

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**TESTIRANJE METODE VZORČENJA MIKROPLASTIKE NA
OSNOVI ČRPANJA IN FILTRACIJE
V REKAH PAKA IN SAVINJA**

NIKA KOTNIK

VELENJE, 2025

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**TESTIRANJE METODE VZORČENJA MIKROPLASTIKE NA
OSNOVI ČRPANJA IN FILTRACIJE V REKAH PAKA IN
SAVINJA**

NIKA KOTNIK

Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentor: doc. dr. Anja Bubik

VELENJE, 2025

Številka: 726-14/2024-2

Datum: 4. 9. 2024

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Študentka Fakultete za varstvo okolja **Nika Kotnik** lahko izdela diplomsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Testiranje metode vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije v rekah Paka in Savinja

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

Testing a microplastic sampling method based on pumping and filtration in the Paka and Savinja rivers

Mentorica: **viš. pred. dr. Anja Bubik**

Diplomsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom FVO.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat FVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.



Prof. dr. Boštjan Pokorny
dekan



Fakulteta za varstvo okolja

Trg mladosti 7 | 3320 Velenje

t: 03 898 64 10 | e: info@fvo.si

www.fvo.si



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Nika Kotnik**, z vpisno številko **34210009**, študentka visokošolskega strokovnega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtorica diplomskega dela z naslovom:

Testiranje metode vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije v rekah Paka in Savinja, ki sem ga izdelala pod mentorstvom doc. dr. Anje Bubik.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- da oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili FVO;
- da so vsa dela in mnenja drugih avtorjev navedena v seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili FVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na FVO;
- je diplomsko delo jezikovno korektno in da je delo lektorirala Alja Polenek.
- da dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani FVO;
- da sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični.

V Velenju, dne _____

Podpis avtorice: _____

ZAHVALA

Za vse nasvete, pomoč, ves vložen čas in usmeritve pri nastajanju diplomskega dela se zahvaljujem mentorici doc. dr. Anji Bubik.

Zahvaljujem se Aljoši za nasvete in pomoč pri izvedbi.

Prav tako se zahvaljujem družini in prijateljem za vso izkazano podporo in potrpežljivost med pisanjem diplomskega dela.

IZVLEČEK

Plastika je v današnjem svetu zelo velik globalni problem, o katerem se v zadnjem času veliko govori. Je onesnažilo, ki predstavlja resno grožnjo tako okolju kot tudi ljudem in drugim organizmom, saj jo lahko dandanes zaradi njene razširjenosti in majhnosti najdemo praktično povsod.

V diplomskem delu smo testirali metodo vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije, ki so jo razvili na Fakulteti za varstvo okolja, v dveh manjših rekah – Paki in Savinji. Preverili smo primernost metode za vzorčenje mikroplastike v manjših vodnih telesih ter prisotnost in količino mikroplastike v dveh vodotokih.

Vzorčenje z napravo FVO smo izvedli dvakrat na štirih lokacijah vsake izbrane reke. V prvem delu smo z vzorčevalnikom FVO prečrpali vodo iz rek Pake in Savinje, v drugem pa vzorce analizirali za vsebnost mikroplastike v laboratoriju.

Rezultati analiz so pokazali, da je v rekah Paka in Savinja prisotna manjša količina mikroplastike. Kljub majhni količini je podatek zaskrbljujoč, saj sta obe manjši reki znani kot čisti in neonesnaženi. Vsebnost mikroplastike v reki Paki pri prvem vzorčenju je bila 11 mikroplastičnih delcev/ m^3 , pri drugem vzorčenju pa 7 mikroplastičnih delcev/ m^3 . V reki Savinji smo pri prvem vzorčenju našli 4 mikroplastične delce/ m^3 , pri drugem vzorčenju pa 1 mikroplastični delec/ m^3 . Takšni rezultati kažejo na resnost problematike mikroplastike v današnjem svetu, saj je mikroplastika dandanes prisotna že povsod, tudi v manjših rekah in drugih vodnih telesih. Prisotnost mikroplastike lahko ima velik negativen vpliv na ljudi in živali.

Vzorčenje in analiza sta pokazala, da je metoda vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije primerna za vzorčenje mikroplastike v rekah Paka in Savinja. Čeprav je v celoti časovno zamudna, je vzorčenje hitro in enostavno. Metoda hkrati omogoča enostaven pristop k vodi in je primerna za vzorčenje mikroplastike tako v manjših kot tudi večjih rekah ter drugih vodnih telesih. Poudariti je treba, da metoda zaradi svojega dolgotrajnega postopka ni povsem zanesljiva, saj lahko pride do kontaminacije. Primerna bi bila nadgradnja vzorčevalnika FVO, ki bi zagotavljala boljše in natančnejšo analizo.

Menimo, da bi bilo pomembno uvesti standardizirano metodo za vzorčenje mikroplastike v rekah. Prav tako bi bilo dobro nadzorovati vnos mikroplastike ter izvajati redno analizo njene prisotnosti tako v rekah kot tudi vseh drugih vodnih telesih. Predvsem pa je smiselno razmišljati o nadgradnji prototipa, ki bi povečala zanesljivost vzorčenja mikroplastike iz vodnih teles.

Ključne besede: mikroplastika, črpanje, filtracija, reke, analiza, vzorčenje, testiranje

ABSTRACT

Plastic is a very big global problem in today's world, which has been discussed a lot recently. It is a pollutant that poses a serious threat to both the environment and humans and other organisms, as it can be found practically everywhere nowadays due to its prevalence and small size.

In the diploma thesis, we tested the microplastic sampling method based on pumping and filtration, which was developed at the Faculty of Environmental Protection, in two smaller rivers - Paka and Savinja. We checked the suitability of the method for sampling microplastics in smaller water bodies and the presence and amount of microplastics in two watercourses.

Sampling with the FVO device was carried out twice at four locations of each selected river. In the first part, we pumped water from the Paka and Savinja rivers with the FVO sampler, and in the second, the samples were analyzed for microplastic content in the laboratory.

The results of the analyses showed that a small amount of microplastics is present in the Paka and Savinja rivers. Despite the small amount, the data is worrying, as both smaller rivers are known to be clean and unpolluted. The content of microplastics in the Paka River during the first sampling was 11 microplastic particles/m³, and during the second sampling it was 7 microplastic particles/m³. In the Savinja River, we found 4 microplastic particles/m³ during the first sampling, and 1 microplastic particle/m³ during the second sampling. Such results indicate the seriousness of the microplastic problem in today's world, as microplastics are now present everywhere, even in smaller rivers and other water bodies. The presence of microplastics can have a major negative impact on humans and animals.

Sampling and analysis showed that the microplastic sampling method based on pumping and filtration is suitable for sampling microplastics in the Paka and Savinja rivers. Although it is time-consuming overall, sampling is quick and easy. The method also allows easy access to water and is suitable for sampling microplastics in both smaller and larger rivers and other water bodies. It should be emphasized that the method is not completely reliable due to its time-consuming process, as contamination can occur. An upgrade of the FVO sampler would be appropriate, which would provide better and more accurate analysis.

We believe that it would be important to introduce a standardized method for sampling microplastics in rivers. It would also be good to monitor the input of microplastics and conduct regular analysis of their presence in rivers and all other water bodies. Above all, it makes sense to consider upgrading the prototype to increase the reliability of sampling microplastics from water bodies.

Key words: microplastics, pumping, filtration, rivers, analysis, sampling, testing

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Namen in cilji	2
1.2	Hipotezi.....	2
2	MIKROPLASTIKA	3
2.1	Vpliv mikroplastike na okolje	6
2.2	Zakonodaja	8
2.3	Metode vzorčenja mikroplastike v vodnih telesih.....	9
2.3.1	Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo manta mreže	9
2.3.2	Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo planktonske mreže	10
2.3.3	Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo črpalke z ročnim presejevanjem vzorca	11
2.4	Vzorčevalnik FVO	11
2.4.1	Opis naprave.....	11
2.4.2	Princip delovanja	12
3	MATERIALI IN METODE	14
3.1	Izbor testnih lokacij na rekah Paka in Savinja	14
3.1.1	Reka Paka	14
3.1.2	Reka Savinja.....	16
3.2	Metoda vzorčenja in analize mikroplastike v vodi	17
3.3.1	Spremljanje fizikalno-kemijskih parametrov	17
3.3.2	Vzorčenje delcev v rečni vodi	18
3.3.3	Analiza mikroplastike v vzorcih	18
3.3.4	Kontrolne meritve	20
4	REZULTATI IN DISKUSIJA.....	22
4.1	Fizikalno-kemijski parametri.....	22
4.2	Vsebnost mikroplastike v reki Paki in Savinji.....	24
4.2.1	Povezanost onesnažil s potencialnimi viri onesnaževanja.....	31
4.3	Kontrolne meritve.....	33
	A: Slepi vzorec oz. test kontaminacije	33
	B: Test pozitivne kontrole.....	34
	C: Test meritve pretoka.....	34
4.4	Primerjava učinkovitosti metode črpanja vode z drugimi obstoječimi metodami za vzorčenje vode.....	36
5	SKLEPI	37
6	POVZETEK.....	39
7	SUMMARY.....	40
8	VIRI IN LITERATURA.....	41

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz porabe plastike v Evropi za leto 2022 (Vir: Plastics Europe, 2023).....	3
Slika 2: Odpadni tekstil (Vir: Pismo Srca, 2023).....	5
Slika 3: Eurythenes plasticus (Vir: Oceanographic, 2020).....	6
Slika 4: Odpadna plastika na bregovih reke Pake (levo) in Savinje (desno) (Vir: Anja Bubik, 2024).....	7
Slika 5: Manta mreža z označenimi deli (prirejeno po Ocean instruments, 2025).	9
Slika 6: Manta mreža za vzorčenje mikroplastike (Vir: NOAA's Fisheries Collection, 2010). .	10
Slika 7: Planktonska mreža (Vir: KC Denmark, 2025).....	10
Slika 8: Vzorčevalnik FVO z vozičkom ter vtočnimi in iztočnimi cevmi (Vir: lasten)	11
Slika 9: Vzorčevalnik FVO (Aljoša Krajnc, 2024)	13
Slika 10: Izbrane lokacije na reki Paki (Aljoša Krajnc, 2024).....	15
Slika 11: Izbrane lokacije na reki Savinji (Aljoša Krajnc, 2024)	16
Slika 12: Multimetrski terenski kovček Multi 3620 IDS (Vir: lasten)	17
Slika 13: FTIR spektrometer (Vir: lasten)	19
Slika 14: Košček vrečke ter delec iz vzorca (Vir: lasten)	24
Slika 15: Navojni pokrov filtrirne komore (Vir: lasten).....	25
Slika 16: Spekter polipropilena (modro) in organskega materiala (zeleno), narejen s FTIR analizo (Vir: lasten).....	25
Slika 17: Kontaminiran vzorec z modrimi PP delci na filter papirju (Vir: lasten)	27
Slika 18: Vlakna na filterpapirju pod lupo (Vir: lasten)	32
Slika 19: Različni mikroplastični delci pod stereo mikroskopom (Vir: lasten).....	38

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz lokacij na reki Paki	15
Preglednica 2: Prikaz lokacij na reki Savinji	16
Preglednica 3: Fizikalno-kemijski parametri prvega vzorčenja na reki Paki	22
Preglednica 4: Fizikalno - kemijski parametri prvega vzorčenja na reki Savinji	22
Preglednica 5: Fizikalno-kemijski parametri drugega vzorčenja na reki Paki	23
Preglednica 6: Fizikalno-kemijski parametri drugega vzorčenja na reki Savinji	23
Preglednica 7: Rezultati mikroplastičnih delcev prvega vzorčenja na reki Paki	26
Preglednica 8: Rezultati mikroplastičnih delcev prvega vzorčenja na reki Savinji	27
Preglednica 9: Število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v septembru 2024	28
Preglednica 10: Rezultati mikroplastičnih delcev drugega vzorčenja na reki Paki	29
Preglednica 11: Rezultati mikroplastičnih delcev drugega vzorčenja na reki Savinji	30
Preglednica 12: Število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v februarju 2025	30
Preglednica 13: Rezultati testov kontaminacije	33
Preglednica 14: Rezultati testa pozitivne kontrole	34
Preglednica 15: Rezultati testov meritev pretoka	34
Preglednica 16: Število mikroplastičnih delcev/m ³ glede na vzorčenje v rekah Paki in Savinji	37

1 UVOD

Mikroplastika v sodobni okoljski realnosti predstavlja vse večji globalni problem, s katerim se soočamo vsakodnevno. Je problematika, o kateri se veliko govori. Je onesnažilo, ki predstavlja veliko grožnjo tako okolju kot tudi ljudem in drugim organizmom, saj jo lahko dandanes zaradi njene razširjenosti in majhnosti najdemo praktično povsod.

Mikroplastiko predstavljajo vsi plastični delci, manjši od 5 mm, ki jih lahko proizvajamo v takšnih dimenzijah, ali pa nastanejo z razpadom večjih delcev plastike ob uporabi ali ko nastane odpadki. Mikroplastiko v vodnih ekosistemih raziskujejo že več kot 45 let, pri tem pa se raziskovalci velikokrat osredotočajo predvsem na morske ekosisteme (Scherer et al., 2020). Zaradi njene majhnosti jo lahko zaužijejo tudi vodni organizmi, kar lahko močno negativno vpliva na njihovo preživetje, telesno pripravljenost, reprodukcijo in zdravje na splošno. Vedno večji problem predstavlja mikroplastika v sladkovodnih celinskih sistemih, kot so manjša jezera in reke, ki delujejo kot pomembne transportne poti mikroplastike in jo tako zanašajo dalje v vse večje vodne sisteme in posledično morja (Kunz et al., 2023).

Literature oz. smernic glede vzorčenja mikroplastike v vodnih sistemih je zaenkrat malo, kar predstavlja velik izziv vsem raziskovalcem na področju odkrivanja mikroplastike v vodnih telesih, predvsem v manjših rekah in vodotokih. Kar nekaj je dostopnih raziskav na področju odkrivanja mikroplastike v sladkovodnih telesih, vendar je podatke med seboj zelo težko primerjati, saj ni določene zakonodaje in postopkov, s katerimi bi lahko enotno izvedli postopke vzorčenja in identifikacije mikroplastike v vodnih okoljih in jih nato med seboj primerjali. Primerjanje vsebnosti mikroplastike v vodnih okoljih je zato zelo nezanesljivo.

Raziskave na področju vsebnosti mikroplastike v manjših rekah in vodotokih imajo zelo pomembno vlogo pri odkrivanju pomembnih transportnih poti mikroplastike v večje reke in jezera ter nato dalje v morja. Z raziskavami bi lahko identificirali največje onesnaževalce ter tako preprečili in omejili vnos mikroplastike v vodna telesa, kar bi pomembno vplivalo na okolje in organizme.

1.1 Namen in cilji

Namen diplomskega dela je bil izpostaviti problematiko mikroplastike v rekah, poudariti pomen monitoringa le-te v manjših vodotokih kot pomembnih transportnih poteh mikroplastike v okolju ter prispevati k boljšemu razumevanju ter obvladovanju tega okoljskega izziva.

Glavni namen diplomske naloge je bil testirati metodo vzorčenja mikroplastike v vodi manjših rek z uporabo vzorčevalnika FVO na osnovi črpanja in prenosne vakuumске črpalke. Vsebnosti mikroplastike smo preverjali na dveh glavnih vodotokih SAŠA regije – reki Paki in Savinji. Določili smo različne lokacije vzorčenja vzdolž obeh vodotokov ter testirali ustreznost metode črpanja vode za učinkovito zaznavanje in kvantificiranje mikroplastike v vodnih telesih, ker trenutno na nivoju EU še ni določene standardizirane metodologije.

Osnovni cilji diplomskega dela so:

1. Določitev ustreznih lokacij vzorčenja na rekah Paka in Savinja glede na različne dejavnike, kot so dostopnost, potencialni viri onesnaženja, hidrodinamične lastnosti vodnih teles, možnost vzorčenja;
2. Testiranje metode vzorčenja mikroplastike z uporabo vzorčevalnika FVO na izbranih lokacijah;
3. Analiza zbranih vzorcev vode in določitev vsebnosti mikroplastike na izbranih lokacijah;
4. Evalvacija ustreznosti metode na osnovi črpanja za izbrano območje vodotokov Pake in Savinje;

Ob koncu testiranja želimo tudi:

5. Oceniti učinkovitost in uporabnost metode črpanja vode manjših vodotokov z drugimi obstoječimi metodami vzorčenja mikroplastike v vodnih telesih;
6. Analizirati prostorske porazdelitve mikroplastike in preveriti ustreznost merilnih mest oz. vzorčnih lokacij vzdolž vodotokov znotraj SAŠA regije;
7. Identificirati možne vire mikroplastike v proučevanih rekah in povezati najdene vrste mikroplastike s potencialnimi viri onesnaženja;
8. Prispevati k razvoju standardizirane metodologije za vzorčenje in monitoring mikroplastike v manjših rekah, ki bi jo lahko uporabili tudi v vodi drugih podobnih manjših vodnih teles.

1.2 Hipotezi

Pred začetkom dela smo si zastavili dve hipotezi:

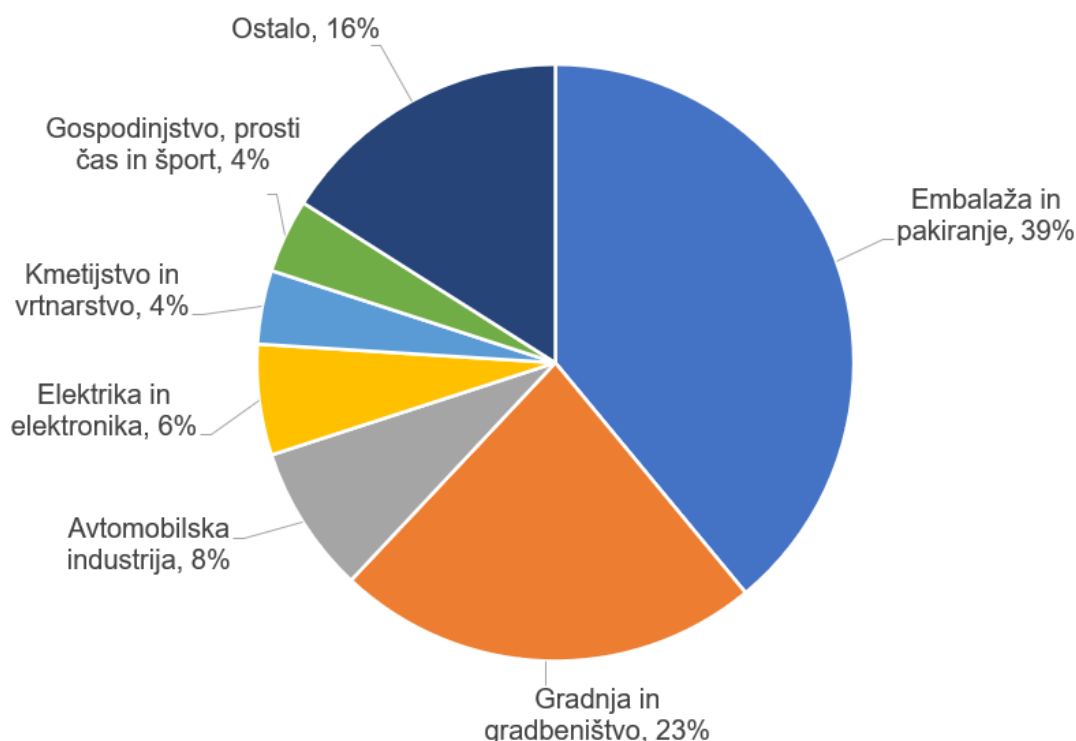
H1: Metoda vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije je primerna za testiranje prisotnosti mikroplastike vzdolž rek Pake in Savinje.

H2: V rekah Paka in Savinja je prisotna mikroplastika.

2 MIKROPLASTIKA

Plastika v sodobni okoljski realnosti predstavlja velik globalni problem. Naše okolje je vedno bolj obremenjeno s plastičnimi odpadki, ki jih lahko dandanes najdemo praktično povsod. Plastika se uporablja največ za pakiranje hrane, v gradbeni, avtomobilski ter v kozmetični industriji, veliko pa je najdemo tudi v kmetijstvu.

Po zadnjih podatkih združenja Plastics Europe smo na svetu leta 2022 proizvedli kar 400,4 megaton plastike, od tega smo 54 megaton plastike proizvedli v Evropi. Večino, to je 39 %, proizvedene plastike, smo v Evropi uporabili za embalažo oz. pakiranje, 23 % v gradnji in gradbeništvu, 8 % v avtomobilski industriji, 6 % v elektronski industriji, 4 % v kmetijstvu ter 4 % v gospodinjstvu, za izdelavo izdelkov za prosti čas ter za šport. 16 % proizvedene plastike smo uporabili v druge namene, bodisi je to bilo za izdelovanje oblačil, v kozmetični industriji ali v kakšen drug namen (Slika 1) (Plastics Europe, 2023).



Slika 1: Prikaz porabe plastike v Evropi za leto 2022 (Vir: Plastics Europe, 2023)

Ker se v zadnjem desetletju povečuje proizvodnja plastike in plastičnih izdelkov, se hkrati povečuje tudi količina plastičnih odpadkov, kar predstavlja velik globalni problem.

Veliko plastike, ki pristane na odlagališčih, tam ne ostane za vedno. S pomočjo živali in naravnih procesov jo velikokrat zanese v morje. Ker imajo plastični izdelki dolgo življenjsko dobo, lahko v naših vodah plavajo tudi več sto let. Kot primer lahko vzamemo izdelke, ki jih uporabljamo vsakodnevno, npr. platenko, katere povprečen čas uporabe je 12 minut, vendar za svoj razkroj potrebuje 450 let. Seveda pa razkroj ni enostaven, saj ta razkroj pomeni prisotnost mikroplastike v okolju, kar lahko vpliva na številne organizme. Mikroplastiko zaradi njene majhnosti danes najdemo praktično povsod (Davidson, 2024).

Mikroplastiko predstavljajo plastični delci, manjši od 5 mm, ki jo lahko proizvajamo v takšnih dimenzijah ali pa nastanejo z razpadom večjih delcev ob uporabi plastike ali ob nastanku

odpadka. Viri mikroplastike med drugim vključujejo tudi industrijske pelete iz proizvodnih obratov in drobljenje večjih plastičnih delcev s fotolizo, abrazijo in mikrobo razgradnjo. Poleg tega nekateri izdelki za osebno nego in čistila vsebujejo mikroplastične abrazive. Lahko se pojavi v odpadnih vodah zaradi odplak iz pralnih strojev, saj lahko te vsebujejo mikroplastična vlakna iz sintetičnega tekstila. Zadnja dva vira sta vzrok, da mikroplastika vstopa v infrastrukturo za komunalne odpadne vode, vendar je čistilne naprave zaenkrat še ne odstranjujejo, saj zakonodaja tega ne zahteva. Čistilne naprave bi lahko opredelili kot pomemben faktor pri onesnaževanju večjih vodnih sistemov z mikroplastiko, seveda pa največ mikroplastike nastane med proizvodnjo in uporabo izdelkov iz plastike. (McCormick et al., 2014).

Glede na njeno velikost razdelimo plastiko v tri skupine; na makroplastiko, mikroplastiko in nanoplastiko.

Med makroplastiko prištevamo večje kose plastike, kot so ribiške mreže, vrečke za živila, plastenke, plastični odpadki, ipd. Sem spadajo vsi delci plastike, ki so večji od 20 centimetrov.

Mikroplastiko predstavljajo vsi delci plastike, v velikosti od 5 mm do 300 makrometrov. Ta je postala sodobno onesnaževalo, ki ga je z naraščajočo proizvodnjo plastičnih izdelkov v naravi vedno več. Mikroplastika nastaja predvsem z razgradnjo in mehanskim drgnjenjem večjih delcev plastike. Problematika mikroplastike je dandanes najbolj zaskrbljujoča in najbolj pogosta tema, saj se mikroplastika danes nahaja že povsod in lahko preko prehranjevalne verige prehaja tudi v naša telesa.

Nanoplastiko predstavljajo delci, ki jih je nemogoče videti s prostim očesom. Ti delci so veliki od 1 nanometra do 1 mikrometra, in prav zato znanstveniki domnevajo, da so ti delci še bolj nevarni od mikroplastičnih. Neposredno se ti delci sproščajo v okolje ali pa nastanejo z razgradnjo večjih kosov plastike v okolju. Zaradi svoje majhnosti lahko s pomočjo prehranjevalne verige ali vdihanega zraka zaidejo v telesa ljudi in živali, kjer se kopičijo in lahko privedejo do resnih posledic.

Glede na njen izvor razdelimo mikroplastiko v dve večji skupini, na primarno in sekundarno.

Primarno mikroplastiko predstavljajo tisti delci plastike, ki so že prvotno proizvedeni v velikosti, manjši od 5 mm. Sem uvrščamo plastične pelete, granule, vlakna in druge manjše delce. V okolje pridejo že neposredno v obliki manjših delcev in po ocenah predstavljajo 15 – 31 % vse mikroplastike v oceanih. Največ primarne mikroplastike nastaja pri pranju sintetičnih oblačil, in sicer kar 35 % primarne mikroplastike. Med drugim sta vira primarne mikroplastike še površinska obraba pnevmatik zaradi vožnje (28 %) ter uporaba proizvodov za osebno nego (2 %), npr. mikro kroglice v kremah za piling obraza (Evropski parlament, 2018).

Sekundarna mikroplastika nastaja kot stranski produkt velikih kosov plastike, ki razpadejo na manjše koščke zaradi mehanskih in naravnih vplivov (Slika 2). Nastaja pri razgradnji večjih plastičnih izdelkov, kot so plastične vrečke, plastenke, ribiške mreže ipd. Predstavlja 69 – 81 % vse mikroplastike v oceanih (Evropski parlament, 2018).



Slika 2: Odpadni tekstil (Vir: Pismo Srca, 2023)

2.1 Vpliv mikroplastike na okolje

Onesnaževanje z mikroplastiko so najprej začeli raziskovati v morskih ekosistemih. Najnovejše raziskave so pokazale prisotnost mikroplastike v vseh morskih sistemih po svetu, vključno z pelagičnimi conami, obalnimi vodami, obalnimi sedimenti, plažami in globokimi oceani (McCormick et al., 2014). Znanstveniki ocenjujejo, da 80 % plastike v morju izvira iz celinskih virov in v morja pridejo s pomočjo večjih rek. Kvantitativni prispevek rek kot virov mikroplastike je potrebno še ugotoviti. Doslej je bilo raziskav s področja sladkovodnih sistemov bolj malo in je na voljo malo kvantitativnih podatkov o količini in porazdelitvah, kategorijah in vrstah mikroplastike v rekah (Mani et al., 2015). Raziskovalci se s številnimi projekti trudijo k odkrivanju novih tehnologij in rešitev, ki bi prispevale k odkrivanju, zbiranju in preprečevanju nastajanja smeti, predvsem plastike in mikroplastike v vodnih telesih.

Raziskovalci so odkrili prisotnost mikroplastike celo v precej ekstremnem, človeku nedostopnem delu sveta; in sicer v prej nepoznani vrsti globokomorskih amfipodov, ki so jih odkrili v Marianskem jarku – najglobljem jarku na svetu. Poimenovali so jo po plastiki, ki jo je vrsta zaužila, in sicer *Eurythenes plasticus* (Slika 3). Ta najdba nakazuje na resnost in vseprisotnost problematike mikroplastike v morju (Weston et al., 2020).



Slika 3: *Eurythenes plasticus* (Vir: Oceanographic, 2020)

Plastika lahko sprošča strupene kemikalije, kot so poliklorirani bifenil (PCB), kar lahko vpliva na kakovost vode na splošno, in na stanje organizmov, ki plastiko zaužijejo. Poleg tega hidrofobna površina mikroplastike zlahka absorbira obstojna organska onesnaževala (POPs), ki se pojavijo v nizkih koncentracijah v okolju (McCormick et al., 2014). Mikroplastika kot onesnažilo ogroža vodo in sladkovodne ekosisteme, saj vsebuje škodljive kemikalije, ki imajo sposobnost adsorpcije. Takšni aditivi lahko imajo kancerogen vpliv, prav tako pa lahko delujejo kot hormonski motilci.

Poleg tega ima plastika počasno stopnjo razgradnje in lahko ostane v okolju tudi stotine let. Mikroplastika se prenaša z ene biološke ravni na drugo in vsebuje tudi veliko količino kemičnih dodatkov, kot so antioksidanti, kemikalije za obdelavo, barvila in pigmente ter absorbirajo hidrofobna onesnaževala iz okolice (Mani et al., 2015). Veliko preteklih raziskav je osredotočenih predvsem na mikroplastiko v morskih ekosistemih, sladkovodna okolja pa so deležna manjše pozornosti. Komaj v zadnjih letih so sladkovodna okolja začela dobivati več

pozornosti in se veliko izvajajo raziskave s področja mikroplastike na večjih in tudi manjših rekah (Kunz et al., 2023).

Veliko morskih organizmov različnih velikosti in trofičnih ravni, od zooplanktona do sesalcev, mikroplastiko tudi pogosto zaužije. Lahko pa se prenese tudi na plenilca, če ta plen zaužije (McCormick et al., 2014). Zaužitje mikroplastike lahko ima močan negativen vpliv na preživetje, telesno pripravljenost, reprodukcijsko zmogljivost in zdravje organizmov (Mani, et al., 2015). Prav tako se lahko mikroplastika znajde tudi na naših krožnikih, če manjše plastične delce pred tem zaužijejo ribe in organizmi, ki jih nato zaužijemo ljudje.

Mikroplastika lahko ima velik negativen vpliv na zdravje ljudi. V naše telo lahko vstopi predvsem z zaužitjem (preko hrane in vode), vdihavanjem in potencialno tudi skozi kožo. Čeprav je raziskovanje vpliva mikroplastike v telesu ljudi še v začetnih fazah raziskovanja, so znanstveniki že ugotovili več negativnih učinkov. Ti majhni delci plastike se lahko v telesu kopičijo ter tako povzročijo več negativnih posledic, kot so vnetni odzivi v telesu, zlasti v prebavnem traktu. Mikroplastika v prebavnem traktu lahko moti naravno črevesno floro, kar lahko vpliva na prebavo ter imunski sistem. Delci lahko v naših telesih povzročijo oksidativni stres, ki lahko poškoduje celice in tkiva. Mikroplastika lahko v človeških telesih deluje kot hormonski motilec, kar lahko ima velik negativen vpliv na reprodukcijsko zdravje ter razvoj otroka v materinem telesu (Proshad et al., 2018). Mikroplastika lahko v človeškem telesu povzroči različne motnje, od prirojenih okvar do raka, poškoduje lahko živčni ter imunski sistem ter vpliva na kri in ledvice.

Reke imajo veliko istih virov mikroplastike kot morski ekosistemi in ekosistemi večjih jezer ter imajo manjšo količino vode za redčenje. Manjše reke, ki tečejo skozi mesta in imajo čistilne naprave, bodo vseeno najverjetneje vsebovale visoke koncentracije mikroplastike, predvsem zaradi manjše količine pretoka in zaradi slabe samočistilne sposobnosti oz. zmožnosti prečiščevanja mikroplastike. Reke lahko mikroplastiko zadržijo in jo prenesejo navzdol v večja vodna telesa z večjim potencialom za številne biološke interakcije z rečno bioto (Slika 4). Tako mikroplastika pomembno vpliva na rečne ekosisteme in ti igrajo pomembno vlogo pri »življenjskem krogu« mikroplastike (McCormick et al., 2014).



Slika 4: Odpadna plastika na bregovih reke Pake (levo) in Savinje (desno) (Vir: Anja Bubik, 2024)

2.2 Zakonodaja

Majhen obseg zakonodaje in smernic glede vzorčenja mikroplastike v vodnih sistemih predstavlja zelo velik izziv vsem raziskovalcem s področja odkrivanja mikroplastike v vodnih telesih, predvsem v manjših rekah in vodotokih. Odkrivanje mikroplastike v manjših vodnih ekosistemih je ključnega pomena za identifikacijo in določitev virov mikroplastike v vodnem okolju in posledično odkrivanje največjih onesnaževalcev ter preprečitev vnašanja plastike v okolje (Kunz et al., 2023).

V letu 2023 smo v EU uvedli prvo zakonsko prepoved, vezano na mikroplastiko. 25. septembra 2023 je Evropska komisija v okviru zakonodaje REACH sprejela uredbo o omejevanju mikrododajal sintetičnih polimerov samih ali namerno dodanim mešanici. Uredba je znana kot omejitev plastike in prepoveduje prodajo in uporabo izdelkov, ki vsebujejo namensko dodano mikroplastiko. Uredba zajema omejevanje mikroplastičnih delcev, kot so plastične bleščice, same ali namerno dodane izdelkom (kompleti za umetnost, obrt, igrače), v kozmetiki, detergentih, polnilih na umetni travi in drugih izdelkih (Evropska komisija, 2023).

Uredba in posledično omejitve ne zajemajo izdelkov (vključno z bleščicami), izdelanih iz materiala, ki je anorganski, naraven, biorazgradljiv ali topen v vodi, perla in bleščice, ki so namenjene za šivanje ter mikroplastiko. Sem sodijo plastične bleščice, ki se zadržijo s tehničnimi sredstvi ali med uporabo izgubijo mikroplastično naravo ali so ujele v drugih materialih (npr. v lepilu, barvah ali nekaterih črnilih ali znotraj trdnih predmetov). Uredba dovoljuje tudi uporabo izdelkov, ki so že v skladu z uredbo REACH (registracija, evalvacija, avtorizacija in omejevanje kemikalij) (Evropska komisija, 2023).

Standardne metode za vzorčenje mikroplastičnih delcev

Znanstveniki v svetu si že leta prizadevajo razviti metodo za natančno analizo mikroplastike v vodnih telesih. Prizadevanja za standardizacijo na področju mikroplastike tako potekajo že več let, vendar so še vedno v zelo zgodnjih fazah razvoja. Prihajajoči standardi naj bi pospešili proces z uvedbo bolj specifičnih analizičnih protokolov, kot primer bi lahko vzeli ISO 24187 standard, ki je bil objavljen leta 2023, in vsebuje načela za analizo mikroplastike v okolju. Del ISO standarda 16094 je trenutno v fazi osnutka, uradna objava pa se pričakuje v letu 2025. Standard bo vseboval protokole za določevanje kakovosti vode s področja analize mikroplastike v vodi (Anssi Rajala, 2024).

2. del standarda ISO 16094 opisuje preskusni postopek za analizo koncentracij mikroplastike v vzorcih čiste vode s FTIR in Ramanom, v kombinaciji z optično mikroskopijo. S temi metodami je mogoče pridobiti različne podatke, kot so velikost delcev, število delcev mikroplastike, možno je določevanje plastične sestave, identifikacija drugih delcev, kot so minerali, pigmenti, beljakovine in celuloza. Prav tako je mogoče s to metodo delce razvrstiti po velikosti (Anssi Rajala, 2024).

Pomanjkanje standardnih metod vzorčenja in analize otežuje primerjavo podatkov iz študij in hkrati razumevanje, kaj je izvor in usoda plastike ter predvsem mikroplastike (Shi et al., 2023).

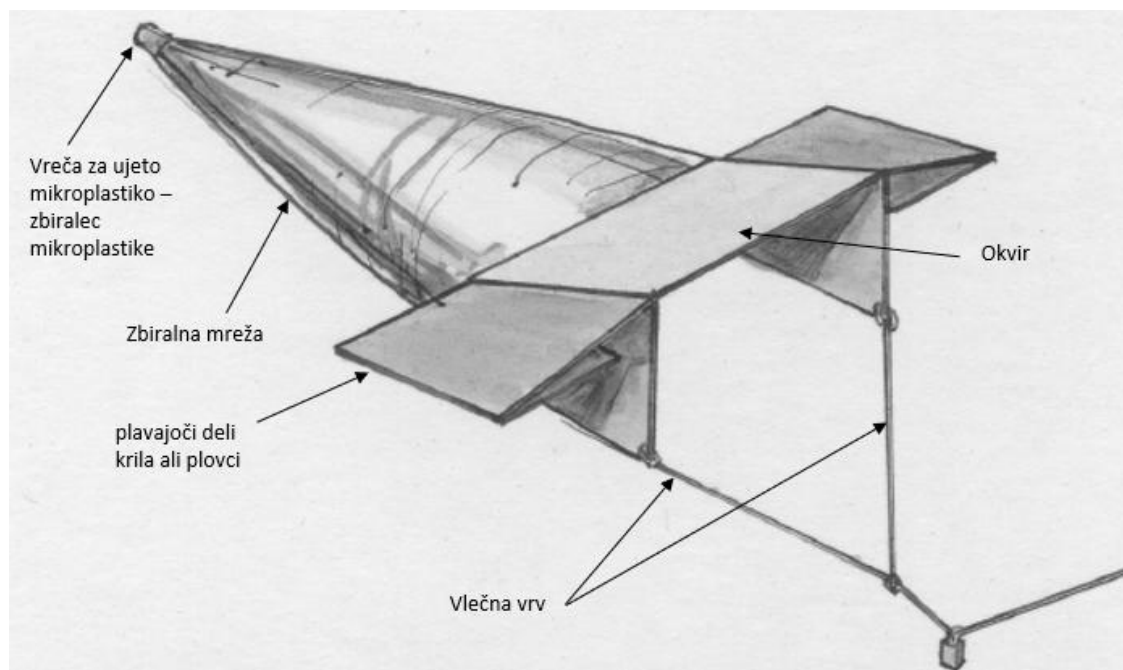
Veliko težavo glede postavitve standardizirane metode predstavlja pomanjkanje doslednosti in primerljivosti rezultatov, saj se za vzorčenje uporabljajo različne velikosti mrež, globine, poročevalske enote in metode priprave. Poleg tega med znanstveniki še ni soglasja ali naj se za količino mikroplastičnih delcev uporablja enota masne enote ali število delcev. Znanstveniki si prizadevajo, da bi se uvedla standardizirana metoda za vzorčenje mikroplastičnih delcev v vodi v rekah ter drugih vodnih telesih.

2.3 Metode vzorčenja mikroplastike v vodnih telesih

Metode za določevanje mikroplastike v vodnih telesih so zelo zamudne in dolgotrajne, prav tako lahko rezultati odstopajo od realnosti. Pri tako občutljivem vzorčenju tako malih delcev, že ob manjšem stiku s plastiko in njenimi polimeri hitro pride do kontaminacije vzorca, zato je takšno vzorčenje zelo zahtevno. Obstaja več metod, ki se danes uporabljajo za določevanje vsebnosti mikroplastike v vodnih okoljih. Nekatere med njimi so:

2.3.1 Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo manta mreže

Ta metoda je primerna za vzorčenje mikroplastike na večjih ali manjših rekah. Pri tem se uporablja manta mreža (Slika 6), ki ima velikost odprtin 300 μm ali 0,3 mm (lahko tudi manj ali več), prostornina same mreže pa je nekje okoli 0,100 m³. Na sredini ali ob manta mreži se nahaja merilec pretoka za merjenje vzorčne površine in volumna. Vzorčenje se izvaja tako, da se manta mreža pritrdi na čoln, celotna odprtina mante pa je med vzorčenjem obrnjena proti dotekajoči vodi. Mreža se nahaja tik pod gladino vode. Manta mreža se na vsaki lokaciji vzorčenja pusti določen čas (med 5 in 60 minut, odvisno od toka). Mreža je med vzorčenjem v negibnem stanju. Vzorčenje lahko poteka tudi tako, da se manta mreža pritrdi na čoln ter se pri nizkih hitrostih (2,5 vozla) vleče določen čas. Vzorčenje je velikokrat odvisno od velikosti vodnega telesa, saj npr. pri uporabi večje manta mreže za vzorčenje potrebujemo tudi plovilo. Po vsakem vzorčenju se iz izvlečene manta mreže odstrani vreča na koncu mreže in ustrezno zaščiti za nadaljnjo analizo. Nato se za naslednje vzorčenje pritrdi čista, prazna vreča. Nadaljnje vzorčenje poteka v laboratoriju, in sicer tako, da se vzorec dobro zaščiti pred kontaminacijo, spira z destilirano vodo ter obdela z različnimi kemikalijami. Postopek je zapleten in dolgotrajen. Na koncu sledi vizualno skeniranje mikroplastike s pomočjo mikroskopa ter analiza s FTIR napravo (Mani et al., 2016; Kunz et.al, 2023). Na Sliki 5 lahko vidimo manta mrežo z vsemi označenimi deli.



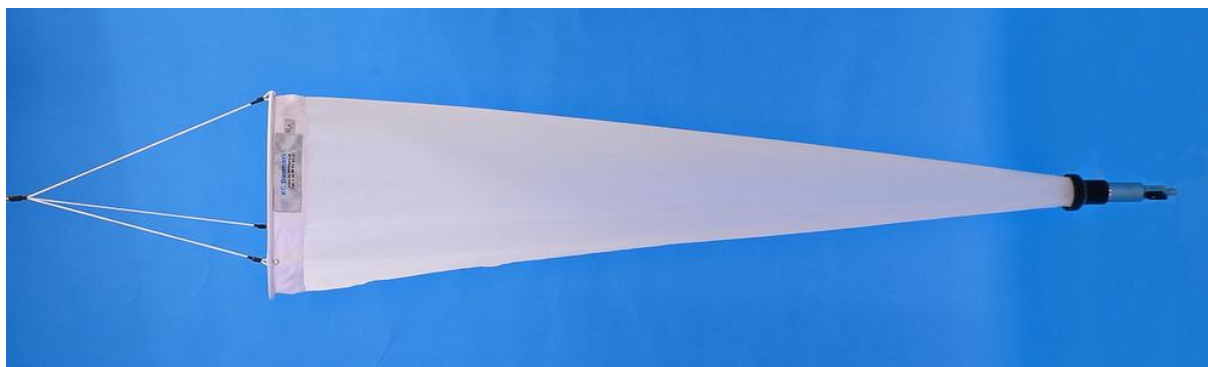
Slika 5: Manta mreža z označenimi deli (prirejeno po Ocean instruments, 2025).



Slika 6: Manta mreža za vzorčenje mikroplastike (Vir: NOAA's Fisheries Collection, 2010).

2.3.2 Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo planktonske mreže

Metoda za določevanje vsebnosti mikroplastike v vodnih telesih s pomočjo planktonske mreže (Slika 7), je primerna za določevanje vsebnosti mikroplastičnih delcev v vodotokih, manjših in večjih rekah. Znanstveniki so metodo že uporabljali za določevanje vsebnosti mikroplastike v eni od nemških rek – Labi. Vzorce vode so odvzeli na vhodu v пристanišča ali ob samem robu reke, kjer se je kopičil drobnozrnat sediment. Vsebnost so določevali s pomočjo planktonske mreže, z velikostjo odprtih 150 μm ali 0,15 mm, ki so jo potopili neposredno pod vodno gladino, sama mreža pa je bila pritrjena na raziskovalno plovilo. Vzorčili so površino 1 km pri hitrosti 6–7 km/h. Količino filtrirane vode so izračunali z uporabo ročnega merilnika pretoka in posebne formule. V 5 do 10 minutah jim je uspelo prefiltrirati 3,2–32,7 m³ vode, prefiltrirana količina pa je bila odvisna od same hitrosti pretoka. Vzorce vode so po vzorčenju prenesli iz vreče na koncu mreže v steklene kozarce. Pri tem so vzorec spirali z ultra čisto vodo. Mreže so po vsakem vzorčenju s to vodo tudi spirali, da bi preprečili kakršnokoli kontaminacijo. Po prenosu vzorcev v laboratorij so jih nadalje dobro obdelali ter pripravili za analizo. Na koncu so filtre in delce vizualno pregledali. Za vizualno analizo je bila izvedena analiza ATR – FTIR (Sherer et al., 2020).



Slika 7: Planktonska mreža (Vir: KC Denmark, 2025).

2.3.3 Določitev vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo črpalke z ročnim presejevanjem vzorca

Določevanje vsebnosti mikroplastike v vodi s pomočjo črpalke z ročnim presejevanjem vzorca so raziskovalci izvajali v dveh porečjih v Sloveniji (Kamniška Bistrica, Ljubljana). Vzorce vode so zbirali z motorno črpalko in sesalno košaro z velikostjo por 1×1 cm. Vsi vzorci vode so bili filtrirani skozi sito z velikostjo por $150 \mu\text{m}$. Na vsakem vzorčnem mestu so prečrpali 1000 litrov ali 1 m^3 vode. Zbrane vzorce pa so nato spirali s 70 % etanolom ter shranili v steklene posode. Vse vzorce so prenesli v laboratorij, kjer so mikroplastične delce izolirali iz vzorcev s pomočjo stereo mikroskopa, in jih razvrstili v kategorije (glede na obliko, velikost, barvo, vrsto polimera). Za določitev kemijske sestave delcev so izvedli analizo ATR – FTIR (infrardeča spektroskopija s Fourierjevo transformacijo oslabiljene popolne odbojnosti). S pomočjo omenjene analize pa niso mogli določiti vlaken, zato so le-ta vizualno identificirali (Matjašič et al., 2023).

2.4 Vzorčevalnik FVO

2.4.1 Opis naprave

Vzorčevalnik FVO (Slika 8) za mikroplastiko je terenska oprema, namenjena vzorčenju mikroplastike v vodnih telesih. Razvili in izdelali so jo na Fakulteti za varstvo okolja, v sodelovanju z Visoko šolo za proizvodno inženirstvo, v okviru evropskega programa Interreg Europe in projekta PLASTIX. Naprava temelji na principu črpanja in filtracije s pomočjo črpalke, ki jo poganja bencinsko gorivo. Vsebuje filtrirno komoro s snemljivimi filtri za lažje vzorčenje vode ter merilec pretoka za spremljanje pretočenega volumna vode. Poleg glavne enote naprave sodita zraven še komplementarni cevi, in sicer daljša cev za vtok z nastavkom za teleskopsko palico ter krajša, iztočna cev s pritrdilnim klinom na koncu. Na vzorčevalnik so pritrjeni tudi tesnilni obročki, ki se pred pritrditvijo vstavijo v cev. Za lažji transport je naprava pritrjena na voziček, s katerega se lahko tudi odstrani z odpenjanjem treh pritrdilnih klinov na vozičku (Krajnc, in prep, 2025).



Slika 8: Vzorčevalnik FVO z vozičkom ter vtočnimi in iztočnimi cevmi (Vir: lasten)

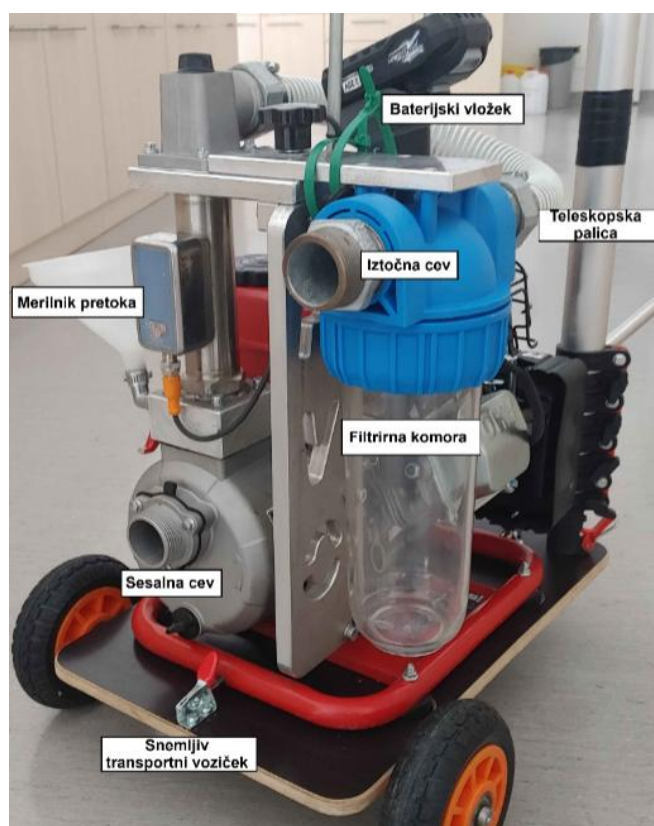
2.4.2. Princip delovanja

Rečna voda, ki jo s pomočjo črpalke črpamo skozi vtočno cev, teče skozi filter, ter na drugi strani izteka skozi iztočno cev nazaj v reko. Volumen prečrpane vode spremljamo s pomočjo merilca pretoka, ki ga poganja baterija (baterijski vložek).

Vzorčevalnik moramo pred zagonom postaviti na relativno ravno površino. V obe cevi (vtočno in iztočno) moramo namestiti tesnila ter cev za iztok namestiti na napravo. Pod lijem moramo odpreti ventil za polnjenje komore, in v lijak zliti vodo iz vodnega telesa, ki ga vzorčimo z vedrom. Vodo nalivamo tako dolgo, da se komora napolni in ventil zapremo. Nato z vodo napolnimo še sesalno cev s pomočjo vedra, s strani, ki ima navoj. Na sesalno cev po potrebi namestimo teleskopsko palico. Ko je cev napolnjena, jo previdno navijemo na črpalko z glavo sesalne cevi in cevjo, napolnjeno z vodo. Preverimo, da je črpalna komora brez filtra in da je dobro nameščena na črpalko. Vključiti moramo tudi baterijo merilca pretoka. Tako je vzorčevalnik pripravljen na prvi zagon (Krajnc, in prep, 2025).

Črpalko vklopimo s potegom za ročico. Ob prvem vklopu je potrebnih več zaporednih potegov ročice. Sesalna glava mora biti ves čas vzorčenja v vodi, saj se nam lahko v nasprotnem primeru v cev ujame zrak. Medtem ko vzorčevalnik črpa vodo brez filtra, preverimo delovanje merilca pretoka. Le-ta bi moral ob nemotenem delovanju prikazovati konstantno vrednost, med 120 in 150 L/min. Vzorčevalnik po 2 minutah izklopimo tako, da ročico postavimo na pozicijo za izklop. Tako smo iztočno in vtočno cev ter vzorčevalno komoro spirali z vzorcem (Krajnc, in prep, 2025).

Vzorčevalno komoro odstranimo za vzorčenje previdno, brez odstranjevanja sesalne cevi iz vode. Iz komore izpraznimo odvečno vodo ter jo še enkrat speremo z vodo iz vodnega telesa. V komoro previdno namestimo filter ter jo privijemo nazaj na vzorčevalnik. Ponastavimo števec merilca pretoka ter ročico za hladen vžig postavimo na položaj za vklop. Črpalko vklopimo s potegom za ročico. Vodo črpamo do zadane količine vode, ki jo lahko odčitamo na merilcu za pretok. Napravo nato izklopimo s premikom ročice na pozicijo za izklop (Krajnc, in prep, 2025). Spodnja slika (Slika 9) prikazuje vzorčevalnik FVO z vsemi označenimi deli.



Slika 9: Vzorčevalnik FVO (Aljoša Krajnc, 2024)

3 MATERIALI IN METODE

Praktični del diplomske naloge je bil sestavljen iz dveh delov, terenskega in laboratorijskega. Na terenskem delu smo s pomočjo zgoraj opisanega prototipa prečrpavali vodo iz reke Pake in Savinje. Ta del je trajal 2 dni, saj smo vzorčili na 8 lokacijah. V drugem, laboratorijskem delu, smo vzorce prenesli v laboratorij ter jih analizirali. Priprava in analiza vzorcev trajata dlje časa (5-10 dni), zaradi metodologije, ki zahteva veliko časa med sušenjem in oksidacijo, ter veliko ročnega dela.

Za boljšo primerjavo ter ustreznost podatkov smo izvedli dve glavni vzorčenji. Eno je potekalo v jesenskem času, in sicer konec septembra oz. v začetku oktobra 2024, drugo pa je potekalo v zimskem času, in sicer v začetku februarja 2025. Vzorčenje je potekalo na osmih, že vnaprej določenih lokacijah. Izvajalo se je v dopoldanskem času dneva, dva dni jeseni in dva dni pozimi. Prvo vzorčenje smo izvedli tako, da smo najprej prvi dan (30. 9. 2024) vzorčili vodo na 4 lokacijah na reki Savinji, drugi dan (1. 10. 2024) pa smo vzorčili vodo na štirih lokacijah na reki Paki. Drugo vzorčenje je potekalo podobno; prvi dan (5. 2. 2025) smo vzorčili na reki Savinji, drugi dan (6. 2. 2025) pa na reki Paki.

3.1 Izbor testnih lokacij na rekah Paka in Savinja

Za testno vzorčenje smo izbrali reko Pako in Savinjo, saj sta to reki, ki tečeta skozi našo regijo (Savinjsko-Šaleška regija). Na vsaki od njih smo skrbno izbrali štiri lokacije, ki so enakomerno razporejene vzdolž vsake od rek.

Čeprav sta si reka Paka in Savinja med seboj precej podobni, pa je med njima kar nekaj razlik. Reka Paka je hudourniška reka, ki je po velikosti nekoliko manjša od reke Savinje. Povprečni letni pretok rek se razlikuje glede na lokacijo. Na reki Paki znaša v Velenju povprečni letni pretok $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$, v Šoštanju $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ter v Rečici ob Paki $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretok se dolvodno večja zaradi dotokov drugih potokov ali hudournikov. Povprečni letni pretok reke Savinje je nekoliko večji od letnega pretoka reke Pake. Povprečen letni pretok reke Savinje je v Solčavi $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko je v Nazarjah ta številka veliko večja in sicer $33,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na določitev ustreznih lokacij vzorčenja je vplivalo več različnih dejavnikov, in sicer:

- dostopnost,
- potencialni viri onesnaženja,
- hidrodinamične lastnosti vodnih teles,
- različne stopnje urbanizacije,
- antropogeni pritiski na reki,
- možnost vzorčenja.

3.1.1 Reka Paka

Prva lokacija na reki Paki (P1) se nahaja neposredno v bližini kraja Paka pri Velenju. Glavni razlog za izbiro te lokacije je, da se nahaja pred večjim urbanim naseljem in je lahko dostopna. Nekaj metrov stran poteka magistralna cesta Slovenj Gradec–Velenje.

Druga izbrana lokacija (P2) se nahaja pri sotočju Pake s potokom Bečovnica. Ta lokacija je bila izbrana, ker se to mesto vzorčenja nahaja za urbanim naseljem (Velenje) in pred Centralno

čistilno napravo Šaleške doline (CČN Šaleške doline). Tukaj reka Paka že prečka urbanizirano območje. V neposredni bližini se nahaja tudi industrijska cona ter veliko obdelovalnih površin. Tretja lokacija (P3) se nahaja nekaj kilometrov iz Velenja. Razlog izbire lokacije je, da se nahaja na neposeljenem območju in hkrati za CČN Šaleške doline. Reka tukaj teče v bližini gozda, ceste ter travnikov. Četrta lokacija na reki Paki (P4) se nahaja v kraju Rečica ob Paki. Lokacija je bila izbrana, ker je tik pred izlivom reke Pake v Savinjo. Ta lokacija je – tako kot lokacija 2 – bila spremenjena s strani človeka, struga je tukaj nekoliko razširjena in poglobljena. Natančne koordinate merilnih mest na reki Paki so zbrane v Preglednici 1, merilna mesta pa na Sliki 10.

Preglednica 1: Prikaz lokacij na reki Paki

Vzorčno mesto		Ime	Opis	Koordinate (°N)	Koordinate (°E)
1	Paka	P1	Paka pri Velenju	46.387269	15.163462
2	Paka	P2	sotočje z Bečovnico, D breg	46.380842	15.042992
3	Paka	P3	Penk - Mešič	46.379300	15.024495
4	Paka	P4	izliv Hudega potoka	46.320417	15.041374



Slika 10: Izbrane lokacije na reki Paki (Aljoša Krajnc, 2024)

3.1.2 Reka Savinja

Prva lokacija na reki Savinji (S1) se nahaja v kraju Luče, le nekaj kilometrov stran od njenega izvira. Tukaj še reka ni tako podvržena antropogenim vplivom; lokacija se nahaja pred večjimi kraji, prav tako tudi pred Centralno čistilno napravo. Druga lokacija na reki Savinji (S2) se nahaja nekaj kilometrov dolvodno od prve lokacije in sicer v bližini kraja Grušovlje. Ta lokacija se nahaja za Čistilno napravo Luče. V bližini lokacije lahko najdemo veliko kmetijskih površin. Struga je tukaj zaradi poplavljanja spremenjena in je močno razširjena. Tretja lokacija na reki Savinji (S3) se nahaja v kraju Nazarje, kjer v reko Savinjo priteka reka Dreta. Tudi tukaj je struga nekoliko poglobljena in razširjena. V neposredni bližini se nahajata sprehajalna pot ter glavna magistralna cesta, ki vodi v Zgornjo Savinjsko dolino. Četrta lokacija na reki Savinji (S4) se nahaja za vsemi naselji, skozi katere teče reka v tej regiji in tudi tukaj je struga reke umetno razširjena. V neposredni bližini se nahajajo manjši travniki, gozd ter glavna cesta, večje poseljenosti v bližini te lokacije ni. Natančne koordinate merilnih mest na reki Savinji so zbrane v Preglednici 2, merilna mesta pa Sliki 11.

Preglednica 2: Prikaz lokacij na reki Savinji

Vzorčno mesto		Ime	Opis	Koordinate (°N)	Koordinate (°E)
1	Savinja	S1	Luče, pred ČN	46.356090	14.748714
2	Savinja	S2	Melišče	46.313291	14.881795
3	Savinja	S3	Sotočje Dreta + Savinja	46.321243	14.951759
4	Savinja	S4	Soteska	46.331810	14.993033



Slika 11: Izbrane lokacije na reki Savinji (Aljoša Krajnc, 2024)

3.2 Metoda vzorčenja in analize mikroplastike v vodi

Metodo vzorčenja mikroplastike z vzorčevalnikom FVO smo testirali dvakrat na vseh izbranih (8) lokacijah, in sicer septembra 2024 ter februarja 2025. Na vsaki lokaciji smo vedno najprej izmerili fizikalno-kemijske parametre in vzorčili po 1000 litrov oz. 1 m³ vode. Vzorec smo nato odnesli v laboratorij in izvedli nadaljnjo analizo vsebnosti mikroplastike.

3.3.1. Spremljanje fizikalno-kemijskih parametrov

Na vsaki od lokacij smo na terenski list zapisali vreme, čas, temperaturo zraka, stopnjo urbanizacije in število dni od zadnjih padavin (Priloga 1). Naredili smo hitro analizo stanja vode, in sicer smo izmerili temperaturo vode, pH, električno prevodnost, raztopljenost kisika in motnost. Uporabili smo multimetrski terenski kovček Multi 3620 IDS (Slika 12), ki je vseboval različne senzorje, in sicer:

- temperaturni senzor,
- pH senzor,
- senzor električne prevodnosti,
- senzor motnosti,
- senzor raztopljenega kisika.



Slika 12: Multimetrski terenski kovček Multi 3620 IDS (Vir: lasten)

3.3.2 Vzorčenje delcev v rečni vodi

Za zbiranje vzorcev na terenu smo potrebovali:

- napravo za črpanje vode – vzorčevalnik FVO,
- filtre za filtrirno napravo,
- gorivo za napravo za črpanje vode – vzorčevalnik FVO,
- večje nepolimerno vedro za izpiranje filtra,
- PP vedra s pokrovi,
- permanentni marker,
- vrečke za vzorce,
- nepolimerno krtačo za čiščenje filtra,
- 70 % etanol ali destilirano vodo.

Na vsaki od lokacij smo nato s pomočjo prenosnega vzorčevalnika skozi filter prečrpali 1000 litrov vode ali 1 m³ vode. Postopek je potekal tako, da smo napravo sestavili in pripravili filtre ter napravo najprej spirali z vzorcem, nato pa jo ponovno z vstavljenim filtrom usposobili, da prečrpa kubični meter vode. Količino prečrpane vode smo spremljali z vgrajenim ultrazvočnim merilcem pretoka.

Ko je vzorčevalnik prečrpal določeno količino vode, smo ga izklopili ter odstranili filter. Vodo, zbrano v posodi filtra, smo prelili v vedro s pokrovom, stene komore pa dobro sprali, da smo odstranili še preostanek vzorca. Filter smo prenesli v vrečko z zadrgo in to nepredušno zaprli, da bi preprečili izgubo vzorca ali kontaminacijo. Tako vzorec vode, kot tudi filtrat na filtru, je štel kot en vzorec in se je kasneje tudi tako obravnaval. Vse vzorce smo ustrezno označili, da se le-ti med seboj ne bi pomešali. Vzorce smo po terenskem delu prenesli v laboratorij, kjer smo jih še isti dan ustrezno obdelali za nadaljnjo analizo.

3.3.3 Analiza mikroplastike v vzorcih

Za analizo vzorcev v laboratoriju smo potrebovali naslednjo opremo in kemikalije:

- jekleno sito, velikosti 200 µm,
- petrijevke,
- 30 % vodikov peroksid (H₂O₂),
- vakuumsko črpalno,
- filtrirni papir – 47 mm 10 µm,
- stereo mikroskop,
- FTIR spektrometer (Bruker).

Ko smo vse vzorce prenesli v laboratorij, smo filter iz vrečke s pomočjo prhe spirali v vedro istega vzorca. Ves vzorec smo nato prelili čez 200 µm veliko jekleno sito in zadržali delce, ki

so ostali na situ. Tega smo prenesli v petrijevko ali več petrijevk, odvisno od količine vzorca, jo označili in vzorec pokrili. V petrijevke smo vlili 30 ml 30 % vodikovega peroksida (H_2O_2), in pustili, da poteka oksidativna razgradnja biogenih snovi v vzorcu. Oksidativna razgradnja je potekala od 48 do 72 ur, odvisno od biološke snovi v vzorcu. Ko se je ta proces zaključil, smo vzorec prefiltrirali s pomočjo vakuumske črpalke in uporabili papirnati filter 47 mm $10\ \mu\text{m}$, da smo nanj zbrali vse delce. Ko se je filter zamašil, smo vstavili novega in vse filtre istega vzorca označili kot en vzorec. Filter papirje smo zložili v petrijevke ali na urna stekla in jih pustili, da se posušijo in so tako pripravljeni na vizualni pregled s stereo povečevalnim steklom.

Po pregledu s stereo mikroskopom smo potencialne mikroplastične delce odstranili s filter papirja in jih ustrezno označene pospravili ločeno. Za vizualno analizo je sledila analiza FTIR s pomočjo FTIR naprave (Slika 13). Infrardeča spektroskopija s Fourierjevo transformacijo, znana tudi kot analiza FTIR ali spektroskopija FTIR, je analitična tehnika, ki se uporablja za identifikacijo organskih, polimernih in v nekaterih primerih anorganskih materialov. Metoda analize FTIR uporablja infrardečo svetlobo za skeniranje testnih vzorcev in opazovanje kemičnih lastnosti. FTIR pošilja infrardeče sevanje na približno 10.000 do $100\ \text{cm}^{-1}$ skozi vzorec, pri čemer je nekaj sevanja prepuščenega in nekaj absorbiranega. Nastali signal na detektorju je predstavljen kot spekter, običajno od $4000\ \text{cm}^{-1}$ do $400\ \text{cm}^{-1}$, ki predstavlja molekularni prstni odtis vzorca. Vsaka molekula ali kemijska struktura bo proizvedla edinstven spektralni prstni odtis, zaradi česar je analiza FTIR odlično orodje za izvajanje kemijskih analiz.



Slika 13: FTIR spektrometer (Vir: lasten)

3.3.4 Kontrolne meritve

Za preverjanje zanesljivosti vzorčevalnika in zagotavljanje pravilnosti rezultatov smo na CČN Šaleške doline dodatno opravili še tri kontrolne meritve: slepi vzorec, test pozitivne kontrole in test meritve pretoka.

A: Slepi vzorec oz. test kontaminacije

Test slepega vzorca je potekal tako, da smo skozi filter prečrpali več 1000 litrov čiste vode (od 2000 do 5000 litrov vode), ves nadaljnji postopek analize je ostal enak. Tako smo preverili, ali imamo v postopku kakšno možnost kontaminacije vzorca s plastičnimi delci. Vzorce smo po črpanju prenesli v laboratorij, kjer smo izvedli enako analizo kot pri ostalih vzorcih. Test smo opravili 3-krat. Test kontaminacije 1 smo izvedli novembra 2024, test kontaminacije 2 in 3 pa marca ter aprila 2025.

B: Test pozitivne kontrole

Namen testa pozitivne kontrole je bil preveriti učinkovitost zajema in identifikacije delcev z uporabo vzorca, kjer je bila vnaprej določena količina in velikost vhodnih delcev.

Pri izvedbi testa pozitivne kontrole smo uporabili različne velikosti mikroplastičnih delcev (peletov). S tem smo preverili, koliko mikroplastičnih delcev pravzaprav črpalka res zajame in koliko mikroplastičnih delcev se ujame v filter. Za kontrolni test smo potrebovali naslednje:

- zadostno količino čiste vode brez prisotnih mikroplastičnih delcev,
- 120-litrski sod s širokim grlom,
- filtre za filtrirno napravo,
- rezervno gorivo za napravo za črpanje vode – vzorčevalnik FVO,
- sete prešteti umetnih mikroplastičnih delcev – peletov (15 delcev na set),
- permanentni marker,
- vrečke za vzorce,
- PP vedra s pokrovom.

Testno vzorčenje smo izvedli tako, da smo vzorčevalnik postavili na višjo lego od soda, ki je bil napolnjen z vodo. Vzorčevalnik smo pripravili za vzorčenje, v filtrirno komoro smo vstavili filtrirno kartušo (filter). Sesalno glavo smo potopili v sod ter sesalno cev napolnili z vodo. V sod z nekontaminirano vodo (brez mikroplastičnih delcev) smo dodali en set črnih mikroplastičnih delcev – 15 delcev polipropilena (PP) določene velikosti. Dodali smo le eno velikost delcev naenkrat – eno od treh velikosti, ki smo si jih predhodno pripravili (4,5 mm-1 mm, 1 mm-0,45 mm, < 0,45 mm). Črpalko smo nato zagnali ter iz soda prečrpali vso vodo. Z manjšo količino vode smo sprali sod ter iz njega odstranili vse preostale delce mikroplastike. Le-te smo shranili v belo PP posodico in jo primerno označili za nadaljnjo analizo v laboratoriju. Iz vzorčevalnika smo previdno odstranili filter ter ga shranili v vrečko z zadrgo, vsebino filtrirne komore pa smo previdno shranili v PP vedro s pokrovom. Vse smo primerno označili, da pri kontrolnem

Kotnik, N.: Testiranje metode vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije v rekah Paka in Savinja. FVO, Velenje 2025

vzorčenju ne bi prišlo do napak. Z vzorci smo rokovali kot z vzorci vzorčenja v rekah. Test smo ponovili trikrat, z različnimi velikostmi delcev.

C: Test meritve pretoka

Namen tega testa je oceniti zanesljivost in natančnost ultrazvočnega merilca pretoka z digitalnim zaslonom, ki se uporablja za merjenje pretoka tekočin. Pri izvedbi eksperimenta smo uporabili vzorčevalnik, štoparico in 120-litrski sod.

Pri meritvah pretoka smo iz bazena na čistilni napravi prečrpali 120 l vode v 120-litrski sod, pri tem pa smo gledali vrednost na ultrazvočnem merilcu pretoka ter merili čas, ki ga črpalka potrebuje, da se sod napolni. Izvedli smo 10 zaporednih ponovitev, med ponovitvami pa vedno znova zagnali črpalko ter izpraznili sod.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Fizikalno-kemijski parametri

Prvo vzorčenje:

Oba dneva prvega vzorčenja je bilo vreme jasno in sončno, zunanje temperature pa so se gibale od 6 do 20 °C. Ob prvem vzorčenju reke Savinje je od zadnjih padavin minil en dan, medtem ko so ob vzorčenju reke Pake padavine ponehale dva dni prej. Lahko bi rekli tudi, da je bilo število ur od zadnjih padavin med vzorčenjem reke Savinje 36 ur, medtem ko je bila ta številka med vzorčenjem reke Pake 60 ur. V spodnjih preglednicah so podani parametri, ki smo jih izmerili pred začetkom vzorčenja vode. Podali in izmerili smo čas pričetka meritev, temperaturo zraka, temperaturo vode, pH, motnost in električno prevodnost vode ter raztopljenost kisika v vodi.

Datum: 1. 10. 2024

Vreme: jasno in sončno

Število dni od zadnjih padavin: 2 dni oz. 60 ur

Preglednica 3: Fizikalno-kemijski parametri prvega vzorčenja na reki Paki

Lokacija	Paka 1	Paka 2	Paka 3	Paka 4
Čas	9.50	10.50	12.30	13.30
Temperatura zraka (°C)	7	12	14	18
Temperatura vode (°C)	9,2	13,5	14,5	14,2
pH vode	8,404	8,243	8,214	8,210
Motnost vode (NTU)	4,5	10,2	7,3	9,5
Električna prevodnost vode (µS/cm)	400	500	520	514
Raztopljenost kisika v vodi (mgO ₂ /L)	10,77	10,20	9,38	9,97

Datum: 30. 9. 2024

Vreme: jasno in sončno

Število dni od zadnjih padavin: 1 dan oz. 36 ur

Preglednica 4: Fizikalno - kemijski parametri prvega vzorčenja na reki Savinji

Lokacija	Savinja 1	Savinja 2	Savinja 3	Savinja 4
Čas	10.45	11.55	12.50	14.10
Temperatura zraka (°C)	9	10	14	15
Temperatura vode (°C)	7,9	10,2	10,9	11,6
pH vode	8,270	7,970	8,172	8,210
Motnost vode (NTU)	11,3	20	3,8	18,7
Električna prevodnost vode (µS/cm)	257	226	317	280
Raztopljenost kisika v vodi (mgO ₂ /L)	11,07	10,75	10,87	10,73

Drugo vzorčenje:

Vremenski pogoji tekom drugega vzorčenja so se nekoliko razlikovali od prvih. Vreme je bilo jasno in sončno, zunanje temperature pa so se letnemu času primerno nekoliko razlikovale. Ta dva dneva so se gibale nekje med -4 do 8 °C. Padavin je bilo v tem obdobju nekoliko manj, med vzorčenjem pa je od zadnjih padavin minilo 5 dni na reki Savinji ter 6 dni na reki Paki. Ponovno smo v vodi izmerili izbrane fizikalno-kemijske parametre, in sicer temperaturo zraka, temperaturo vode, pH, motnost in električno prevodnost vode ter raztopljenost kisika v vodi. Podali smo tudi čas začetka meritev.

Datum: 6. 2. 2025

Vreme: jasno in sončno

Število dni od zadnjih padavin: 6 dni

Preglednica 5: Fizikalno-kemijski parametri drugega vzorčenja na reki Paki

Lokacija	Paka 1	Paka 2	Paka 3	Paka 4
Čas	8.40	12.20	10.30	11.40
Temperatura zraka (°C)	-2	3	-1	2
Temperatura vode (°C)	2,2	5,5	4,2	4
pH vode	8,248	8,373	8,289	8,235
Motnost vode (NTU)	2,2	3	13,2	4
Električna prevodnost vode (µS/cm)	416	538	585	572
Raztopljenost kisika v vodi (mgO ₂ /L)	13,11	13,11	12,52	12,69

Datum: 5. 2. 2025

Vreme: jasno in sončno

Število dni od zadnjih padavin: 5 dni

Preglednica 6: Fizikalno-kemijski parametri drugega vzorčenja na reki Savinji

Lokacija	Savinja 1	Savinja 2	Savinja 3	Savinja 4
Čas	9.20	10.40	12.30	13.15
Temperatura zraka (°C)	-4	3	6	8
Temperatura vode (°C)	5,1	6,1	5,3	6,1
pH vode	8,228	7,966	8,318	8,125
Motnost vode (NTU)	11,2	3,2	40,5	4
Električna prevodnost vode (µS/cm)	272	327	296	312
Raztopljenost kisika v vodi (mgO ₂ /L)	12,07	11,55	12,33	12,25

Temperatura vode se je v reki Paki gibala od 9 do 15 °C pri prvem vzorčenju ter od 2 do 6 °C pri drugem vzorčenju, medtem ko se je v reki Savinji gibala od 7 do 12 °C pri prvem in od 5 do okoli 6 °C pri drugem vzorčenju. Razlog za hladnejšo vodo pri drugem vzorčenju je letni čas. pH vode je bil nekoliko bazičen, in sicer se je pri vseh vzorčenjih vode gibal nekje okoli 8 ali malo čez. Razlog za bazičnost bi lahko bile kamnine ali temperatura vode. Seveda pa ne smemo izključiti antropogenih dejavnikov.

Motnost vode je pokazatelj prisotnosti delcev, v velikosti od 1 nm do 1mm. V reki Paki in Savinji smo s pomočjo senzorja za merjenje motnosti izmerili motnost vode od 2 NTU do 40 NTU. Vzrok teh vrednosti bi lahko bil tok, ki meša vodo, in s tem s tal dviguje prah v vodi. Za primerjavo lahko pogledamo pitno vodo, ki naj bi imela vrednost motnosti do 4 NTU, da je še

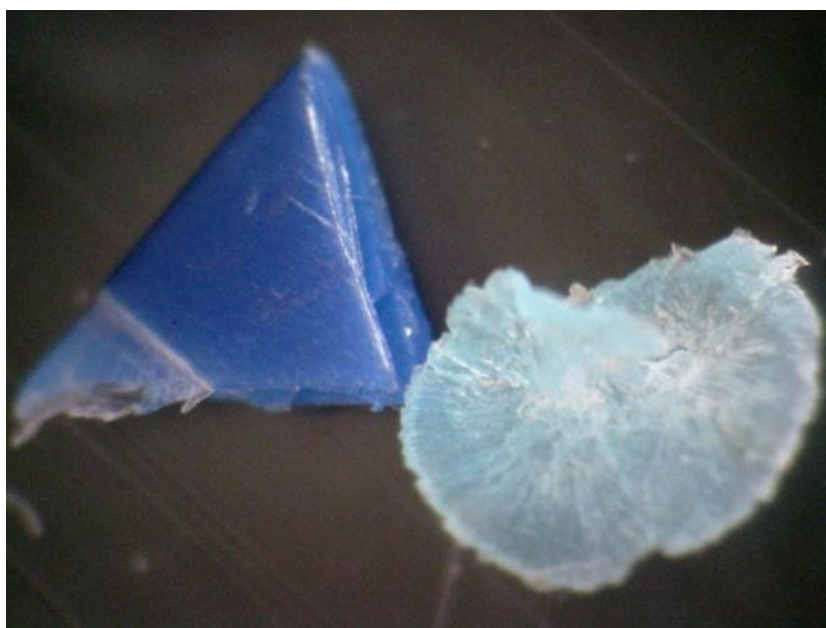
sprejemljiva za uporabnike. Seveda pa je v svetu zaradi mikrobiološke varnosti najbolj priporočljiva čim nižja motnost vode, z vrednostmi pod 1 NTU.

Električna prevodnost je merilo koncentracije ionov v vodi, ki je odvisna od stopnje disociacije in koncentracije elektrolita (baze, kisline, soli) v vodi. Na prevodnost vode vplivajo koncentracije Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- in drugih ionov. S povečevanjem koncentracije ionov se povečuje tudi prevodnost. Električna prevodnost reke Pake in Savinje se je med dnevi vzorčenja gibala nekje od 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

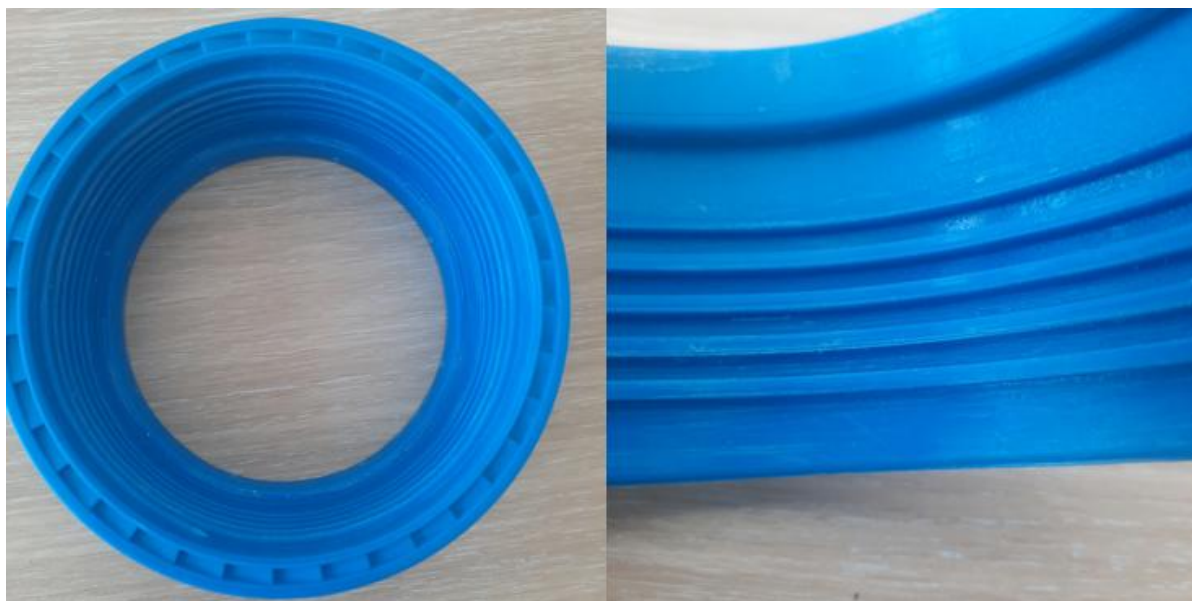
Raztopljenost kisika v vodi je merilo za količino plinskega kisika v vodi. Zdrave vode, v katerih je mogoče življenje, morajo vsebovati raztopljeni kisik. Raztopljeni kisik vstopi v vodo preko neposredne absorpcije iz ozračja, hitrega pomikanja vetrov, valov, tokov ali mehanskega prezračevanja ali s fotosintezo v vodi živečih rastlin, kot stranski produkt pri procesih. Dejavniki, ki prispevajo h koncentraciji raztopljenega kisika v vodi, so zračni tlak, temperatura vode, biološka aktivnost, slanost ter globina vode. Vrednosti raztopljenega kisika so se med našimi vzorčenji gibale od 9 $\text{mg O}_2/\text{L}$ in 14 $\text{mg O}_2/\text{L}$.

4.2 Vsebnost mikroplastike v reki Paki in Savinji

Po končani vizualni in FTIR analizi, smo rezultate testiranja ustrezno analizirali ter jih v skladu z našim namenom zapisali. Že med vizualnimi pregledi filtrov smo naleteli na več modrih delčkov. Sumili smo na kontaminacijo, saj so bili ti modri delčki prisotni pri skoraj polovici vzorcev. Po končani analizi FTIR smo ugotovili, da so to delčki mikroplastike. Po dolgem premisleku in pregledu celotne opreme, smo ugotovili, da je do kontaminacije najverjetneje prišlo pri prenosu cevi za vtok iz ene lokacije na drugo. Pri tem smo namreč uporabljali večjo plastično vrečo modre barve. Da bi se prepričali, ali je bila za kontaminacijo kriva res ta vreča, smo vzeli nekaj delčkov vreče ter na njen celoten postopek analize ponovili. Ta je pokazala, da je vreča narejena iz enakih materialov kot so modri delčki v našem vzorcu (Slika 14). Tako smo vse modre delčke iz našega vzorca izločili ter jih pri rezultatih nismo upoštevali. Prav tako smo pri pregledu naprave ugotovili, da bi lahko bil razlog kontaminacije plastični navojni pokrov filtrirne komore (Slika 15), ki je prav tako modre barve in narejen iz polipropilena.

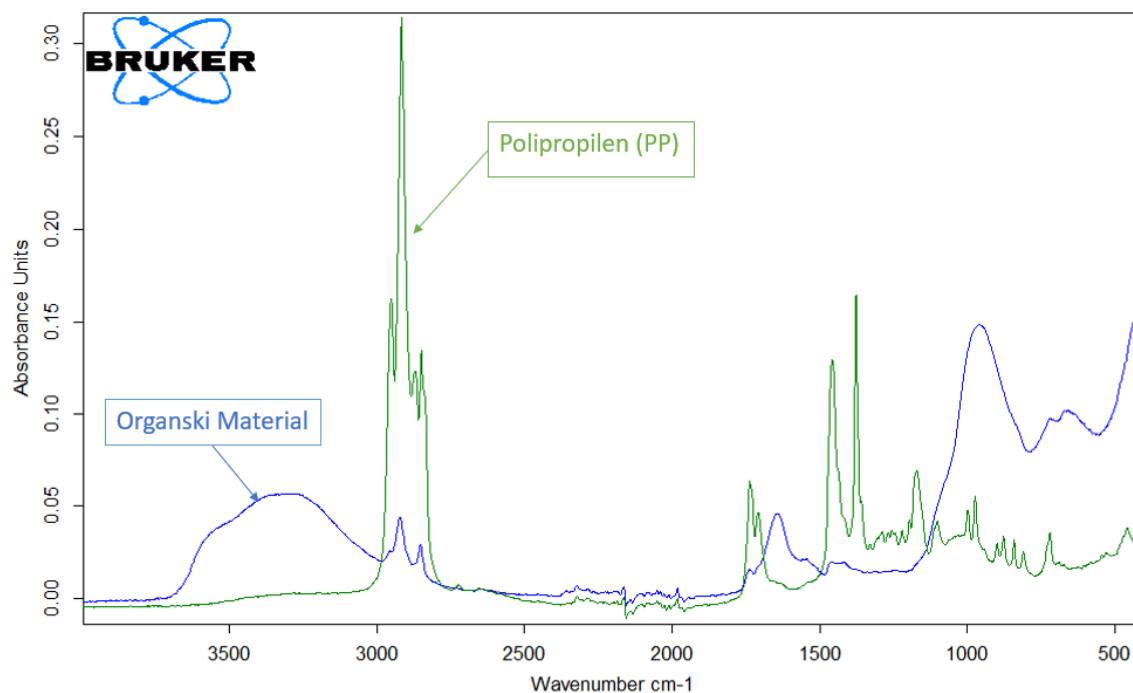


Slika 14: Košček vrečke ter delec iz vzorca (Vir: lasten)



Slika 15: Navojni pokrov filtrirne komore (Vir: lasten)

FTIR analiza je pokazala, da so mokri delčki, ki so bili označeni kot kontaminacija, narejeni iz polimera, imenovanega polipropilen, ter iz poliamida 66, imenovanega tudi najlon 66. Kljub izločitvi kontaminiranih delcev, je analiza vseeno pokazala nekaj mikroplastičnih delcev v vzorcih reke Pake in Savinje. V vzorcih smo našli več trdnih potencialno mikroplastičnih delcev. S FTIR analizo smo lahko izločili delce organskega izvora in potrdili prisotnost plastičnih delcev. Na spodnji sliki (Slika 16), lahko vidimo spekter organskega materiala (spekter modre barve) ter spekter polipropilena (PP) (spekter zelene barve), narejen s FTIR analizo. Opazimo lahko veliko razliko med spektroma, saj je polipropilen sestavljen bolj enostavno in ob analizi laser posveti skozenj, kar je vidno tudi po prvem vrhu na spektru. Razlike v spektru so rezultat različne strukture oz. prisotnosti kemijskih vezi v materialih.



Slika 16: Spekter polipropilena (zeleno) in organskega materiala (modro), narejen s FTIR analizo (Vir: lasten)

Rezultati testnih vzorčenj so zbrani v Preglednicah 7-10, kjer so prikazana števila vseh najdenih delcev, število organskega materiala in kontaminiranih modrih delcev, ter na koncu še število mikroplastičnih delcev, ki smo jih našli v kubičnem metru vzorčene vode.

V okviru jesenskega vzorčenja smo v reki Paki našli 11 mikroplastičnih delcev, v reki Savinji pa 4 delce. Delež potencialne kontaminacije je bil 42 %, a le v reki Paki. V okviru zimskega vzorčenja smo v reki Paki našli 7 mikroplastičnih delcev, v reki Savinji pa le 1 mikroplastičen delec. Delež potencialne kontaminacije je na reki Paki znašal 8 %, na reki Savinji pa 18 %.

Prvo vzorčenje (september 2024):

Preglednica 7: Rezultati mikroplastičnih delcev prvega vzorčenja na reki Paki

September 2024	Paka 1	Paka 2	Paka 3	Paka 4
Število vseh delcev	14	54	24	20
Organski material	12	12	19	11
Polipropilen (PP)	0	37	3	8
Od tega modri PP	0	32	3	8
Poliamid 11 (PA11)	0	0	0	0
Poliamid 66 (PA66)	1	5	1	0
Od tega modri PA66	0	3	1	0
Polietilen (PE)	0	0	1	0
Poliarilamid (PARA)	0	0	0	1
Fenol formaldehid (PF)	0	0	0	0
Polistiren (PS)	1	0	0	0
Identificirani delci/m ³	14	19	20	12
Kontaminacija z PP	0	35	4	8
	0 %	65 %	17 %	40 %
Identificirani neplastični delci/m ³	12	12	19	11
Identificirani mikroplastični delci/m ³	2	7	1	1
	14 %	37 %	5 %	8 %

Zgornja preglednica (Preglednica 7) prikazuje rezultate vzorčenja na reki Paki, ki smo ga izvedli septembra 2024. V vzorcu, ki je bil vzet na lokaciji Paka 1 smo našli 14 potencialnih mikroplastičnih delcev. Za 12 delcev se je izkazalo, da so organskega izvora, 2 pa sta bila mikroplastična delca, in sicer sta bila narejena iz poliamida 66 in polistirena. Iz vzorca Paka 2 (Slika 17), smo izločili večje število delcev, in sicer 54, za le 12 med njimi se je izkazalo, da so organskega izvora, 37 delcev je bilo iz polipropilena (PP), od tega je bilo 32 delcev modre barve. 5 delcev je bilo narejenih iz poliamida 66, od njih so bili 3 delci modri. Skupno smo tako na lokaciji Paka 2 uspeli najti 7 mikroplastičnih delcev/m³. Iz vzorca Paka 3 smo od 24 potencialno mikroplastičnih delcev uspeli le za enega potrditi, da je narejen iz plastičnega materiala, in sicer iz polietilena. Enako je bilo pri vzorcu Paka 4, kjer je analiza pokazala, da je mikroplastičen delec narejen iz poliarilamida. Skupaj smo tako v reki Paki v septembru 2024 našli 11 mikroplastičnih delcev.



Slika 17: Kontaminiran vzorec z modrimi PP delci na filter papirju (Vir: lasten)

Preglednica 8: Rezultati mikroplastičnih delcev prvega vzorčenja na reki Savinji

September 2024	Savinja 1	Savinja 2	Savinja 3	Savinja 4
Število vseh delcev	4	14	16	6
Organski material	4	13	14	5
Polipropilen (PP)	0	0	1	0
Od tega modri PP	0	0	0	0
Poliamid 11 (PA11)	0	1	1	0
Poliamid 66 (PA66)	0	0	0	0
Od tega modri PA66	0	0	0	0
Polietilen (PE)	0	0	0	0
Poliarilamid (PARA)	0	0	0	0
Fenol formaldehid (PF)	0	0	0	1
Polistiren (PS)	0	0	0	0
Identificirani delci/m ³	4	14	16	6
Kontaminacija z PP	0	0	0	0
	0 %	0 %	0 %	0 %
Identificirani neplastični delci/m ³	4	13	14	5
Identificirani mikroplastični delci/m ³	0	1	2	1
	0 %	7 %	13 %	17 %

Zgornja preglednica (Preglednica 8) prikazuje rezultate vzorčenja, ki je bilo prav tako izvedeno v septembru 2024, in sicer na lokacijah reke Savinje. V vzorcu, vzetem na lokaciji Savinja 1 nismo našli mikroplastičnih delcev. V vzorcu iz lokacije Savinja 2 smo našli en mikroplastičen delec, in sicer je bil ta delec iz poliamida 11 (PA11). V vzorcu Savinja 3 smo našli 2 mikroplastična delca, in sicer iz polipropilena ter poliamida 11. V vzorcu Savinja 4 je bilo analiziranih skupno 6 delcev, med njimi je le en delec bil iz plastičnega materiala, in sicer iz fenol formaldehida (PF). Skupno smo tako septembra 2024 v reki Savinji našli 4 delčke mikroplastike, a med njimi ni bilo modrih delcev.

Preglednica 9: Število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v septembru 2024

Lokacija	P1	P2	P3	P4	S1	S2	S3	S4
Število delcev	14	54	23	20	4	14	16	6
kontaminacija s PP	0	32	3	8	0	0	0	0
kontaminacija s PA66	0	3	1	0	0	0	0	0
	0 %	65 %	17 %	40 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Dejansko število delcev	14	19	20	12	4	14	16	6
Št. organskih delcev	12	12	19	11	4	13	14	5
Št. mikroplastičnih delcev/m ³	2	7	1	1	0	1	2	1

Zaradi suma kontaminacije smo iz analize izločili modre delčke, za katere je analiza FTIR pokazala, da so narejeni iz polipropilena (PP) in poliamida 66 (PA66). V zgornji preglednici (Preglednica 9) je prikazano število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v septembru 2024. Kot lahko vidimo, na lokacijah na reki Savinji ni prišlo do kontaminacije, medtem ko je prišlo na lokacijah na reki Paki do kar nekaj modrih delcev v vzorcih. V vzorcu, ki je bil vzet na lokaciji Paka 2, je bila kontaminacija največja, in sicer kar 65 %, sledil je vzorec z lokacije Paka 4, z 40 % kontaminacijo. Na lokaciji Paka 3 je bila kontaminacija 17 %, medtem ko je na lokaciji Paka 1 ni bilo.

Prisotnost kontaminacije nima vzorca, ki bi pokazal, da se je z lokacije na lokacijo le-ta povečevala. Nenavadno je tudi to, da smo pri vzorčenju najprej vzorčili reko Savinjo, na kateri kontaminacije ni bilo zaznati, šele nato pa reko Pako, kjer je kontaminacija prisotna. Za oba vzorčenja smo uporabili enaka postopka.

Drugo vzorčenje (februar 2025):

Preglednica 10: Rezultati mikroplastičnih delcev drugega vzorčenja na reki Paki

Februar 2025	Paka 1	Paka 2	Paka 3	Paka 4
Število vseh delcev	1	2	17	4
Organski material	1	0	12	1
Polipropilen (PP)	0	1	1	1
Od tega modri PP	0	0	1	1
Guma	0	0	1	0
Poliamid 1010 (PA1010)	0	0	1	0
Poliamid 11 (PA11)	0	1	0	0
Poliamid 66 (PA66)	0	0	1	0
Od tega modri PA66	0	0	0	0
Druge nepolimerne snovi	0	0	1	0
Poliarilamid (PARA)	0	0	0	1
poliolefinski elastomeri (OBC)	0	0	0	1
Termoplastični stiren (TPS)	0	0	0	0
Identificirani delci/m ³	1	2	16	3
Kontaminacija s PP	0	0	1	1
	0 %	0 %	6 %	25 %
Identificirani neplastični delci/m ³	1	0	13	1
Identificirani mikroplastični delci/m ³	0	2	3	2
	0 %	100 %	19 %	67 %

Na drugem vzorčenju so rezultati pokazali nekoliko boljše stanje rek glede mikroplastike. Zgornja preglednica (preglednica 10) prikazuje rezultate vzorčenja na lokaciji reke Pake v februarju 2025. Na lokaciji Paka 1 takrat v vzorcu nismo našli nobenega mikroplastičnega vzorca. Na lokaciji Paka 2 smo našli 2, in sicer sta bila to vzorca poliamida 11 ter polipropilena. Na lokaciji Paka 3 smo od 17 potencialno mikroplastičnih delcev za tri ugotovili, da so res iz plastike, in sicer iz poliamida 1010, poliamida 66 ter polipropilena. Na lokaciji Paka 4 smo od štiri potencialno mikroplastičnih delcev za dva potrdili, da sta narejena iz mikroplastike, in sicer iz poliarilamida ter poliolefinskega elastomera. Skupno smo tako na reki Paki v mesecu februarju našli 7 mikroplastičnih delcev.

Preglednica 11: Rezultati mikroplastičnih delcev drugega vzorčenja na reki Savinji

Februar 2025	Savinja 1	Savinja 2	Savinja 3	Savinja 4
Število vseh delcev	6	2	3	0
Organski material	6	2	0	0
Polipropilen (PP)	0	0	2	0
Od tega modri PP	0	0	2	0
Guma	0	0	0	0
Poliamid 1010 (PA1010)	0	0	0	0
Poliamid 11 (PA11)	0	0	0	0
Poliamid 66 (PA66)	0	0	0	0
Od tega modri PA66	0	0	0	0
Druge nepolimerne snovi	0	0	0	0
Poliarilamid (PARA)	0	0	0	0
poliolefinski elastomeri (OBC)	0	0	0	0
Termoplastični stiren (TPS)	0	0	1	0
Identificirani delci/m ³	6	2	1	0
Kontaminacija s PP	0	0	2	0
	0 %	0 %	67 %	0 %
Identificirani neplastični delci/m ³	6	2	0	0
Identificirani mikroplastični delci/m ³	0	0	1	0
	0 %	0 %	100 %	0 %

Zgornja preglednica (Preglednica 11) prikazuje rezultate vzorčenja za mesec februar, in sicer na štirih lokacijah na reki Savinji. Kot lahko razberemo iz preglednice, smo na tem vzorčenju identificirali le en mikroplastičen delec, in sicer na lokaciji Savinja 3. FTIR analiza je pokazala, da je ta delec narejen iz termoplastičnega stirena (TPS).

Preglednica 12: Število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v februarju 2025

Lokacija	P1	P2	P3	P4	S1	S2	S3	S4
Število delcev	1	2	17	4	6	2	3	0
kontaminacija s PP	0	0	1	1	0	0	2	0
kontaminacija s PA66	0	0	0	0	0	0	0	0
	0 %	0 %	6 %	25 %	0 %	0 %	67 %	0 %
Dejansko število delcev	1	2	16	3	6	2	1	0
Št. organskih delcev	1	0	12	1	6	2	0	0
Št. mikroplastičnih delcev/m ³	0	2	3	2	0	0	1	0

V zgornji preglednici (Preglednica 12) je prikazano število kontaminiranih delcev na vseh lokacijah v februarju 2025. Kot lahko vidimo, je bila kontaminacija, kljub odstranitvi kontaminanta še vedno prisotna. Tokrat je bila kontaminacija prisotna na lokaciji Savinja 3, in sicer je bila ta kar 67 %. Prav tako lahko vidimo, da je kontaminacija prisotna tudi v vzorcih reke Pake, in sicer vzorcih z lokacije Paka 4, kar 25 % kontaminacija in na lokaciji Paka 3, 6 % kontaminacija.

Kljub temu, da smo veliko modro plastično vrečo (kontaminant) odstranili, in ga v bližini ali na vzorčenju ni bilo prisotnega, je bila kontaminacija vidna.

4.2.1 Povezanost onesnažil s potencialnimi viri onesnaževanja

Vzroka oziroma izvora prisotnosti mikroplastike v reki Paki in Savinji ne moremo natančno določiti. Domnevamo lahko, kaj so možni viri onesnaženja.

Vzrok najdene mikroplastike na lokaciji Paka 1 bi lahko bil najverjetneje posledica onesnaženja zaradi smetenja, metanja različnih embalaž skozi okna avtomobilov ali ilegalnega odlaganja odpadkov, saj na tej lokaciji poteka regionalna cesta Slovenj Gradec–Velenje. Na lokaciji je bil najden mikroplastičen delec polistirena, ki se v veliki meri uporablja kot material za pakiranje.

Na lokaciji Paka 2 smo našli delce poliamida 66, ki se največkrat uporablja v tekstilni in avtomobilski industriji. Delci polipropilena, materiala, ki se največkrat uporablja za izdelavo plastenk, kozarcev in pribora za enkratno uporabo, posodic za jogurt in embalažo za hrano, so bili prav tako najdeni na tej lokaciji. Ta polimer se uporablja v najrazličnejših industrijah, kot so gospodinjiski, tekstilni, avtomobilski, gradbeni, industrijski, kmetijski, zato je težko določiti vzrok za prisotnost tega delca mikroplastike v reki Paki. Vzrok za to bi prav tako lahko bilo odlaganje odpadkov višje po reki navzgor, ali dejstvo, da je tu reka že pretekla skozi jedro mesta in do lokacije prinesla različne delce mikroplastike. Material, kot je poliamid 11, se veliko uporablja v električni industriji kot ovoj za žice, električna ohišja, sponke, ipd.

Na lokaciji Paka 3 smo zaznali mikrodolge gume, kar bi lahko nakazovalo na odpadke v bližini naše lokacije. Poleg poliamida 66 smo našli tudi delec poliamida 1010. Poliamid 1010 se prav tako kot poliamid 66 veliko uporablja v električni in avtomobilski industriji (ovoji kablov, avtomobilske komponente, konektorji, električna ohišja, krtače, zobniki, ipd.).

Na lokaciji Paka 4 smo našli mikroplastične delce, ki jih nismo našli na nobeni drugi lokaciji na tej reki, in sicer delce poliarilamida, ki se uporablja v mehanski in električni industriji. Poliarilamid se prav tako uporablja za izdelavo etuijev za fotoaparate, ure, ribiški pribor, igrače, ipd. Poleg PARA delca smo na tej lokaciji našli tudi delec poliolefinskega elastomera (OBC), ki se tako kot ostali polimeri veliko uporablja v gospodinjstvu, električni industriji ter gospodarstvu.

Na reki Savinji je bilo v času vzorčenja najdenih manj mikroplastičnih delcev. Na lokaciji Savinja 1 ni bilo najdenih nobenih mikroplastičnih delcev. Razlog za to je najverjetneje manjša poseljenost ob reki ter skoraj ničelni vpliv človeka.

Na lokaciji Savinja 2 smo zaznali delce poliamida 11, ki se tako kot ostali polimeri veliko uporablja v avtomobilski in električni industriji ter pri pakiranju izdelkov. Glede na to, da smo na tej lokaciji v dveh vzorčenjih našli le en delec bi lahko rekli, da je prisotnost delca najverjetneje vzrok onesnaženja z plastičnimi odpadki, raznimi embalažami, plastičnimi ovitki, ipd.

Na lokaciji Savinja 3 smo našli največ delcev na tej reki, in sicer smo našli delce, ki naj bi bili izdelani iz polipropilena, poliamida 11 ter še enega polimera, imenovanega termoplastični stiren. Ta plastika se uporablja kot embalaža za hrano (posode, ovoji, folije).

Na lokaciji Savinja 4 smo našli en delec, in sicer je analiza pokazala, da je narejen iz fenol formaldehida, ki je sintetična smola, v uporabi pri proizvodnji oblikovanih izdelkov, premazih in lepilih.

Natančna določitev izvora onesnaženosti rek Pake in Savinje z mikroplastičnimi delci je izredno težka. Na podlagi opažanj lahko sklepamo, da je za prisotnost delcev kriva onesnaženost z najrazličnejšimi odpadki, bodisi je to iz gospodarstva ali gospodinjstev. Ker je ob rekah precej razvito kmetijstvo in je veliko kmetijskih površin, bi lahko bil tudi to vzrok

onesnaženja, in sicer ovijalna folija za bale ter mreža za bale. V vzorcih smo namreč našli tudi veliko rdečih, črnih in modrih vlaken (Slika 18), ki pa so bile premajhna za analizo.



Slika 18: Vlakna na filterpapirju pod lupo (Vir: lasten)

Glede na izvor in uporabo plastike lahko sklepamo, iz katerih virov so najdeni mikroplastični delci zašli v ta dva vodotoka. Obe reki tečeta tik ob regionalnih cestah, zato lahko predvidevamo, da je veliko virov mikroplastike zaradi človeškega onesnaženja in nepravilnega odlaganja odpadkov. Kot potencialni vir onesnaženja bi lahko šteli tudi divja odlagališča odpadkov, ki so (posebej na podeželju) še vedno precej prisotna. Kot drugi potencialni vir onesnaženja bi lahko poiskali večje in manjše industrije (različne proizvodnje gospodinjskih aparatov, delavnice), ki se nahajajo v neposredni bližini ali ob robu rek. Tretji potencialni vir onesnaženja bi lahko bilo kmetijstvo, saj se pri spravilu sena uporabljajo materiali, ki so narejeni iz plastičnih polimerov. Seveda moramo upoštevati tudi dejstvo, da se vlakna sproščajo tudi ob nošenju oblačil, torej ob uporabi, z drgnjenjem ali samim nošenjem. Ta vlakna bi lahko s pomočjo vetra ali kako drugače zašla v naše vzorce. Plastični delci, predvsem vlakna in delci v nano velikosti, lahko v reke zaidejo tudi s pomočjo vetra, padavin, kar pomeni, da se z zračnimi masami lahko prenesejo tudi iz bolj oddaljenih področij.

4.3 Kontrolne meritve

Kljub dobro načrtovanemu postopku in metodi pa lahko med vzorčenjem vseeno pride do merilne negotovosti. Pri merilnih metodah, kot je tudi naše vzorčenje lahko velikokrat pride do negotovosti zaradi več dejavnikov. Med drugim lahko do težav pride zaradi postopkov ali metod ter materialov (surovine, snovi, komponente), vključenih v postopek. Velika težava lahko nastopi, če so stroji ali naprave, ki so pri metodi uporabljeni okvarjeni ali imajo kakršnokoli pomanjkljivost, zato je pomembno, da je vsa oprema dobro preverjena. Veliko težavo lahko povzročijo tudi človeški dejavniki, saj je predvsem pri metodah, ki so težko izvedljive in zahtevne večja verjetnost nenatančnosti in nezbranosti. Eden od dejavnikov, ki lahko vpliva na merilno negotovost, na katerega nimamo vpliva, je okolje in zunanji dejavniki, ki lahko vplivajo na težave pri samem postopku ter izvedbi same analize.

A: Slepi vzorec oz. test kontaminacije

Test kontaminacije 1 je bil izveden novembra leta 2024. Pokazal je prisotnost modrih fragmentov polipropilena (PP). Kontaminacija je bila v nadaljnjem procesu odpravljena in sistem v nadaljevanju ni kazal težav s tem materialom. Testa kontaminacije 2 in 3 sta bila izvedena kasneje, in sicer marca oz. aprila 2025. Tu rezultati (Preglednica 13) kažejo prisotnost materialov, kot so polistiren (PS), polietilen ter polietilen tereftalat (PET), ki sicer niso del notranjega sistema. Po teh opažanjih lahko sklepamo, da je vir kontaminacije verjetno naravna obremenjenost uporabljene vode (npr. posledica depozicije delcev iz zraka). Dodatno so bili identificirani še drugi materiali (PE-HD, organske spojine in sredstvo za penjenje polimerov), kar potrjuje možnost zunanjega vpliva. Vir kontaminacije bi se lahko skrival tudi pri analizi v laboratoriju, saj je tam postopek dolgotrajen, in bi ob hitrem in nenatančnem delu lahko hitro prišlo do zapletov. Materiali, kot sta PS in PET, niso del vzorčevalnika, zato jih lahko pripišemo okoljski kontaminaciji, kar lahko štejem kot dober rezultat, saj notranje kontaminacije ni.

Preglednica 13: Rezultati testov kontaminacije

Test kontaminacije 1		Test kontaminacije 2		Test kontaminacije 3	
Št. delca	FTIR analiza	Št. delca	FTIR analiza	Št. delca	FTIR analiza
1	PP	1	PP	1	PET
2	PP	2	PS	2	Org.
3	PP	3	PE-HD	3	Sredstvo za penjenje
4	PP	4	Org.	4	Org.
5	PP	5	/	5	/

B: Test pozitivne kontrole

Rezultati testa kontaminacije (Preglednica 14) kažejo, da je metoda pri uporabi večjih delcev učinkovita (20 % izguba), medtem ko je pri manjših delcih (< 1 mm) uspešnost identificiranja precej nižja (izguba 66,67 % ter 73,33 %). To nakazuje potrebo po dodatni optimizaciji postopka za zmanjšanje izgub majhnih delcev, ki so na terenu najbolj prisotni.

Metoda identifikacije delcev je tako najbolj učinkovita pri večjih delcih, medtem ko učinkovitost pri manjši velikosti delcev upade, kar zahteva nadaljnje prilagoditve. Potrebna bi bila dodatna optimizacija postopka za zmanjšanje izgub majhnih delcev, ki so na terenu najbolj prisotni.

Preglednica 14: Rezultati testa pozitivne kontrole

Pozitivna kontrola					
Ponovitev	Število vhodnih delcev	Velikost delcev	Število identificiranih delcev	Število neposesanih delcev	Izguba [%]
1	15	4,5 mm-1 mm	12	0	20
2	15	1 mm-0,45 mm	4	3	66,667
3	15	< 0,45 mm	4	0	73,333

C: Test meritve pretoka

Kot lahko opazimo iz spodnje preglednice (Preglednica 15), so izmerjene vrednosti na števcu zelo različne in spremenljive. Pogosto je izmerjena vrednost na števcu nižja od dejanske količine, medtem ko časovne meritve kažejo na stabilen pretok (približno 186 L/min).

Preglednica 15: Rezultati testov meritev pretoka

Točnost merilca pretoka						
Ponovitev	Vrednost na števcu [L]	Čas [s]	Količina [L]	povprečen Q po števcu [L/min]	povprečen Q po času [L/min]	Odstopanje [%]
1	83,88	38,80	120,00	129,71	185,57	30,10
2	87,69	39,10	120,00	134,56	184,14	26,93
3	89,59	38,85	120,00	138,36	185,33	25,34
4	76,50	39,50	120,00	116,20	182,28	36,25
5	31,17	38,70	120,00	48,33	186,05	74,03
6	47,70	38,50	120,00	74,34	187,01	60,25
7	25,30	38,05	120,00	39,89	189,22	78,92
8	17,60	38,00	120,00	27,79	189,47	85,33
9	83,60	38,70	120,00	129,61	186,05	30,33
10	48,80	38,90	120,00	75,27	185,09	59,33
Povprečje	59,18	38,71	120,00	91,73	186,00	50,68

Legenda:

- Vrednost na števcu [L]: količina, ki jo digitalni zaslon merilca pretoka zabeleži.
- Čas [s]: čas polnjenja 120-litrskega soda, merjen s štoparico.
- Količina [L]: predvidena količina (120 L).
- Q po števcu [L/min]: pretok, izračunan na osnovi vrednosti, prikazanih na števcu.
- Q po času [L/min]: pretok, izračunan na osnovi izmerjenega časa.
- Odstopanje [%]: relativna razlika med obema izračunanima pretokoma.

Velika variabilnost izmerjenih vrednosti na merilcu pretoka v primerjavi s stabilnostjo časovnih meritev nakazuje težave s kalibracijo ali delovanjem ultrazvočnega merilca pretoka. Povprečno odstopanje med izračunanim pretokom na osnovi števca in časa znaša 50,68 %, kar je nesprejemljivo za natančno raziskovanje.

4.4 Primerjava učinkovitosti metode črpanja vode z drugimi obstoječimi metodami za vzorčenje vode

Metoda črpanja vode s pomočjo vzorčevalnika FVO je metoda, pri kateri je potrebno veliko natančnosti. Na terenu vzorčenje poteka hitro, a je metoda zelo zamudna v laboratoriju, saj lahko traja tudi do 14 dni, zaradi čakanja med laboratorijsko analizo. Zaradi tako dolgega in zapletenega postopka lahko, ob že majhni nenatančnosti, hitro pride do kontaminacije ali pa nepravilne izvedbe postopka analize. Prav tako pa tudi ne moremo določiti izvora mikroplastičnih delcev. Zaradi dolgega in zahtevnega postopka lahko hitro privede do merilne negotovosti, zato je med vzorčenjem zelo pomembna natančnost in zbranost.

Kljub nekaj negativnim lastnostim pri vzorčenju mikroplastike s pomočjo vzorčevalnika FVO ima ta naprava precej zelo dobrih lastnosti. Ima razmeroma majhno težo in je lahko prenosljiva naprava, ki jo zelo enostavno namestimo ob rečni breg. Za transport ima voziček, s katerega jo lahko kadarkoli snamemo. Je zelo stabilna, saj ima železno ogrodje, zato ni velike skrbi, da bi nam z rečne brežine padla v reko. Primerna je za vzorčenje mikroplastike tako v manjših kot tudi v večjih rekah, saj za vzorčenje ne potrebujemo plovila. Prav tako pa lahko vzorčimo ob nižjem vodostaju reke. Primerna je za enostavno in hitro vzorčenje na terenu.

Če bi metodo črpanja vode primerjali z drugimi obstoječimi metodami za vzorčenje vode, kot sta metodi za vzorčenje s pomočjo manta mreže in planktonske mreže, bi lahko rekli, da ima vsaka od njih nekaj prednosti in slabosti. Tako metoda za vzorčenje s pomočjo manta mreže kot tudi planktonske mreže za svojo izvedbo potrebujeta plovilo, ki mrežo vleče po vodi pod površino. Metoda za vzorčenje vode s pomočjo manta mreže je, prav tako kot metoda s pomočjo vzorčevalnika, dolgotrajna in zapletena. Metoda za vzorčenje s pomočjo planktonske mreže je metoda, pri kateri je količina vzorčene vode odvisna od pretoka reke. Vse tri metode so primerne za vzorčenje na manjših in velikih rekah, vendar pri metodi z mrežami vzorčenje ni mogoče pri nizkem vodostaju.

Raziskovalci so že testirali pristnost mikroplastike v vodi tudi v nekaterih drugih rekah po Sloveniji. Prisotnost mikroplastičnih delcev so ugotavljali v vodi v reki Ljubljanici ter Kamniški Bistrici. Ugotovljena povprečna koncentracija mikroplastičnih delcev v reki Ljubljanici je bila 31 ± 14 delcev/m³, medtem ko je bila ta vrednost v Kamniški Bistrici 59 ± 16 delcev/m³ (Matjašič et al., 2023). Vrednosti so nekoliko višje od naših, po čemer lahko sklepamo, da sta ti dve reki bolj onesnaženi z mikroplastiko kot reki Paka in Savinja. Seveda pa lahko to le sklepamo, saj sedaj žal še nimamo standardizirane metode, s katero bi lahko testirali prisotnost mikroplastike v rekah ter tako ugotovili dejansko prisotnost mikroplastike v le-teh. Z nadaljnjim raziskovanjem in testiranjem bi lahko znanstveniki kmalu prišli do standardizirane metode za testiranje mikroplastike v vodi v vodnih telesih, vendar je za zdaj še nimamo, zato je rezultate med seboj zelo težko primerjati.

5 SKLEPI

Glavni cilj diplomskega dela je bil testiranje metode vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije na reki Paki ter Savinji z uporabo vzorčevalnika FVO. Pred pričetkom testiranja smo določili ustrezne lokacije vzorčenja glede na različne dejavnike. Nato smo izvedli testiranje metode vzorčenja mikroplastike s pomočjo vzorčevalnika FVO na izbranih 8 lokacijah ter izvedli nadaljnjo kemijsko analizo v laboratoriju ter tako preverili, ali je v vzorcih prisotna mikroplastika.

Po pregledani literaturi na tem področju, po izvedenem vzorčenju mikroplastike v reki Paki in Savinji s pomočjo vzorčevalnika FVO, po analizi vode ter po interpretaciji rezultatov; lahko ovrednotimo na začetku postavljeni hipotezi.

Hipoteza 1: Metoda vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije je primerna za testiranje prisotnosti mikroplastike vzdolž rek Pake in Savinje.

Po končanem vzorčenju mikroplastike v rekah Paki in Savinji lahko prvo hipotezo potrdimo. Metoda je primerna za vzorčenje mikroplastike v manjših vodotokih, kot sta izbrani reki Paka in Savinja. Prav tako je metoda primerna, saj je enostavna in hitra. Naleteli smo predvsem na dva izziva: nezanesljivost podatkov glede količine zajete vode z vzorčevalnikom, saj merilec pretoka ni deloval optimalno in konstantno, ter potencialno kontaminacijo vzorca. Tukaj bi bila primerna rešitev za še boljšo natančnost in opredelitev rezultatov, nadgradnja vzorčevalnika FVO, npr. dodatek boljšega, bolj natančnega merilca pretoka, boljši postopek za manjšo ali ničelno možnost kontaminacije, itd.

Hipoteza 2: V rekah Paka in Savinja je prisotna mikroplastika.

Po končanem vzorčenju in nadaljnji analizi v laboratoriju lahko drugo hipotezo potrdimo. V rekah Paka in Savinja je bila prisotna mikroplastika, a ne veliko. Vzrok za prisotnost mikroplastike v teh rekah še ni znan oz. ga je težko pojasniti. O izvoru delcev lahko le sklepamo na podlagi materiala, iz katerega so narejeni. Veliko najdenih delcev v vzorcih je bilo zelo majhnih in so se pojavljali predvsem v obliki vlaken. Zaradi tega je težko natančno določiti njihovo kemijsko sestavo. Kljub temu lahko za nekatere delce, na podlagi njihove oblike, velikosti in barve, zelo zanesljivo sklepamo, da gre za mikroplastiko (Slika 19).

Preglednica 16: Število mikroplastičnih delcev/m³ glede na vzorčenje v rekah Paki in Savinji

Reka	Št. mikroplastičnih delcev/m ³ 1. vzorčenje	Št. mikroplastičnih delcev/m ³ 2. vzorčenje
Paka	11	7
Savinja	4	1



Slika 19: Različni mikroplastični delci pod stereo mikroskopom (Vir: lasten)

Rezultati naših vzorčenj in analiz so pokazali, da je pri nas tudi v manjših rekah prisotna mikroplastika. Pomembno je zavedanje, da gre za globalni problem, ki bi ga morali že reševati. Primerno bi bilo, da bi se razvila in uvedla primerna standardizirana metoda za vzorčenje in monitoring mikroplastike, tako v manjših kot tudi v velikih rekah, saj je ta problematika v večjih rekah še bolj zaskrbljujoča. Primerno bi bilo tudi, da se uvede nadzor nad uhajanjem večjih plastičnih frakcij, ki bi potencialno lahko onesnaževale in kasneje prehajale v mikroplastiko v reke.

Na podlagi naših ugotovitev lahko potrdimo, da je mikroplastika res prisotna povsod in zato tudi velik okoljski izziv. V svetu velikokrat zasledimo reševanje problematike onesnaženja s plastiko, vendar pa znanstveniki zaenkrat premalo pozornosti posvetijo mikroplastiki in primerni metodi za ugotavljanje prisotnosti le-te v vodnih telesih. Pomembno je, da se razvije metoda, ki bo nadzorovala in spremljala prisotnost teh delcev v rekah in drugih vodnih telesih. Tako bi lahko raziskovalci in znanstveniki bolj natančno določili stopnjo onesnaženosti rek z mikroplastičnimi delci.

6 POVZETEK

Mikroplastika je v današnjem svetu zelo velik globalni problem, o katerem se v zadnjem času veliko govori. Mikroplastiko predstavljajo vsi plastični delci, manjši od 5 mm, ki jih lahko proizvajamo v takšnih dimenzijah, ali pa nastanejo z razpadom večjih delcev plastike ob uporabi ali ko nastane odpadki. Je onesnažilo, ki predstavlja veliko grožnjo tako okolju kot tudi ljudem in drugim organizmom, saj jo lahko dandanes zaradi njene razširjenosti in majhnosti najdemo praktično povsod. Prav zaradi njene majhnosti jo lahko zaužijejo vodni organizmi, kar lahko močno negativno vpliva na njihovo preživetje, telesno pripravljenost, reprodukcijo in zdravje na splošno. Vedno večji problem predstavlja mikroplastika v sladkovodnih celinskih sistemih, kot so manjša jezera in reke, ki delujejo kot pomembne transportne poti mikroplastike in jo tako zanašajo dalje v vse večje vodne sisteme in posledično morja.

V diplomskem delu smo testirali metodo vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije v dveh manjših rekah – Paki in Savinji. Metodo vzorčenja mikroplastike s pomočjo naprave za črpanje in filtracijo – vzorčevalnik FVO, smo testirali dvakrat na osmih izbranih lokacijah na dveh rekah. Želeli smo preveriti, ali je ta metoda ustrezna za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih. Poleg tega smo želeli ugotoviti tudi, ali je v teh vodotokih prisotna mikroplastika, ter v kakšnih količinah je prisotna.

Diplomsko delo je bilo sestavljeno iz dveh delov. V prvem, terenskem delu, smo s pomočjo vzorčevalnika prečrpali po 1 m³ vode iz reke Pake in Savinje. Na vsaki lokaciji smo najprej vedno izmerili fizikalno-kemijske parametre. V drugem delu smo vzorce prenesli v laboratorij ter izvedli obdelavo oz. pripravo vzorcev ter analizo vsebnosti mikroplastike. Priprava in analiza vzorcev je bila zamudna, saj je metodologija zahtevala veliko časa med sušenjem in oksidacijo ter veliko ročnega dela.

Vzorčenje in analiza sta pokazala, da je metoda vzorčenja mikroplastike na osnovi črpanja in filtracije primerna za vzorčenje mikroplastike v rekah Paka in Savinja. Čeprav je celoten postopek analize v laboratoriju zamuden, je vzorčenje na terenu hitro in enostavno. Omogoča enostaven pristop k vodi ter je primeren za vzorčenje mikroplastike tako v manjših kot tudi večjih rekah ter drugih vodnih telesih. Seveda je treba poudariti, da metoda zaradi svojega dolgega postopka ni zanesljiva, saj lahko pride do kontaminacije. Primerna bi bila nadgradnja vzorčevalnika FVO, ki bi zagotavljala boljše in natančnejšo analizo.

Rezultati vzorčenja so pokazali, da se tudi v SAŠA regiji, pa čeprav v manjših rekah, nahaja mikroplastika, ki lahko ima velik negativen vpliv tako na živali, kot tudi ljudi. Vsebnost mikroplastike v reki Paki pri prvem vzorčenju je bila 11 mikroplastičnih delcev/m³, pri drugem vzorčenju pa 7 mikroplastičnih delcev/m³. V reki Savinji smo pri prvem vzorčenju našli 4 mikroplastične delce/m³, pri drugem vzorčenju pa 1 mikroplastičen delec/m³.

Takšni rezultati kažejo na to, da je mikroplastika dandanes prisotna res povsod, tudi v manjših vodotokih, kot sta Paka in Savinja. Primerno bi bilo, da bi se uvedla zanesljiva standardizirana metoda za vzorčenje mikroplastike v rekah. Prav tako bi bilo dobro nadzorovati vnos ter izvajati redno analizo prisotnosti mikroplastike, tako v rekah kot tudi vseh drugih vodnih telesih.

7 SUMMARY

Microplastics are a very big global problem in today's world, which has been discussed a lot recently. Microplastics are all plastic particles smaller than 5 mm, which can be produced in such dimensions or are created by the breakdown of larger plastic particles during use or when waste is generated. It is a pollutant that poses a great threat to the environment, as well as to humans and other organisms, because nowadays, due to its prevalence and small size, it can be found practically everywhere. It is precisely because of its small size that it can be ingested by aquatic organisms, which can have a strong negative impact on their survival, physical fitness, reproduction and health in general. An increasingly big problem is microplastics in freshwater inland systems, such as smaller lakes and rivers, which act as important transport routes for microplastics and thus carry them further into larger water systems and consequently the seas.

In this thesis, we tested a method of sampling microplastics based on pumping and filtration in two smaller rivers - the Paka and the Savinja. The method of sampling microplastics using a pumping and filtration device – the FVO sampler – was tested twice at eight selected locations on two rivers. We wanted to check whether this method is suitable for sampling microplastics in water bodies. We also wanted to determine whether microplastics are present in these two watercourses and in what quantities.

The diploma thesis consisted of two parts. The first, field work, where we pumped 1 m³ of water from the Paka and Savinja rivers using a sampler. At each location, we always first measured the physical and chemical parameters. In the second part, we transferred the samples to the laboratory and performed processing or sample preparation and analysis of the microplastic content. Sample preparation and analysis was time-consuming, as the methodology required a lot of time during drying and oxidation and a lot of manual work.

Sampling and analysis showed that the microplastic sampling method based on pumping and filtration is suitable for sampling microplastics in the Paka and Savinja rivers. Although the entire analysis process in the laboratory is time-consuming, sampling in the field is quick and easy. It allows easy access to water and is suitable for sampling microplastics in both smaller and larger rivers and other water bodies. Of course, it should be emphasized that the method is not reliable due to its long process, as contamination can occur. An upgrade of the FVO sampler would be appropriate, providing better and more accurate analysis.

The sampling results showed that microplastics are also found in the SAŠA region, although in smaller rivers, and can have a major negative impact on both animals and humans. The content of microplastics in the Paka River during the first sampling was 11 microplastic particles/m³, and during the second sampling it was 7 microplastic particles/m³. In the Savinja River, we found 4 microplastic particles/m³ during the first sampling, and 1 microplastic particle/m³ during the second sampling.

Such results indicate that microplastics are present everywhere today, even in smaller watercourses such as the Paka and Savinja. It would be appropriate to introduce a reliable standardized method for sampling microplastics in rivers. It would also be a good idea to control the input and conduct regular analysis of the presence of microplastics in rivers as well as all other water bodies.

8 VIRI IN LITERATURA

1. Campanale C., Stock F., Massarelli C., Kochleus C., Bagnuolo G., Reifferscheid G., Uricchio V.F. (2020): Microplastics and their possible sources: The example of Ofanto river in southeast Italy, *Environmental Pollution*, Volume 258, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113284>
2. Centa M. (2016): Ugotavljanje koncentracij mikroplastike v slovenskih vodotokih in jezerih, magistrsko delo št. 257, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=97837&lang=slv>
3. Davison T. (2024): How Much Plastic Actually Gets Recycled?, Clean hub, Plastic pollution, <https://blog.cleanhub.com/how-much-plastic-is-recycled#two>
4. Evropska komisija (2023): UREDBA KOMISIJE (EU) 2023/2055 z dne 25. septembra 2023 o spremembi Priloge XVII k Uredbi (ES) št. 1907/2006 Evropskega parlamenta in Sveta o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (REACH) glede sintetičnih polimernih mikrododelcev, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R2055>
5. Evropski parlament (2018): Mikroplastika – izvor, vpliv in rešitve, <https://www.europarl.europa.eu/topics/sl/article/20181116STO19217/mikroplastika-izvor-vpliv-in-resitve>
6. ISO 24187 - <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:24187:ed-1:v1:en> (1.8.2025)
7. Kovač Viršek M. (2020): Potovanje mikroplastike po vodnih ekosistemih v Sloveniji, Vodni dnevi 2020, Simpozij z mednarodno udeležbo, medmrežje: https://sdzv-drustvo.si/wp-content/uploads/2020/10/7_KOVAC-clanek.pdf
8. Kunz A., Schneider F., Anthony N., Lin H. (2023): Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways, *Environmental Pollution*, Volume 321, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121096>.
9. Loftly J., Ouro P., Wilson C.A.M.E. (2023): Microplastics in the riverine environment: Meta-analysis and quality criteria for developing robust field sampling procedures, *Science of the total environment*, volume 863, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160893>
10. Mani T., Hauk, A., Walter U., Burkhardt-Holm P. (2016): Microplastics profile along the Rhine River, *Scientific reports*, volume 5, <https://doi.org/10.1038/srep17988>.
11. Matjašič T., Mori N., Hostnik I., Bajt O., Kovač Viršek M. (2023): Microplastic pollution in small rivers along rural–urban gradients: Variations across catchments and between water column and sediments, *Science of The Total Environment*, Volume 858, Part 3, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160043>

12. McCormick A., Hoellein T., Mason S., Schluep J., Kelly. J. (2014): Microplastic is an Abundant and Distinct Microbial Habitat in an Urban River, Environmental Science and Technology, volume 48, issue 20, DOI: [10.1021/es503610r](https://doi.org/10.1021/es503610r)
13. Peterlin M. (2012): Odpadki v morju, Naloga: I/3/4/2, Izvajanje morske direktive, http://www.statika.evode.gov.si/fileadmin/direktive/MSFD_P/2012/2012_I_3_4_02_P_01.pdf
14. Plastics Europe (2023): Plastics – the fast Facts 2023, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>.
15. Plastics Europe (2024): Plastics – the fast Facts 2024, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>.
16. Proshad R., Kormoker T., Islam S., Haque M.A., Rahman M., Mithu M.R. (2018): Toxic effects of plastic on human health and environment : A consequences of health risk assessment in Bangladesh, International Journal of Health, Volume 6, 1-5, DOI: [10.14419/ijh.v6i1.8655](https://doi.org/10.14419/ijh.v6i1.8655)
17. Rajala A. (2024): Overview of ISO 16094 standards for microplastic analysis of water samples, Environment & Industry, Measurlabs blog, <https://measurlabs.com/blog/iso-16094-standards-for-microplastic-analysis-of-water-samples/>
18. Rios Mendoza L., Balcer M. (2019): Microplastics in freshwater environments: A review of quantification assessment, Trends in analytical chemistry, volume 113, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.020>
19. Scherer C., Weber A., Stock F., Vurusic S., Egerci H., Kochleus C., Arendt N., Foeldi C., Dierkes G., Wagner M., Brennholt N., Reifferscheid G. (2020): Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river, Science of the total environment, Volume 738, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139866> (5.2.2025)
20. Schrank I., Löder M.G.J., Imhof H.K., Moses S.R., Heß M., Schwaiger J., Laforsch C. (2022): Riverine microplastic contamination in southwest Germany: A large-scale survey, Earth science, Frontiers, DOI: 10.3389/feart.2022.794250.
21. Shi H., Wang X., Zhu L., Li D. (2023): Comprehensive Comparison of Various Microplastic Sampling Methods in Sea Water: Implications for Data Compilation, Water, MDPI, <https://doi.org/10.3390/w15061035>.
22. Stratmann C., Dris R., Gasperi J., Buschman F., Markus A., Guerin S., Dick Vethaak A., Tassin B. (2024): Monitoring microplastics in the Seine River in the Greater Paris area, Frontiers in Earth Science, volume 12, <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1386547>
23. Tamminga M., Stoewer S.C., Fischer E.K. (2019): On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis, Environmental pollution, volume 254, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112970>.

24. Uurasjärvi E., Hartikainen S., Setälä O., Lehtiniemi M., Koistinen A. (2020): Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake, *Water Environment Research*, volume 92, <https://doi.org/10.1002/wer.1229>.
25. Weston J., Carrillo-Barragan P., Linley T., Reid W., Jamieson A. (2020): New species of *Eurythenes* from hadal depths of the Mariana Trench, Pacific Ocean (Crustacea: Amphipoda), *Zootaxa* 4748 (1): 163–181, <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4748.1.9>
26. Medmrežje 1: <https://www.vreme-slovenija.si/> (30.7.2025)
27. Medmrežje 2: <https://www.arso.gov.si/vode/> (30.7.2025)



TERAIN SHEET FOR MP SAMPLING - water

Date: _____

Person sampling: _____

Sample type: _____

Sample name: _____

Sample location: _____ (_____ ° N/S _____ ° E/W)

Start and end time of sampling: Start: HH:MM End: HH:MM

Parameters:

Weather, air temperature: _____ °C

Water temperature: _____ °C

Water pH: _____

Water turbidity: _____ NTU

Water DO: _____ mgO₂/L

Water EC: _____ μS/cm

Days since last rain: _____ days

Level of urbanization: Unpopulated wilderness / Mostly unvisited wilderness / Rural areas

Suburban area / Urbanized area with natural riverbed / Urbanized area with semi- artificial riverbed / other: _____

Visual description of sampling site:

(Presence of rapids, turbidity of water surface, color, large debris in/close to water, is the sampling site in a curve or on a straight part of the river, etc.)