začlenění ekodesignu. Ekodesign hovoří o činnostech přijatých ve fázi vývoje s cílem snížit dopad na životní prostředí v celém životním cyklu výrobku. V případě plastů by měly být použity systémy ekodesignu, které změní současný způsob výroby plastů s cílem snížení jejich množství a opětovného použití, což vyžaduje jemnou rovnováhu mezi předpisy a pobídkami. Další opatření se mohou zaměřit na výrobu plastů bez toxických přísad (Calero et al. 2021).

5.3.3 Biologicky rozložitelné plasty (bioplasty)

V posledních letech byla provedena řada studií s cílem najít alternativy k plastovému mulčování. Ty sníží množství zbytků mulče na zemědělských polích a jsou šetrnější k životnímu prostředí ve srovnání s konvenčními PE mulčovacími fóliemi. Za takové se považují například bioplastové mulčovací fólie, které byly poprvé syntetizovány v 70. letech 20. století (Sajjad et al. 2022). Obecně se má za to, že bioplasty jsou schopné úplného rozkladu a hnití. 100 % rozklad je však možný pouze v požadovaném kompostovacím prostředí. Rozklad bioplastů je

obvykle neúplný, což může paradoxně taky vést ke zvyšování mikroplastů v půdním prostředí (Kubowicz et Booth, 2017). Kromě toho má výroba bioplastových fólií stále pár nevýhod, například nižší pevnost v tahu, což je způsobeno použitím biologicky rozložitelných materiálů (Sajjad et al. 2022). Naopak, mezi výhody zahrnujeme zvýšení účinnosti zdrojů díky využití biomasy jako suroviny, úsporu fosilních paliv, snížení emisí skleníkových plynů a uhlíkové stopy a snížení celkových nákladů na výrobu (Calero et al. 2021).

5.3.4 Úprava půdy vedoucí k odstranění kontaminantů

Pro snížení závažnosti znečištění půdy odstraněním kontaminantů a zabráněním jejich reakci s mikroplasty je proto nezbytná remediacce nebo revitalizace půdy. Konvenční techniky sanace půdy, jako je například vymývání půdy, mohou zničit živé organismy a organickou hmotu v půdě a zhoršit její kvalitu. Proto se bioremediace doporučuje spíše kvůli nízkým nákladům, bezpečnosti a malému dopadu životního cyklu na životní prostředí. K odstranění kontaminantů z kontaminovaných půd se používají různé způsoby zpracování půdy, jako je fytomanagement kontaminantů nebo bioremediace. První používanou technikou sanace půdy je fyto-remediace kontaminované půdy, která zahrnuje fytostabilizaci, fytoimobilizaci, fytovolatilizaci a fytoextrakci. Fyto-remediační techniky zahrnují použití původních, dovezených nebo geneticky modifikovaných rostlin k odstranění nebo snížení koncentrace stopových prvků nebo těžkých kovů z půdy s následnou akumulací v nadzemní biomase rostlin. Tato technika má však nevýhody, jako jsou závislost na výnosu sušiny rostlin, koeficientu přenosu z půdy do rostlin a výběru vhodných fyto-remediačních druhů rostlin. Dále lze k bioremediaci půdy využít také mikrobiální společenstva. Některé mikroorganismy mohou přežívat v kontaminovaném půdním prostředí s extrémními podmínkami, například s vysokým obsahem kovů (Allouzi et al. 2021). Další technikou je použití půdních doplňků k odstranění znečišťujících látek v půdě. Palansooriya et al. (2020) uvádí, že půdní doplňky imobilizují stopové prvky na základě fyzikálně-chemických změn, které v půdě účinně probíhají, a tím zlepšují kvalitu půdy. Tato metoda je navíc nákladově efektivní a snadno použitelná. Půdní doplňky lze rozdělit na organické a anorganické, jako jsou živočišné odpady (vaječné skořápky, slepičí kosti, kravský hnůj, ústřicové skořápky), biochar, biosolid, kompost, jílové minerály, uhelný popílek, vápenné materiály, oxidy kovů a fosforečnany. Pro praktické použití je však nezbytné zvolit vhodné imobilizační činidlo, například biochary se doporučují spíše pro sanaci půd kontaminovaných Pb, Cu. Stručně řečeno, mikroplasty mohou interagovat s PTE v půdě a způsobit tak jejich toxicitu, tudíž je třeba odstranit PTE v půdě.

5.3.5 Mikrobiální technologie

Nejprve byla navržena a zkoumána mikrobiální technologie využívající biologická činidla (bakterie a houby) a metabolické enzymy, díky jejich schopnosti rozkládat přírodní a syntetické polymery. Mikroby ulpívají na povrchu plastů, což vede k tvorbě mikrobiálního biofilmu. Následně mikroorganismy vylučují exopolysacharidy a extracelulární enzymy, které posilují adhezi biofilmu na povrchu plastů, což vyvolává biodeterioraci a fragmentaci plastových materiálů na oligomery, dimery a monomery. Nakonec dochází k mineralizaci, jejímž produktem je mikrobiální biomasa, oxid uhličitý a voda (Ganesh et al. 2020). Z minulých studií vyplynulo, že mikroorganismy, které prokázaly schopnost rozkládat plasty jsou *Streptomyces setonii*, *Pseudomonas aeroginsa*, *Rhodococcus ruber*, *Pseudomonas stutzeri*, *Streptomyces badius*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus*, *Fasarium lini* (Pathak, 2017).

5.3.6 Minimalizace ztrát předvýrobních plastových pelet

Ztráty pelet v Evropské unii představují 16000–16500 tun ročně. Iniciativa *Operation Clean Sweep*® je jednou z iniciativ na zmírnění tohoto problému. Jedná se o dobrovolný program, jehož cílem je zabránit tomu, aby plastové pelety končily v moři. Program spočívá v podpoře používání správných čistících postupů a kontroly pelet ve všech provozech, kde se manipuluje s plastovými peletami, aby se minimalizoval únik do životního prostředí. Mezi opatření můžeme zmínit například používání sít v odtokových kanálech, aby se zabránilo vniknutí rozsypaných pelet do kanalizace. Dalším opatřením, které iniciativa navrhuje je používání pytlů s vyšší odolností nebo přechod obalových forem na volné nakládání ve formě sil. Dalším působivým opatřením by mělo být použití účinnějšího čištění pomocí vakuové jednotky k odstranění rozsypaného prášku. Jako poslední navrhují zveřejňování účinných postupů pro interní a externí publikum, s cílem vytvořit správné pracovní postupy a konkrétní instrukce k dosažení cílů nulových ztrát pelet. (Calero et al. 2021).

5.3.7 Zlepšení technologie čištění odpadních vod

Jednou z hlavních cest znečištění životního prostředí mikroplasty jsou čistírny odpadních vod. Tyto odpadní vody obsahují mikroplasty, které pocházejí zejména z kosmetických výrobků nebo syntetických textilií (Calero et al. 2021). Cesta mikroplastů z čistíren odpadních vod přes kaly je popsána v kapitole 1.2.

Návrh zlepšení se zaměřuje především na zlepšení terciárního čištění odpadních vod, které představuje největší problém při znečišťování mikroplasty. Mezi alternativy navrhované pro

čištění odpadních vod radíme použitím ozonu, rychlé pískovací filtrace, reverzní osmózy, flotace rozpouštěným vzduchem nebo membránové bioreaktory (Calero et al. 2021).

5.3.8 Úprava praček

Výběr pračky může ovlivnit uvolňování mikrovláken. Pračky s předním plněním jich vytvářejí méně než ty s plněním vrchním. Ke zmírnění tohoto problému bylo navrženo přidání filtrů do praček. Systém Lint LUV-R, který se nasazuje na výstup pračky, vykazuje vyšší účinnost než zařízení „Corra ball“ zachycující vlákna v bubnu. Takové doplňky pro domácí uživatele však nemůžou být uspokojivým řešením. Moderní pračky musí být vybaveny vhodnými filtry, aby se zabránilo uvolňování mikrovláken do prostředí. Výsledky studie, která měřila uvolňování mikrovláken v evropských i severoamerických podmínkách praní, naznačují, že vysoký poměr vody k látce zvyšuje ztráty mikrovláken, což podporuje současné environmentální cíle na snižování spotřeby vody. To poskytuje další důvod, proč by měl průmysl spotřebičů pokračovat ve vývoji přístupu ke snižování spotřeby vody při praní (Gaylarde et al. 2021). Akiyama et al. (2020) se domnívají, že 35 % plastu v oceánech pochází z oděvů, a proto navrhuje systém akustických vln k filtraci a odstranění mikroplastů v pračkách.

6. VÝSLEDNÉ ZHODNOCENÍ

Plasty jsou materiálem, který se ve velkém měřítku začal používat po průmyslové revoluci v minulém století a okamžitě našel uplatnění ve všech odvětvích lidské činnosti. Především levná výroba zajistila nadšení z používání plastových materiálů. Momentálně jsou plasty součástí našeho každodenního života již několik desetiletí. Pořád probíhá jen počáteční výzkum a nastavování jeho metodiky při ověřování dopadů na životní prostředí. Odborně se problematice věnuje vybraný kruh vědců, který dle mého názoru absolutně neodpovídá velikosti tohoto problému. Toto zhodnocení validuje fakt, že v použité literatuře v této práci nalezneme opakující se jména autorů u vícera výzkumů.

Zkoumání metod a jejich vyhodnocování v současné situaci probíhá paralelně u vícero výzkumníků, avšak doposud není vybrán jeden unifikovaný postup, který by měl za následek posun řešení této problematiky. Momentálně známe dostatek dat z různých typů měření. Stálo by tedy za to, aby odpovědné organizace vypracovaly závazné dokumenty, které by následně mohly aktualizovat na základě dalších výzkumů. Mezitím by však další subjekty, řízeny tímto závazným dokumentem podle dané problematiky dokázaly sbírat data, potřebná pro další řešení bez nutnosti hlubšího vědeckého poznání.

Výzkum dopadů na životní prostředí a celou škálu organismů je momentálně ve velké míře závislý na kvantitě dat a je soustředěný vždy na specifickou lokalitu výskytu. Další výzkumy by se mohly zaměřit na obecnější pohled dopadů a navrhnout řešení v takovém pořadí, aby byly zařazované do procesu od nejnáze aplikovatelných po takové, které potřebují hlubší analýzu.

V neposlední řadě je nutnost součinnosti vědecké obce se státními i mezinárodními orgány. Tato spolupráce může zabezpečit lepší informovanost laické veřejnosti, zapojení do procesu více organizací i jednotlivců se zájmem o tuto oblast. Zřejmě tím nejdůležitějším by však mělo být vymezení právních hranic a nutnost legislativních procesů.

7. DISKUSE

Teoretické znalosti o plastu jako materiálu jsou v současné době na vysoké úrovni. Výzkum dopadů na životní prostředí však postupuje pomalejším tempem než výzkum vývoje nových druhů plastových materiálů. Zároveň množství vyrobených a používaných plastů vzrůstá každým dnem, kdežto ucelený výzkum může trvat roky. Výzkumy ukazují, že mikroplasty jsou dnes přítomny v každém zkoumaném půdním prostředí bez ohledu na lokalitu. Množství plastového odpadu je tak enormní, že biotické a abiotické vlivy a cesty transportu se postaraly o to, že mikroplastické částice nalezneme i v místech doposud téměř nedotčených lidskou činností. O toto se starají činitele transportu, které můžeme rozdělit na ty, které umíme ovlivnit a ty, které nemáme možnost ovlivnit bez dalšího negativního dopadu na životní prostředí nemáme možnost. Ovlivnitelné jsou převážně činnosti vyvíjené lidstvem, zejména polnohospodářství a nakládání s kalovým odpadovým materiálem. V tomto směru se jedná o vylepšení technologií sloužících v těchto odvětvích, což je ale pro podnikající subjekty dalším nákladem, který musí být doplňován systémovou podporou legislativy a státních nebo mezinárodních společenstev.

Sebereflexí při aktivitách, které podporují migraci a transport mikroplastů však řešíme jen důsledek, a neodstraňujeme zdroj problému. Tím je samozřejmě vytváření materiálů, které slouží jako původce takových mikropolutantů. Zdroj je v tomto případě jednoznačný, a to ze 100 % lidstvo, které tento anorganický materiál vyvinulo, a proto si myslím, že hledat řešení a vinu jinde je neopodstatněné. Prvním a nejdůležitějším krokem, který již probíhá, je začít problém řešit a zkoumat ho. Je však potřeba od teorie přejít do praxe. Na základě navržených metod kvantifikace a analýzy vypracovat například jednotnou mechaniku dalšího postupu. Tu bych si představovala například jako vytvoření mapy znečištění, která by nám mohla zodpovědět důležité otázky jako třeba, které zdroje jsou nejnebezpečnější a je potřeba je proto řešit nejdříve.

V takovém případě a v měřítku například států, by stačila analýza, která nemusí zachycovat v počátku hloubkovou analýzu jednotlivých částic. Porovnání účinnosti a efektivnosti metod již existuje. Otázkou zůstává, zda čekat na nějakou další, dokonalou metodu, nebo začít pracovat na výstupech s tím, co máme.

Dosavadní výsledky nám ukazují jasný negativní vliv na životní prostředí. Od nejmenších mikrobiálních živočichů přes celou škálu potravinového řetězce až k člověku. Stejně tak jako u zdrojů, ani výzkumníci se neshodují v tom, co je nejpálčivějším problémem, který by se měl řešit prioritně. Výzkumy se zaměřují většinou na obecné dopady a neurčují priority v závažnosti. Samozřejmě je těžké predikovat, které účinky budou v delším časovém horizontu závažnější, ale v co nejdřívějším levelu potravinového řetězce zabráníme dalšímu šíření, o to jednodušší práce na odstranění mikroplastů z oběhu bude. Z tohoto důvodu mi přijde správné, že výzkumy se zabývají primárně dopady na mikrobiální společenstvo. Zároveň je nutné zkoumat i dopady ve vyšších patrech pyramidy z důvodu toho, že momentálně ten problém už existuje a je ho potřeba ho řešit. Očekává se, že v blízké budoucnosti budou podrobněji vyzkoumány negativní sekundární vlivy na lidské tělo. Ty zdravotní jsou v základu docela jasné, avšak je nutno posoudit, jak velkou roli zastávají plastové mikročástice například při vlivech na psychické a emocionální rozpoložení člověka a vývoj lidstva. Důvodem je již známý fakt, že mikroplasty se dostávají do DNA a RNA.

My, jako lidé, jsme sami zodpovědní za tento problém, a proto je logické, že si ho musíme sami vyřešit. Hodnotím pozitivně, že na různých řešeních se již pracuje a některé jsou i zaváděny do praxe. Jedná se např. o osobní odpovědnost jednotlivců, nebo legislativní a právní normy a předpisy, které se problémem zaobírají. Je však nutné k opatřením přistupovat citlivě, a to z důvodu, že lidé a ekonomické subjekty se neradi vzdávají svého ekonomického a životního pohodlí. To může být narušeno tím, že uvědomělá část společnosti studuje problémy do hloubky a záleží jí na budoucnosti nejen své, ale i celého společenstva lidí. Proto by mohlo být dobrou cestou do budoucna v první řadě nastolované řešení prezentovat a argumentovat veřejnosti. Dalším pozitivním řešením může být motivace subjektů k dalšímu vývoji suplementárních materiálů nebo materiálů s menším rizikem pro životní prostředí, a to v podobě dotačních programů, nebo legislativních výjimek pro takhle podnikající a smýšlející firmy a společenstva. V neposlední řadě jsme to my, jednotlivci, kteří můžeme omezit spotřebu, případně hledat alternativy k tomu, abychom plasty jako nebezpečí ignorovali.

8. ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE

Tato práce je průřezem toho nejdůležitějšího, co je známo o problematice mikroplastů v půdním prostředí. Krátkým úvodem zasvěcuje do základních pojmů a povědomí, které je nutno znát při poznávání a hodnocení hlubší analýzy, která je soupisem známých řešených i neřešených problémů týkajících se tématu. Hlubší analýza a rešerše přibližuje a seznamuje s vědeckými poznatky prostředí České republiky. Průřez metodik, dopadů a návrhu řešení tvoří podklad a případný návod na budoucí výzkumy tuzemských studentů, případně i vědců.

Za svůj přínos touto prací považuji osobní pohled studentky a nadšenkyně studia problematiky životního prostředí z řad mladé generace, co může sloužit jako vodítko k tomu, jakou prioritu tomuto tématu do budoucna přiřadit. Dále si myslím, že přehledná struktura a filtrace informací v práci může sloužit jako kvalitní přehledové médium pro další výzkumy a práce, které se budou věnovat prohloubení vědomostí pro konkrétní vybranou dílčí část.

9. TERMINOLOGICKÝ SLOVNÍČEK

syntetický materiál – materiál vyrobený z nepřírodních materiálů

fragmentace – dělení, drobení, tříštění

fentová oxidace – chemická reakce, kdy v přítomnosti tranzitních kovů vzniká vysoce aktivní hydroxylový radikál

nilská červeň – barvivo účinné na tukové kapénky

inhibice pohybu – tlumení pohybu

lokomoční toxicita – pohyb, který je toxický pro okolní prostředí

karcinogenita – schopnost vyvolat vznik zhoubného nádoru

mutagenita – proces, při kterém dochází k poškození DNA

gastrointestinální trakt – trávicí soustava

střevní epitel – Tenké střevo

lipidový metabolismus – metabolismus tuků (cholesterol, ...)

autofagická buněčná smrt – soubor procesů vedoucích k odumírání buněk

apoptóza – programovaná buněčná smrt

dysbióza – stav změny rovnováhy lidského mikrobiomu

remediace – vzájemný vliv starých a nových médií

exopolysacharidy – sacharidy vznikající při fragmentaci mléčných výrobků

extracelulární enzymy – buňky, které nacházíme v tkáňových kapalinách živočichů

10. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

10.1 Odborné publikace

- Akyiama Y., Egawa T., Koyano K., Moriwaki H., 2020: Acoustic focusing of microplastics in microchannels: a promising continuous collection approach. *Sensory Actuator B Chem* 304.
- Allouzi M.M.A., Tang D.Y.Y., Chew K.W., Rinklebe J., Bolan N., Allouzi S.M.A., Show P.L., 2021: Micro (nano) plastic pollution: The ecological influence on soil-plant system and human health. *Science of the Environment* 788. 147815
- Blackburn K., Green D., 2022: The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio* 2022/51. 518-530
- Bosker T., Olthof G., Vijver M.H., Baas J., Barmantlo S. H., 2019: Significant decline of *Daphnia magna* population biomass due to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 250. 669-675
- Botyanszká L., Šurda P., Vitková J., Lichner L., Igaz D., 2022: Effect of microplastics on silty loam soil properties and radish growth. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 70. 321-329
- Calero M., Godoy V., Quesada L., Martín-Lara M.Á., 2021: Green strategies for microplastics reduction. *Green and Sustainable Chemistry* 28. 100442
- Cincinelli A., Martellini T., Guerranti C., Scopetani C., Chelazzi D., Giarizzo T., 2019: A potpourri of microplastics in the sea surface and water column of the Mediterranean Sea. *Trends in Analytical Chemistry* 110. 321-326
- Cverenkárová K., Valachovičová M., Mackuľak T., Žemlička L., Bírošová L., 2021: Microplastics in the Food Chain. *Life* 2021/11. 1349
- De Tender C.A., Devriese L.I., Haegeman A., Maes S., Ruttink S., Dawyndt P., 2015: Bacterial Community Profiling of Plastic Litter in the Belgian Part of the North Sea. *Environmental Science & Technology* 49. 9629-963
- Debraj D., Lavanya M., 2023: Microplastics everywhere: A Review on existing methods of extraction. *Science of the Total Environment* 893. 164878

- Dierkes G., Lauschke T., Becher S., Schumacher H., Földi C., ternes T., 2019: Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 411. 6959-6969
- Ganesh K.A., Anjana K., Hinduja M., Sujitha K.G.D., 2020: Review on plastic wastes in marine environment – biodegradation and biotechnical solutions. *Marine Pollution Bulletin* 150, 110733
- Gasperi J., Wright S.L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Kelly F.J., Tassin B., 2018: Microplastics in air: Are we breathing it in? *Science & health* 1. S. 1-5
- Gaylarde C., Baptista-Neto J.A., Monteiro da Fonseca E., 2021: Plastic microfibre pollution: how important is clothes laundering? *Heliyon* 2021/7. e07105
- Grause G., Kuniyasu Y., Chien M.F., Inoue C., 2022: Separation of microplastics from soil by centrifugation and its application to agricultural soil. *Chemosphere* 288. 132654
- Helmberger M. S., Tiemann L. K., Grieshop M. J., 2019: Towards an ecology of soil microplastics. *Functional Ecology* 2020. S. 550-560.
- Huerta Lwanga E., Gertsen H., Gooren H., Peters P., Salánki T., van der Ploegh 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
- Huerta Lwanga E., Mendoza Vega J., Ku Quej V., de los Angeles Chi J., Sanchez del Sid 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. 14071
- Hüffer T., Wagner S., Reemtsma T., Hofmann T., 2019: Sorption of organic substances to tire wear materials: Similarities and differences with other types of microplastic. *Trends in Analytical Chemistry* 113. 392-401
- Kasa V.P., Thomas A.P., Bordoloi S., De Bhowmick G., Dubey B.K., Sarmah A.K., 2022: Microplastics in soil: Current status and evaluation of the greenness of various analytical methods of identification. *Green Analytical Chemistry* 2022/3. 100038

- Khalid N., Aqeel M., Noman A., 2020: Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly. *Environmental Pollution* 267. 115653
- Kubowicz S., Booth A.M., 2017: Biodegradability of Plastics: Challenges and Misconceptions. *Environmental Science & Technology* 51. 12058-12060
- Kumar M., Xiong X., He M., Tsang D.C.W., Gupta J., Khan E., Harrad S., Hou D., Ok Y.S., Bolan N.S., 2020: Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution* 265. 114980
- Leonard J., Koydemir H.C., Koutnik V.S., Tseng D., Ozcan A., Mohanty S.K., 2022: Smartphone-enabled rapid quantification of microplastics. *Journal of Hazardous materials Letters* 3. 100052
- Li J., Song Y., Cai Y., 2020: Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution* 257. 113570
- Li L., Yang J., Zhou Q., Peijnenburg W.J.G.M., Luo Y., 2020: Uptake of Microplastics and Their Effects on Plants. *Microplastics in terrestrial Environments* 95. 279-298
- Li Yee M.S., Hii L., Looi C.K., Lim W., Wong S., Kok Y., Tan B., Wong C., Leong C., 2021: Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human health. *Nanomaterials* 2021/11. 496
- Liu M., Song Y., Lu S., Qiu R., Hu J., Li X., Bigalke M., Shi H., He D., 2019: A method for extracting soil microplastics through circulation of sodium bromide solutions. *Science of the Total Environment* 691. 341-347
- Lv L., Yan X., Feng L., Jiang S., Lu Z., Xie H., Sun S., Chen J., Li C., 2021: Challenge for the detection of microplastics in the environment. *Water Environment research* 93. 5-15
- Maaß S., Daphi D., Lehmann A., Rilling M. C., 2017: Transport of Microplastic by two collembolan species. *Environmental Pollution* 225. S. 456-459
- Mansa R., Zou S., 2021: Thermogravimetric analysis of micropolastics: A mini review. *Environmental Advances* 2021/5. 100117
- Masarykova Univerzita, Nukleární Magnetická Rezonance, Moravec Z., MUNI, 25 s
- Möller J.N., Löder M.G.J., Laforsch C., 2020: Finding Microplastics in Soils: A review of Analytical Methods. *Environmental Science & Technology* 54. 2078-2090

- Nguyen B., Claveau-Mallet D., Hernandez L.M., Xu E.G., Farner J.M., Tufenkiji N., 2019: Separation and Analysis of Microplastics and Nanoplastics in Complex Environmental Samples. *Accounts of Chemical Research* 52. 858-866
- Palansooriya K.N., Shaheen S.m., Chen S.S., Tsang D.C.W., Hashimoto Y., Hou D., et al., 2020: Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environ. Int.* 134, 109677
- Pathak VM, Navneet, 2017: Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresour. Bioprocess*, 4, 15
- Paul A., Wander L., Becker R., Goedecke C., Braun U., 2019: High-throughput NIR spectroscopic (NIRS) detection of microplastics in soil. *Environmental Science and Pollution Research* 26. 7364-7374
- Peñalver R., Arroyo-Manzanares N., López-García I., Hernández-Córdoba M., 2020: An overview of microplastics characterization by thermal analysis. *Chemosphere* 242. 125170
- Perez C.N., carré F., Hoarau-Belkhiri A., Joris A., Leonards P.E.G., Lamoree M.H., 2022: Innovations in analytical methods to assess the occurrence of microplastics in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2022/10. 107421
- Petersen F., Hubbart J. A., 2020: The occurrence and transport of microplastics: The state of the science. *Science of the Total Environment* 758. 143936
- Qi Y., Yang X., Pelaez A.M., Huerta Lwanga E., Beriot N., Gertsen H., Garbeva P., Geissen V., 2018: Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Science of the Total Environment* 645. 1048-1056
- Rillig M.C., 2018: Microplastic Disguising As Soil Carbon Storage. *Environmental Science & Technology* 52. 6079-6080
- Rodríguez-Seijo A., Lourenco J., Rocha-Santos T.A.P., da Costa J., Duarte A.C., Vala H., Pereira R., 2017: Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché. *Environmental Pollution* 220. 495-503

- Sajjad M., Huang Q., Khan S., Khan M.A., Liu Y., Wang J., Lian F., Wang Q., Guo G., 2022: Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental technology & Innovation* 27. 102408
- Scopetani C., Chelazzi D., Mikola J., Leiniö V., Heikkinen R., Cincinelli A., Pellinen J., 2020: Olive oil-based method for the extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples. *Science of the Total Environment* 733. 139338
- Shan J., Zhao J., Liu L., Zhang Y., Wang X., Wu F., 2018: A novel way to rapidly monitor microplastics in soil by hyperspectral imaging technology and chemometrics. *Environmental Pollution* 238. 121-129
- Smarticular.net, 2019: Lepší život bez plastů. KAZDA s.r.o., Brno: 285 s., ISBN: 978-80-88316-44-2
- Sun X.D, Yuan X., Jia Y., Feng L., Zhu F., Dong S., Liu J., Kong X., Tian H., Duan J., Ding Z., Wang S., Xing B., 2020: Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Nanotechnology* 15. 755-760
- Swee-li Yee M., Hii L.W., Looi C.K., Lim W.M., Wong S.F., Kok Y.Y., Tan B.K., Wong C.Y., Leong C.O., 2021: Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *Nanomaterials* 496. 103390
- Thomas D., Schütze B., Heinze W.M., Steinmetz Z., 2020: Sample Preparation Techniques for the Analysis of Microplastics in Soil – A Review. *Sustainability* 2020/12. 9074
- Tian L., Jinjin Ch., Ji R., Ma Y., Yu X., 2022: Microplastics in agricultural soils: sources, effects and their fate. *Enironmental Science & Health* 25. 100311
- Tirkey A., Upadhyay L. S. B., 2021: Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Marine Pollution Bulletin* 170. 112604
- Wan Z., Wang C., Shen M., Wang X., Fu Z., Jin Y., 2019: Effects of polystyrene microplastics on the composition of the microbiome and metabolism in larval zebrafish. *Chemosphere* 217. 646-658

- Wang J., Liu X., Li Y., Powell T., Wang X., Wang G., Zhang P., 2019: Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Science of the Total Environment* 691. 848-857
- Wang Q., Adams C.A., Wang F., Sun Y., Zhang S., 2022: Interactions between microplastics and soil fauna: A critical review. *Environmental Science and Technology* 52:18. 3211-3243
- Wang Z., Sedighi M., 2020: Filtration of microplastics sphere by biochar: removal efficiency and immobilisation mechanisms. *Water research* 184. 116165
- Ya H., Jiang B., Xiang Y., Zhang T., Lv M., Wang X., 2021: Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment. *Science of the Total Environment* 798. 149338
- Ya H., Xing Y., Zhang T., Lv M., Jiang B., 2022: LDPE microplastics Affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics. *Applied Soil Ecology* 180. 104623
- Yu Q., Hu X., Yang B., Zhang G., Wang J., Ling W., 2020: Distribution, abundance and risks of microplastics in the environment. *Chemosphere* 249. 126059
- Zhang S., Yang X., gertsen H., Peters P., Salánki T., geissen V., 2018: A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil. *Science of the Total Environment* 616-617. 1056-1065
- Zhang Y., Zhang X., Li X., He D., 2022: Interaction of microplastics and soil animals in agricultural ecosystems. *Environmental Science & Health* 2022/26. 100327
- Zhang Z., Cui Q., Chen L., Zhu X., Zhao S., Duan C., Zhang X., Song D., Fang L., 2022: A critical review of microplastics in the soil-plant system: Distribution, uptake, phytotoxicity and prevention. *JHournal of Hazardous materials* 424. 127750
- Zhao S., Zhang Ya., Qiu Z., He Y., Zhang Yu.,2022: Towards a fast and generalized microplastics quantification method in soil using terahertz spectroscopy. *Science of the Total Environment* 841. 156624

10.2 Legislativní zdroje

- Dr. Leonor Garcia, 2018: *Plastics 2030 – A voluntary Commitment for a circular and resource efficient Europe*

- Evropská komise 2018: Evropská strategie pro plasty v oběhovém hospodářství, Brusel
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/904 ze dne 5. června 2019 o omezení dopadu některých plastových výrobků na životní prostředí
- Vyhláška č. 47/2023 Sb., Vyhláška o provedení některých ustanovení zákona o omezení dopadu vybraných plastových výrobků na životní prostředí
- Zákon č. 243/2022 Sb., Zákon o omezení dopadu vybraných plastových výrobků na životní prostředí
- Zákon č. 244/2022 Sb., Zákon, kterým se mění některé zákony v souvislosti s přijetím zákona o omezení odpadu vybraných plastových výrobků na životní prostředí

11. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH

11.1 Seznam obrázků

Obr. 1 - Tvary, zdroje a základní dělení mikroplastů (Helmberger et al, 2019).....	1
Obr. 2 - Schéma různých způsobů, jak mohou půdní organismy ovlivnit výskyt mikroplastů, jejich distribuci a potenciální účinky na další půdní organismy (Helmberger et al, 2019)	3
Obr. 3 - Schema postupu extrakce mikroplastů s použitím olivového oleje (Scopetani et al, 2020)	6
Obr. 4- Schéma zařízení pro cirkulační separaci mikroplastů z půdy (Liu et al, 2019)	8
Obr. 5 - 3D vykreslení opticko-mechanického nástavce pro chytré telefony a jeho součástí používaných k pořizování mikroskopických snímků s příkladem snímku pořízeného tímto přístrojem (Leonard et al, 2022)	9
Obr. 6 - Vliv mikroplastů na fyzikálně-chemické vlastnosti půdy a jejich vliv na růst rostlin; zdroj: Khalid et al., 2020.....	18
Obr. 7 Burňák lední a množství extrahovaných plastů z jeho těla, vystaveno v Národním přírodovědném muzeu Dublin (Irsko). Zdroj: Soukromý archiv autorky práce.....	21

11.2 Seznam tabulek

tab. 1 - Nepříznivé účinky mikroplastů na půdní živočichy (Zhang Y. et al, 2022).....	15
tab. 2 - Výskyt a charakteristika mikroplastů v různých komoditách potravin a nápojů (Cverenkárová et al. 2021)	19
tab. 3 - Souhrn potenciálních toxických účinků mikro a nanoplastů na lidské zdraví (Swee-li Yee et al. 2021).....	23