

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**RAZVOJ IN TESTIRANJE PROTOTIPA ZA VZORČENJE
MIKROPLASTIKE V VODNIH TELESIH**

ALJOŠA KRAJNC

Velenje, 2025

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**RAZVOJ IN TESTIRANJE PROTOTIPA ZA VZORČENJE
MIKROPLASTIKE V VODNIH TELESIH**

ALJOŠA KRAJNC

Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentor: doc. dr. Gašper Gantar

Somentorica: doc. dr. Anja Bubik

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

Študent Fakultete za varstvo okolja **Aljoša Krajnc** lahko izdela magistrsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Razvoj in testiranje prototipa za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku:

Development and testing of a microplastics sampling prototype for water bodies

Mentor: **doc. dr. Gašper Gantar**

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

Magistrsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom.

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

Podpisani Aljoša Krajnc, vpisna številka 34220027, študent visokošolskega strokovnega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtor magistrskega dela z naslovom **Razvoj in testiranje prototipa za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih**, ki sem ga izdelal pod mentorstvom doc. dr. Gašperja Gantarja in somentorstvom doc. dr. Anje Bubik.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oziroma citirana v skladu z navodili FVO;
- 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 Zala Podkrižnik, dipl. slov. in dipl. germ.,
- dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani FVO;
- sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični

Datum: _____

Podpis avtorja: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Gašperju Gantarju ter somentorici doc. dr. Anji Bubik za strokovno in dosledno vodenje ter vse usmeritve, ki so mi bile v veliko pomoč pri pisanju magistrskega dela. Zahvaljujem se tudi predavatelju Visoke šole za proizvodno inženirstvo Sebastjanu Kotniku za strokovno pomoč pri izdelavi prototipa za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih.

Iskreno se zahvaljujem tudi svoji družini, ki mi ves čas stoji ob strani in podpira mojo izobraževalno in karierno pot.

IZVLEČEK

Ljudje se vse bolj zavedamo negativnih vplivov uporabe in odlaganja plastike v okolje. Nova dognanja o vplivih mikroplastike na zdravje ljudi in živali poudarjajo potrebo po raziskovanju tega onesnažila. Vendar pa naletimo na izzive pri vzorčenju, identifikaciji in kvantifikaciji mikroplastičnih delcev. V magistrskem delu smo se osredotočili na reševanje problema vzorčenja. Pregledali smo objave o vzorčenju in analizi mikroplastike v zadnjih desetih letih ter razvili prototip za vzorčenje mikroplastike z ustrezno metodo, prilagojeno zahtevam rek Savinjsko-Šaleške regije. Pri razvoju smo sledili priporočilom za razvoj in izdelavo izdelkov (VDI 2221). Prototip smo uspešno izdelali in testirali na treh lokacijah. Izpolnili smo vse zahteve konstrukcijskega zahtevnika naprave ter prototip nadgradili glede na ugotovitve testiranj. Na testnem vzorčenju v dveh manjših vodnih telesih smo potrdili prisotnost mikroplastičnih delcev.

KLJUČNE BESEDE: mikroplastika, razvojno-konstrukcijski proces VDI 2221, metoda vzorčenja, onesnaževala, reke

ABSTRACT

People are increasingly aware of the negative impacts of plastic usage and disposal in the environment. Recent findings on the effects of microplastics on human and animal health highlight the need to investigate this pollutant. However, challenges arise in sampling, identifying, and quantifying microplastic particles. This master's thesis focuses on addressing the sampling issue. We reviewed publications on microplastic sampling and analysis from the past ten years and developed a prototype for microplastic sampling along with a suitable method, tailored to the requirements of the rivers in the Savinjsko-Šaleška region. During development, we followed the product design recommendations (VDI 2221). The prototype was successfully constructed and tested at three locations. All requirements specified in the device's design specifications were met, and the prototype was upgraded based on testing insights. Test sampling in two small water bodies confirmed the presence of microplastic particles.

KEYWORDS: microplastics, development and construction process VDI2221, sampling method, pollutants, rivers

KAZALO

1.	UVOD	1
1.1	Namen in cilji	2
1.2	Hipoteze	2
1.3	Metode dela	2
2.	TEORETIČNE OSNOVE	3
2.1	Mikroplastika	3
2.2	Vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih	6
2.2.1	Pregled nekaterih metod že izvedenih raziskav	10
2.2.2	Načini črpanja in vrste uporabljenih črpalk	20
2.3	Metoda viharjenja možganov (Brainstorming)	21
2.4	Metode za vrednotenje rešitev	22
2.5	Razvoj izdelkov po priporočilih VDI 2221	25
3.	MATERIALI IN METODE	26
3.1	Razvoj in izdelava prototipa	26
3.1.1	Tolmačenje naloge	26
3.1.2	Koncipiranje	27
3.1.3	Vrednotenje konceptnih rešitev in izbor najboljšega koncepta	30
3.1.4	Snovanje	31
3.1.5	Razdelava	32
3.2	Testiranje prototipa in metode vzorčenja	32
3.3	Priprava in analiza vzorcev	35
3.3.1	Priprava vzorcev vode	36
3.3.2	Spektroskopska identifikacija delcev	36
4.	REZULTATI Z DISKUSIJO	38
4.1	Prototip za vzorčenje mikroplastike	38
4.1.1	Nadgradnja po prvem testiranju	39
4.2	Rezultati fizikalno-kemijskih meritev na terenu	40
4.3	Kemijska identifikacija delcev	42
5.	SKLEPI	45
6.	POVZETEK	46
7.	SUMMARY	47
8.	LITERATURA	48

KAZALO SLIK

Slika 1: Eurythenes plasticus, globokomorski organizem, v katerem so raziskovalci odkrili mikroplastično vlakno – dokaz, da je mikroplastika prisotna v najbolj odročnih krajih in da predstavlja resen izziv (avtor: Johanna Weston).....	3
Slika 2: Različne oblike mikroplastike; A in B: folije; C: vlakna; D: amorfni delci; E: mikrokroglice; F: tvorbe pene; (Wu et al., 2018).....	5
Slika 3: Stolpčni diagram prikaza različnih metod vzorčenja mikroplastike glede na tip vodnega telesa.....	9
Slika 4: UFO" filtrirna naprava za vzorčenje mikroplastike (vir: Rist et al., 2020).....	20
Slika 5: Grafični prikaz poteka viharjenja možganov.	21
Slika 6: Primer vrednotenja različnih rešitev po točkah z dodanim faktorjem težkanja (vir: Hlebanja, 2003)	23
Slika 7: Primer matrike vrednotenja koncepta rešitve (vir: Križnik, 2015)	23
Slika 8: Grafični prikaz postopka VDI 2221	25
Slika 9: Skica koncepta z izmenljivimi filtrirnimi diski	28
Slika 10: Skica koncepta z izmenljivo filtrirno vrečo.....	28
Slika 11: Skica koncepta z izmenljivim jeklenim filtrom.	29
Slika 12: 3D model in shematika prototipa in filtrirnega sistema (avtor: Sebastjan Kotnik) ...	31
Slika 13: Karta SAŠA regije z vodotoki, naselji in industrijskimi obrati in vzorčnima točkama x. (avtor: Klemen Kotnik)	33
Slika 14: Lokacija vzorčenja na reki Paki (A) ter reki Savinji (B).	34
Slika 15: Merjenje fizikalno kemijskih lastnosti vode s terenskim kovčkom.....	35
Slika 16: Jeklen filter in z zajetim vzorcem (A) ter filtrat zajet v filtrirni komori (B).....	35
Slika 17: FTIR-ATR Alpha II spektrometer proizvajalca Bruker	36
Slika 18: prototip z vsemi sestavnimi deli.	38
Slika 19: Prototip za vzorčenje mikroplastike med obratovanjem na Centralni čistilni napravi Šaleške doline, 26. 1. 2024.....	39
Slika 20: Teleskopska palica za sesalno glavo.....	39
Slika 21: Voziček za prevoz črpalke z zaklopkami za pritrditev črpalke.	40
Slika 22: Spekter analizirane delca Paka	42
Slika 23: Mikroplastični delček vzorca Paka; PET (levo) in SEBS (desno) pod 20-kratno povečavo.	44
Slika 24: Prikaz glavnih komponent vzorčevalnika.	54
Slika 25: Ročica za hladen vžig	56

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pregled objavljenih metod vzorčenja vodnih teles med leti 2012 in 2024.....	7
Preglednica 2: Konstrukcijski zahtevnik naprave za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih	26
Preglednica 3: Matrika vrednotenja konceptnih idej z težkanjem kriterijev.	30
Preglednica 4: Preglednica rezultatov fizikalno kemijskih meritev na reki Paki in Savinji.....	40
Preglednica 5: Preglednica rezultatov analize FTIR.....	43
Preglednica 6: pregleden prikaz najdenih delcev po posamični lokaciji	43

1. UVOD

Mikroplastika je izziv, saj predstavlja resno grožnjo za okolje in zdravje ljudi. Mikroplastika so majhni delci plastike, manjši od 5 mm, ki nastanejo zaradi razgradnje večjih kosov plastike ali pa so namerno dodani nekaterim izdelkom, kot so kozmetika, pasta za zobe ali sredstva za čiščenje (Ghosh et al., 2023). Zaradi svoje velikosti se lahko enostavno prenese v tekoče vode, morja, oceane, tla in zrak, kjer lahko vpliva na žive organizme, ki jih zaužijejo ali vdihnejo.

Mikroplastika, ki se pogosto pojavi kot posledica razgradnje večjih kosov plastike, predstavlja vse večji problem v rekah in drugih vodnih telesih. Ti drobni delci plastike so zaskrbljujoči zaradi svoje obstojnosti v okolju in sposobnosti, da nase vežejo strupene snovi in potencialne patogene mikroorganizme (Viršek et al., 2017). Te reke nato mikroplastične delce prenašajo v morja, kar povečuje obseg onesnaženja. Zato je ključnega pomena, da se poveča ozaveščenost o tej problematiki in razvijejo učinkovite strategije za zmanjšanje vnosa mikroplastike v naše vodne tokove.

V zadnjih dveh desetletjih so začeli strokovnjaki problematiko mikro- in makroplastike bolj temeljito raziskovati, vendar zakonodaja na področju vzorčenja mikroplastike še ni dodelana in predstavlja oviro ter velik izziv za raziskovalce, saj vsak opravlja vzorčenje na svoj način. Zato rezultati med različnimi raziskavami niso popolnoma primerljivi. Danes poznamo različne nestandardizirane metode za zajem vzorcev, obdelavo vzorcev ter identifikacijo mikroplastike v vodnih vzorcih. Regulative glede vzorčenja in obdelave vzorcev še ni. Obstaja samo standard, ki podaja načela za vzorčenje (International Organization for Standardization, 2023).

Za zajem vzorcev obstaja več metod in pristopov, kot so:

- manta mreža (Kunz et al., 2023; Mani et al., 2015), ki je najpogosteje uporabljena zaradi cene in enostavnosti izvedbe,
- planktonska mreža (Campanale et al., 2020; Scherer et al., 2020),
- črpalka z ročnim presevanjem vzorca (Matjašič et al., 2023; Zhao et al., 2015),
- zajem vode z vedrom ali steklenico (Idowu et al., 2024; Su et al., 2016).

Metode so dolgotrajne in ne povsem zanesljive (pri vsakem procesu v metodi – zajemu, filtraciji, rokovanjem z vzorcem ali transportu se lahko pojavi izguba vzorca). Reprezentativna zajeta količina vode v obstoječih metodah znaša (vsaj) 1 m³. Vzorci, ki so pridobljeni iz zajete vode pri uporabi različnih metod za zajem in obdelavo vzorcev so različno skoncentrirani. Bolj kot je zajeti vzorec skoncentriran, manjše so potencialne izgube mikroplastičnih delcev pri nadaljnjem rokovanju in obdelavi vzorca za identifikacijo.

Pomanjkljivost obstoječih metod zajema vzorcev je, da so primerne za zajem na morjih, jezerih in večjih rekah, kjer se t. i. manta mreže vleče s plovilom ali pa namesti z mosta, zajemi so dolgotrajni, uporaba manta mrež in planktonskih mrež pa tudi zahteva dostop do sredine vodotoka, kar pomeni, da vzorčenje manjših rek in vzorčenje na delih brez mostov ter v plitvih rekah ni možno.

1.1 Namen in cilji

Namen magistrskega dela je odpraviti pomanjkljivosti pri zajemu in obdelavi vzorcev vode za analizo mikroplastike. Zmanjšati želimo izgube zajete mikroplastike med vzorčenjem z nadgradnjo načina zajema in priredbo metode vzorčenja. S tem bomo povečali zanesljivost rezultatov, ki se jih pridobi v fazi identifikacije, ter razvili sistem, ki bo omogočil zajem vzorcev v manjših/plitkih rekah in potokih, kjer vzorčenja s t. i. manta mrežo ni mogoče izvesti.

Glavni cilj magistrskega dela je razvoj črpalno-filtrirnega sistema za zajem vzorcev vode v manjših/plitkih rekah in potokih, ki omogoča doseg naslednjih ciljev. Namen zadanih ciljev je pridobitev metode ki zajema najbolj pogoste parametre na področju vzorčenja mikroplastike z naenkrat, ki se lahko uporabi v večih različnih okoliščinah

Cilj 1: Hitro vzorčenje.

Cilj 2: Vzorčenje tudi v manjših/plitkih rekah in potokih.

Cilj 3: Natančno poznavanje parametrov vzorčenja (prečrane količine, pretoka, temperature ...), brez izgub in zanesljivo zbiranje podatkov za boljšo interpretacijo.

Cilj 4: Stroškovno učinkovit zajem skoncentriranih vzorcev.

1.2 Hipoteze

Hipoteza 1: Prototip za vzorčenje mikroplastike omogoča filtracijo 1 m³ vode v 15 minutah.

Hipoteza 2: Prototip za vzorčenje mikroplastike omogoča pridobivanje koncentriranega vzorca z volumnom dveh litrov.

Hipoteza 3: Prototip je primeren za zajem vzorcev v plitkih rekah in potokih.

1.3 Metode dela

Metoda 1: Pregled obstoječih metod za zajem vzorcev in lokacije vzorčenja.

Metoda 2 Razvoj metode za vzorčenje mikroplastike z vzorčevalno napravo glede na najboljše razpoložljive prakse.

Metoda 3: Razvoj in izdelava prototipa za vzorčenje mikroplastike po smernicah za razvoj tehničnih izdelkov VDI 2221.

Metoda 4: Testiranje prototipa za vzorčenje mikroplastike na manjših rekah (predvidoma Paki in Savinji).

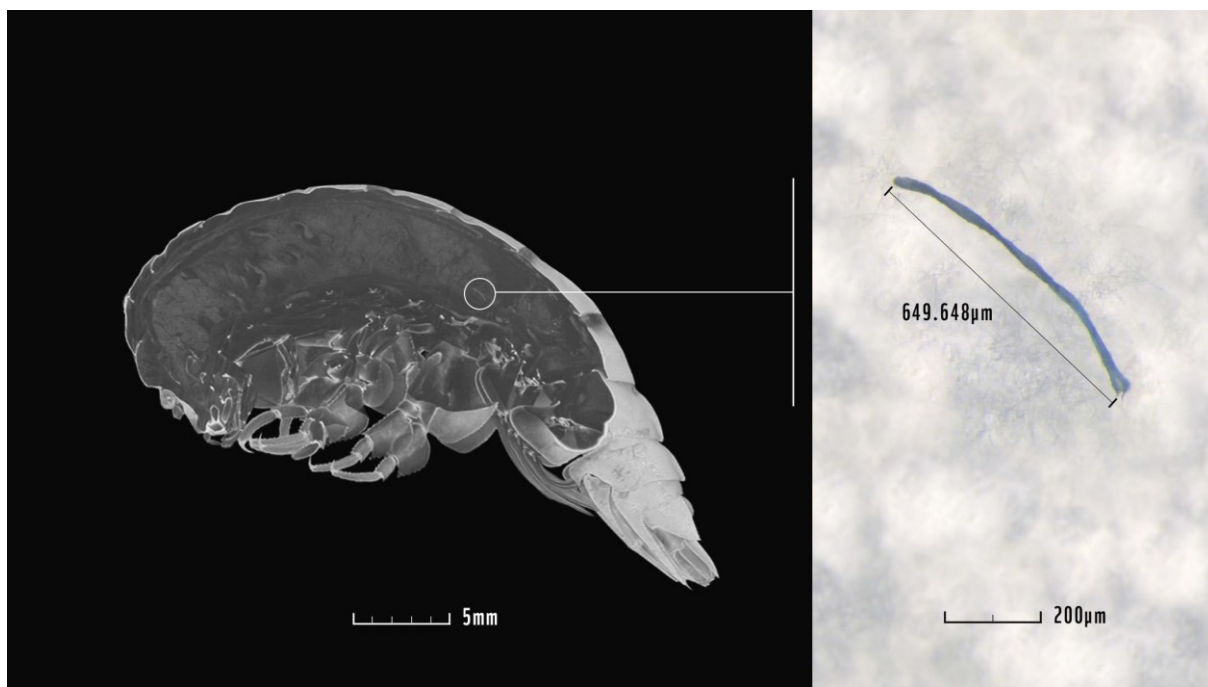
Metoda 5: Laboratorijska obdelava vzorcev.

Metoda 6: Analiza zbranih delcev pod mikroskopom in s FTIR spektrometrijo.

2. TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Mikroplastika

Mikroplastika je novodobno onesnažilo. So majhni netopni koščki plastike različnih oblik in velikosti, ki se v okolju znajdejo kot posledica aktivnosti v zvezi z proizvodnjo, uporabo ali odlaganjem plastike (Akdogan & Guven, 2019; Chandra & Walsh, 2024). Postaja vse bolj pereča tema v zvezi z zdravjem ljudi in okolja, še posebej zaradi svoje prisotnosti v rečnih in morskih vodnih telesih, saj se je le ta znašla v tkivu globokomorskega organizma, ki je po plastiki dobil tudi ime *Eurythenes plasticus* (Weston et al., 2020) (slika 1). Med drugimi so bili v zadnjih letih pridobljeni tudi dokazi o vplivih mikroplastike na zdravje ljudi in živali (Barboza et al., 2018; Prata et al., 2020; Smith et al., 2018; Vethaak & Legler, 2021), ter dokazi, da mikroplastika vpliva na varnost preskrbe s hrano in pitno vodo (Barboza et al., 2018).



Slika 1: *Eurythenes plasticus*, globokomorski organizem, v katerem so raziskovalci odkrili mikroplastično vlakno – dokaz, da je mikroplastika prisotna v najbolj oddaljenih krajih in da predstavlja resen izziv (avtor: Johanna Weston)

Mikroplastični delci nastanejo kot posledica razgradnje večjih kosov, kot so večji kosi plastičnih smeti, gumeni delci pnevmatik, vlakna sintetičnih oblačil, plastike, ali so namerno dodani nekaterim izdelkom, kot so kozmetični izdelki, čistila in oblačila (pogosto kot abrazivi ali pa le iz estetskih razlogov). Zaradi svoje majhnosti in obstojnosti se mikroplastika lahko prenese v vodne tokove, morja, oceane, tla in zrak, kjer predstavlja grožnjo za žive organizme. Beseda mikroplastika je bila prvič omenjena leta 1968 v poročilu Laboratorija za materiale Ameriških zračnih sil, kjer so opisovali nastanek teh delcev kot rezultat plastične deformacije materiala (Imgram et. al, 1968). Kot onesnaževalo pa je mikroplastika prvič dobila pozornost leta 2004 v članku Richarda C. Thompsona in sodelavcev z naslovom »Lost at Sea: Where Is All the Plastic?«, objavljenem v reviji Science (Thompson et al., 2004). V zadnjih desetletjih so znanstveniki izvedli številne raziskave o mikroplastiki v evropskih rekah. Študija o reki Tisi v Srednji Evropi je pokazala prisotnost mikroplastike v fino zrnatih sedimentih. Na stopnjo kontaminacije pomembno vplivajo različni okoljski dejavniki (Balla et al., 2024). Ta raziskava je poudarila pomembnost dolgoročnega spremljanja mikroplastike za boljše razumevanje vpliva onesnaževanja na okolje.

Prav tako je bila izvedena študija o prisotnosti mikroplastike v komercialnih ribjih vrstah v Združenem kraljestvu, ki je vključevala reko Temzo in estuarij reke Severn v vzhodni Angliji. Rezultati kažejo, da se število mikroplastičnih delcev in njihova masa razlikujeta glede na vrsto, lokacijo in habitat; bentonske ribe v reki Severn so bile še posebej izpostavljene večjim koncentracijam mikroplastike (Horton et al., 2024).

Te raziskave poudarjajo resnost problema onesnaženosti z mikroplastiko. Poleg tega je pregledni članek, osredotočen na mikroplastiko v glavnih evropskih rekah, podrobno analiziral kemijsko sestavo ter možne vire rečne mikroplastike. Ugotovili so, da so polistiren, polipropilen in polietilen najpogostejši mikroplastični delci (Gao et al., 2024).

Pomemben del razumevanja nastanka mikroplastike je poznavanje dveh glavnih kategorij mikroplastike po njihovem izvoru, ki se razlikujeta po izvoru in mehanizmu nastanka:

Primarna mikroplastika nastaja že v industrijskih postopkih in je dodana v izdelke, kot so kozmetični pripravki in čistila, ter vsebuje specifične aditive. V to skupino sodijo tekstilna vlakna, granule surove plastike za proizvodnjo, bleščice in mikrokroglice, ki se uporabljajo kot abrazivi.

Nasprotno pa **sekundarna mikroplastika** nastane zaradi razgradnje večjih kosov plastike, kot so embalaža ter drugi predmeti vsakodnevne uporabe, ki se s postopno obrabo in/ali fotokemično razgradnjo pretvorijo v drobne delce.

Mikroplastika je prepoznana kot resen okoljski problem tudi v Sloveniji. Raziskave so potrdile, da se mikroplastični delci pojavljajo v različnih okoljih, kot so reke, jezera in podzemne vode (Jelen et al., 2024; Laglbauer et al., 2014; Matjašič et al., 2023). Mikroplastika je prepoznana kot resen okoljski problem tudi v Sloveniji. Raziskave so potrdile, da se mikroplastični delci pojavljajo v različnih okoljih, kot so reke, jezera in podzemne vode (Valentič et al., 2022).

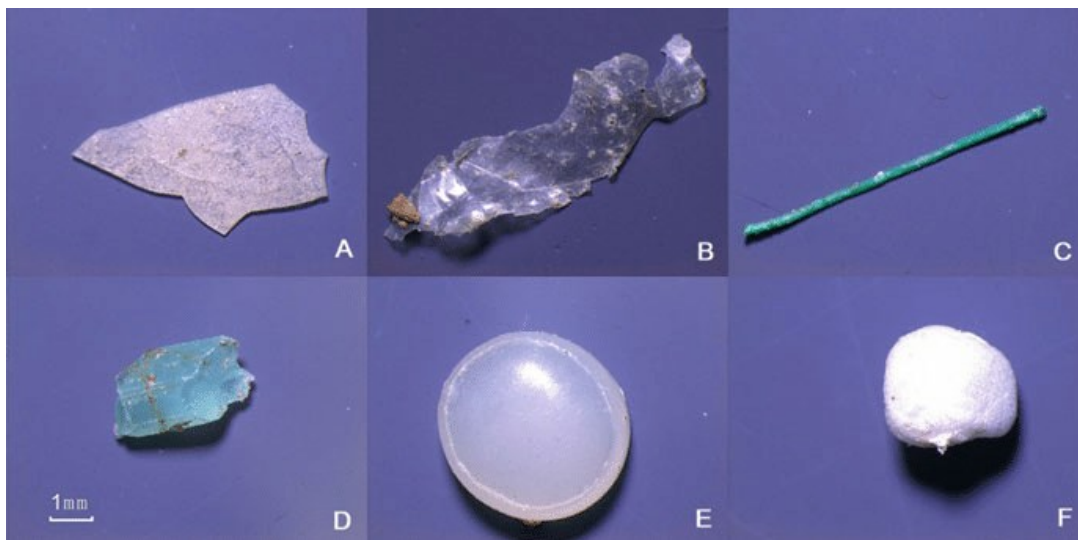
Mikroplastika v Sloveniji prihaja iz različnih virov, vključno z odpadno vodo, deževnico in odlagališči odpadkov. Polimerni analizi vzorcev so pokazali, da so najpogostejši polimeri PET, PU in PA, ki se uporabljajo v različnih izdelkih, kot so platenke, oblačila in čistilne gobice (Matjašič et al., 2023; Valentič et al., 2022).

Raziskovanje mikroplastike predstavlja številne izzive, ki jih morajo raziskovalci premagati, da bi pridobili natančne in zanesljive podatke o prisotnosti in vplivih teh delcev v okolju. Eden glavnih izzivov je **heterogenost delcev**. Mikroplastika se pojavlja v različnih oblikah, velikostih in vrstah polimerov, kar otežuje standardizacijo metod vzorčenja in analize. Raziskovalci se soočajo z izzivom, kako zajeti reprezentativne vzorce, ki bi odražali dejansko stanje v okolju. Poleg tega je mikroplastika prisotna v različnih okoljih, kot so vode, tla in zrak, kar zahteva prilagoditev metod vzorčenja za vsako specifično okolje.

Z našim trenutnim znanjem in analizami poznamo nekaj struktur mikroplastike, ki so navedene in prikazane na sliki 2:

- **Folije (filmi):** Tanki, ploščati deli, ki nastanejo pri razgradnji plastične embalaže, kot so vrečke in ovoji. Njihova velika površina in tankost vplivata na njihovo razgradnjo in interakcijo z okoljem.
- **Vlakna:** Dolgi, nitasti delci, ki se večinoma sproščajo iz sintetičnih tekstilov. So lahka in se zlahka prenašajo preko vode in zraka.
- **Amorfni delci:** Nepravilni delci, ki nastanejo pri razgradnji večjih plastičnih predmetov. Njihova nepredvidljiva oblika in velikost vplivata na to, kako se usedajo in razgrajujejo.
- **Mikrokroglice:** Majhni, okrogli delci, ki so namenoma izdelani za kozmetiko in industrijsko uporabo. So skoraj enotne velikosti.

- **Pene (penaste tvorbe):** Porozni, lahki delci iz razširjenih plastik, kot so penasti lončki ali izolacijski materiali. Njihova nizka gostota omogoča, da potujejo na dolge razdalje po vodi ali zraku.



Slika 2: Različne oblike mikroplastike; A in B: folije; C: vlakna; D: amorfni delci; E: mikrokroglice; F: tvorbe pene; (Wu et al., 2018).

Poleg na zgornji sliki prikazanih struktur obstajajo še peleti in granule, ki so po obliki podobni mikrokroglicam, vendar so večji, njihova uporaba je kot primarni material za vlivanje v kalupe in vpihovanje in so zaradi tega prisotne v okolici ter dolvodno plastične industrije.

Analitske metode za identifikacijo in kvantifikacijo mikroplastike so eden trenutno ključnih izzivov. Trenutno uporabljene metode, kot so infrardeča spektroskopija s Fourierjevo transformacijo (FTIR), mikroskopija, ramanska spektroskopija in plinska masna spektroskopija, so pogosto drage, dolgo trajajoče in zahtevajo visoko usposobljeno osebje. Poleg tega so te metode omejene pri zaznavanju zelo majhnih delcev, kar pomeni, da lahko del mikroplastike ostane neodkrit. Raziskovalci si prizadevajo razviti bolj učinkovite in dostopne metode, ki bi omogočile hitrejšo in natančnejšo analizo vzorcev.

Kontaminacija vzorcev med vzorčenjem in analizo je še eden večjih izzivov. Plastika je prisotna povsod, tudi v laboratorijih, kar pomeni, da lahko pride do kontaminacije vzorcev med obdelavo. Raziskovalci morajo sprejeti stroge ukrepe za preprečevanje kontaminacije, kar vključuje uporabo posebnih oblačil, čistih prostorov in neplastičnih pripomočkov. Kljub tem ukrepom je popolna eliminacija kontaminacije skoraj nemogoča, kar lahko vpliva na zanesljivost rezultatov.

Standardizacija metod je ključnega pomena za primerljivost rezultatov med različnimi študijami. Trenutno ni enotnih standardov za vzorčenje, analizo in poročanje o mikroplastiki, kar otežuje primerjavo rezultatov med različnimi raziskavami. Raziskovalci si prizadevajo za razvoj mednarodno sprejetih standardov, ki bi omogočili boljšo primerljivost in zanesljivost podatkov. To vključuje tudi razvoj načina testiranja in standardiziranih protokolov za vzorčenje in analizo, ki bi jih lahko uporabljali raziskovalci po vsem svetu.

2.2 Vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih

Metoda zajemanja vzorčnih podatkov je ključen del raziskovalnega procesa, zlasti pri preučevanju onesnaževal v vodi. Pravilno vzorčenje omogoča raziskovalcem pridobivanje reprezentativnih vzorcev iz vodnih teles, preko katerih lahko analizirajo prisotnost različnih onesnaževal. Ta postopek je nujen za razumevanje obsega in narave onesnaženosti ter za razvoj strategij za njeno zmanjšanje. Onesnaževala v vodi izvirajo iz različnih virov, med drugim iz industrijskih in kmetijskih dejavnosti, odpadnih voda in atmosferskih padavin. Natančno vzorčenje je tako bistveno za zbiranje zanesljivih podatkov, potrebnih za učinkovito upravljanje vodnih virov. Prvi korak vključuje opredelitev raziskovalnih ciljev in določitev specifičnih onesnaževal, ki jih želimo preučiti, sledi izbira ustreznih metod, ki zagotovijo reprezentativne vzorce.

Pregled obstoječe literature je ključnega pomena pri oblikovanju metode vzorčenja. Raziskovalec mora analizirati predhodne študije na izbranem področju, da bi razumel uporabljene metode in njihove rezultate. S tem lahko gradi na že obstoječem znanju in se izogne podvajanju že opravljenih raziskav. Pregled literature omogoča tudi identifikacijo vrzeli v obstoječem znanju, ki jih nova raziskava lahko zapolni. Na tej osnovi raziskovalec oblikuje teoretični okvir in hipoteze, ki jih bo preverjal pri svojem delu.

Pri pripravi metode je pomembno, da raziskovalec natančno opiše postopke zbiranja podatkov. To vključuje opis vzorčnih metod, velikost vzorca, postopke zbiranja podatkov in načine za zmanjšanje pristranskosti. Raziskovalec mora zagotoviti, da so izbrane metode zanesljive in veljavne ter da omogočajo natančno in objektivno analizo podatkov. Poleg tega je pomembno, da raziskovalec opiše, kako bo obravnaval morebitne pristranskosti in zagotovil etičnost raziskave. Metoda vzorčenja je ključnega pomena za uspešno izvedbo raziskave, saj raziskovalcu omogoča, da sistematično in logično pristopi k raziskovalnemu izzivu. Z dobro načrtovano metodo lahko raziskovalec zagotovi, da so njegovi rezultati zanesljivi, veljavni in prispevajo k obstoječemu znanju na določenem področju. Poleg tega dobro dokumentirana metoda omogoča ponovljivost raziskave, kar je ključnega pomena za znanstveno legitimnost raziskave. S tem, ko raziskovalec natančno opiše svoje metode in postopke, omogoči drugim raziskovalcem, da njegovo raziskavo ponovijo in s tem preverijo ugotovitve.

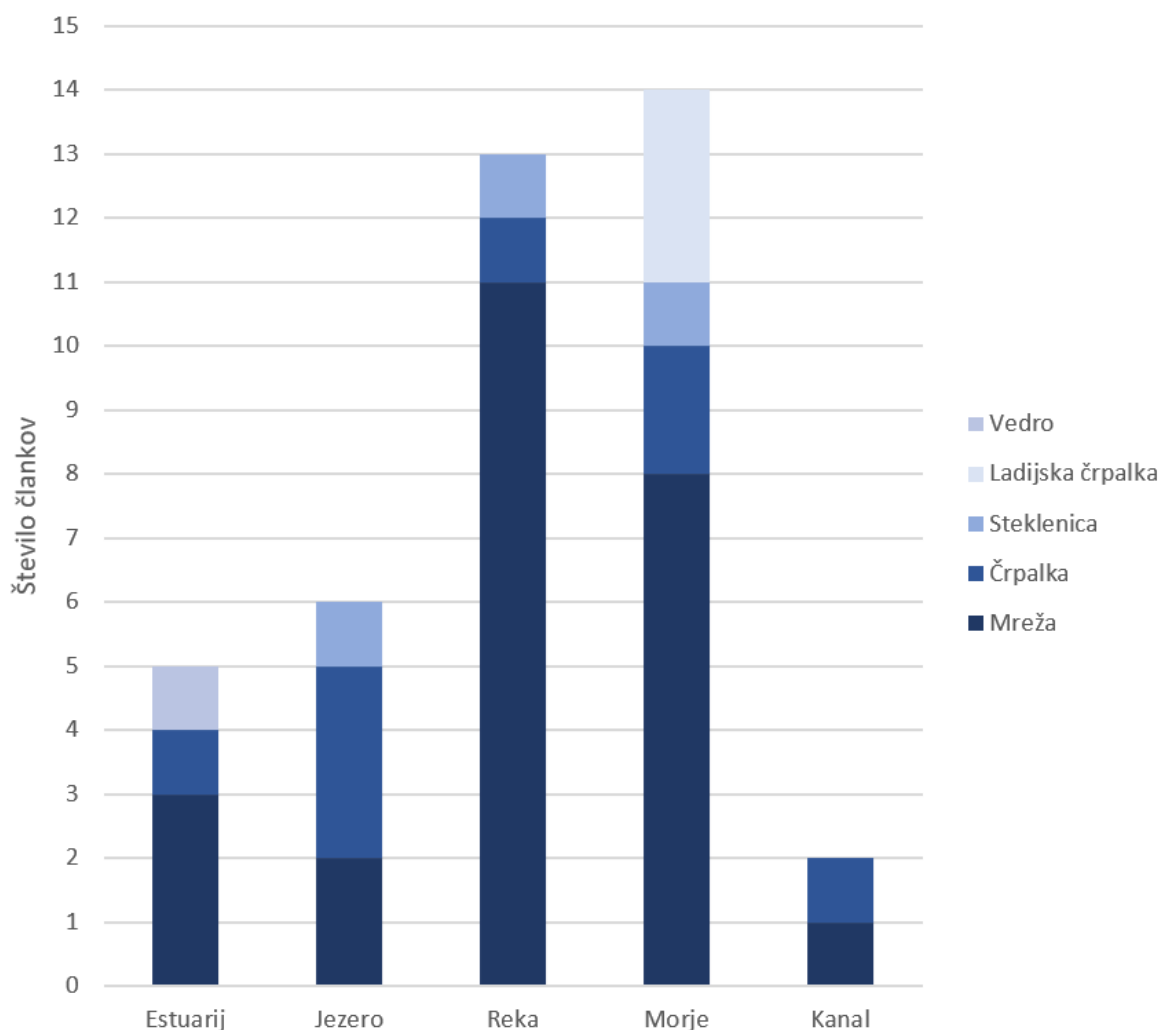
Pred začetkom izbire metode vzorčenja smo opravili pregled znanstvene literature o vzorčenju mikroplastike v različnih vodnih telesih. Članke smo iskali preko Google Scholarja z uporabo ključnih besed »*Microplastics, Sampling, Methodology, River, Water*«, brez omejitve na specifično metodo vzorčenja, da bi zajeli vse relevantne pristope in se izognili pristranskosti. Na podlagi teh člankov smo sestavili preglednico, v kateri smo navedli ključne informacije – lokacijo vzorčenja, klasifikacijo vodnega telesa, uporabljeno metodo vzorčenja in, kjer je bilo mogoče, dodatne podrobnosti, kot so tip mreže ali črpalke (Preglednica 1). Po pregledu izbrane znanstvene literature smo kasneje priredili metodo za vzorčenje, ki je bila modificirana metoda članka *Matjašič et al. 2023*, ki je najbolj ustrezala našim potrebam.

Poleg izdelave preglednice s primerjavo vseh metod vzorčenja smo podrobneje pregledali raziskave, kjer so uporabili metode črpanja. Namen pregleda je bil pridobiti dodatne informacije o sodobnih pristopih pri vzorčenju z uporabo črpalk in filtrirnih sistemov, kar je prispevalo k oblikovanju metode za naš prototip vzorčenja mikroplastike.

Preglednica 1: Pregled objavljenih metod vzorčenja vodnih teles med leti 2012 in 2024.

#	Leto	Vzorčeno vodno telo	Uporabljena metoda vzorčenja	Podkategorija metode	Klasifikacija vodnega telesa	Članek
1	2012	Mediterransko morje	Mreža	Manta	Morje	Collignon et al.
2	2014	Severnoobalni kanal, Čikago	Mreža	Neuston	Kanal	McCormick et al.
3	2014	Pacifiški Ocean	Ladijska črpalka	N/A	Morje	Desforges et al.
4	2014	Obala Portugalske, Portugalska	Mreža	Plankton	Morje	Frias et al.
5	2014	Obala Portugalske, Portugalska	Mreža	Neuston	Morje	Frias et al.
6	2014	Goiana Estuarij, Brazilija	Mreža	Plankton	Estuarij	Lima et al.
7	2014	Severni Atlantik	Ladijska črpalka	N/A	Morje	Lusher et al.
8	2014	Zaliv Chesapeake, estuarna reka, ZDA	Mreža	Manta	Estuarij	Yonkos et al.
9	2014	Estuarij Yangtze, Kitajska	Mreža	Neuston	Estuarij	Zhao et al.
10	2015	Ren, Nemčija	Mreža	Manta	Reka	Mani et al.,
11	2015	Obala Severne Španije, Španija	Mreža	Manta	Morje	Gago et al.
12	2015	Obala Severne Španije, Španija	Mreža	Neuston	Morje	Gago et al.
13	2015	Hamble, Itchen, Test, Anglija	Mreža	Plankton	Reka	Gallagher et al.,
14	2015	Estuarij jugovzhodne Kitajske	Črpalka	Teflonska	Estuarij	Zhao et al.
15	2016	Južni ocean	Mreža	Neuston	Morje	Isobe et al.
16	2016	Jezero Taihun, Kitajska	Steklenica	N/A	Jezero	Su et al.
17	2016	Zaliv San Francisco, Kalifornija	Mreža	Manta	Morje	Sutton et al.
18	2017	Baltsko morje, Rusija	Steklenica	N/A	Morje	Bagaev et al.
19	2017	Rossovo morje, Antarktika	Ladijska črpalka	N/A	Morje	Cincinelli et al.

20	2017	Urbane vode, Wuhan, Kitajska	Črpalka	Teflonska	Jezero	Wang et al.
21	2019	Jezero Tollensesee, Nemčija	Mreža	Manta	Jezero	Tamminga et al.
22	2019	Jezero Tollensesee, Nemčija	Črpalka	Potopna	Jezero	Tamminga et al.
23	2020	Ofanto, Italija	Mreža	Plankton	Reka	Campanale et al.
24	2020	Elba, Nemčija	Mreža	Plankton	Reka	Scherer et al,
25	2020	Jezero Kallavesi, Finska	Mreža	Manta	Jezero	Uurasjärvi et al.
26	2020	Jezero Kallavesi, Finska	Črpalka	Bencinska	Jezero	Uurasjärvi et al.
27	2020	Ren, Nemčija	Mreža	Manta	Reka	Mani & Burkhardt-Holm
28	2022	Donava, Ren, Nemčija	Mreža	Manta	Reka	Schrank et al.
29	2023	Taichung reka, Tajvan	Mreža	Manta	Reka	Kunz et al.
30	2023	Kamniška Bistrica, Ljubljana, Slovenija	Črpalka	Bencinska	Reka	Matjašič et al.
31	2023	Vzhodno Kitajsko morje	Mreža	Manta	Morje	Shi et al.
32	2023	Vzhodno Kitajsko morje	Črpalka	Planktonska	Morje	Shi et al.
33	2024	Raquette reka, New York	Mreža	Plankton	Reka	Haque et al.
34	2024	Osun, Nigerija	Steklenica	N/A	Reka	Idowu et al.
35	2024	Donava, Nemčija	Mreža	Ročna	Reka	Stanković et al.
36	2024	Vaal, Južna Afrika	Mreža	Plankton	Reka	Saad et al.
37	2024	Amsterdam, Nizozemska	Črpalka	Peristaltična	Kanal	Sefiloglu et al.
38	2024	Južni ocean	Črpalka	Pnevmatska	Morje	Leistenschneider et al.
39	2024	Buzau reka, Romunija	Mreža	Neuston	Reka	Pojar et al.
40	2024	Zandvlei Estuarij, Južna Afrika	Vedro	N/A	Estuarij	Samuels et al.
41	2024	Sena reka, Francija	Črpalka	N/A	Reka	Stratmann et al.



Slika 3: Stolpični diagram prikaza različnih metod vzorčenja mikroplastike glede na tip vodnega telesa.

Pregled literature jasno kaže, da so mreže najpogostejše uporabljena metoda vzorčenja na različnih tipih vodnih teles (Slika 3). V 63 % primerov se uporabljajo različne vrste mrež, kot so manta mreža, bongo mreža, planktonska mreža in neustonska mreža. Mreža manta in neustonske mreže so že uveljavljena oprema za vzorčenje fitoplanktona, kar poenostavi razvoj metod za zajem vodnih vzorcev, saj so naprave že na voljo, prilagoditi je potrebno le metodologijo vzorčenja.

Pri uporabi črpalk, ki predstavljajo nekaj več kot 20 % uporabljenih metod, se za razliko od mrež, ki se razlikujejo predvsem po obliki, uporabljajo različne vrste črpalk (peristaltična, zobniška, batna) ter različni filtracijski sistemi (mrežni filtri ali membranska filtracija). Črpalke omogočajo zajem manjših frakcij delcev (do 20 μm) brez zamašitev zaradi potisne sile, medtem ko neustonske in planktonske mreže običajno uporabljajo standardne velikosti por, 300 oziroma 333 μm . Zaradi te razlike črpalke omogočajo zajem mikroplastičnih delcev, ki jih metoda z mrežami ne bi zajela.

2.2.1 Pregled nekaterih metod že izvedenih raziskav

Med zbranimi raziskavami iz Preglednice 1 smo izbrali 14 študij, ki so najbolj natančno opisovale metode dela. Preučili smo metode vzorčenja, priprave vzorcev ter identifikacije vzorcev. Pridobljene informacije so nam bile v pomoč pri oblikovanju naše metode, od vzorčenja do identifikacije mikroplastike.

1. McCormick et al., 2014: »*Microplastic is an Abundant and Distinct Microbial Habitat in an Urban River*«

V študiji, izvedeni v Severnem obalnem kanalu v Čikagu, ZDA, so raziskovalci zbirali in kvantificirali mikroplastiko z uporabo dveh neustonskih mrež z očesi velikosti 333 μm . Mreži sta bili hkrati nameščeni za mirujočim čolnom, kar je omogočilo učinkovito zbiranje vzorcev. Hitrost vode je bila izmerjena na sredini vsake mreže med namestitvijo, čas zbiranja pa je trajal 20 minut.

Ves zbrani material se je iz mrež splaknil v litrske posode z nefiltrirano vodo iz mesta. Zbrani material je bil nato shranjen v hladilniku z ledom in pripeljan v laboratorij, kjer so ga hranili pri 4 °C do merjenja koncentracij mikroplastike. Poleg tega so bili zbrani dodatni vzorci iz mrež za zajem alg in cianobakterij. Material iz mrež se je splaknil na sterilnem belem pladnju, posamezni delci mikroplastike pa so bili pobrani s steriliziranimi kleščami in dani v sterilne posode za vzorce z vodo iz mesta. Organski material se je odstranil na enak način.

Vzorci vodnega stolpca so bili zbrani za meritve bakterij v vodnem stolpcu. Dva litra nefiltrirane vode sta bila zbrana na lokacijah v zgornjem in spodnjem toku, vzorci pa so bili do obdelave shranjeni pri 4 °C. Vzorci za štetje mikroplastike so bili obdelani v 4–5 dneh. Trikratni 20-mililitrski filtrirani vzorci vode so bili zbrani za merjenje raztopljenih hranil, za filtriranje pa so bili uporabljeni filtri iz steklenih mikrovlakn (GF/F). Vzorci filtrirane vode so bili zamrznjeni pri -20 °C do analiz raztopljenih snovi. Vzorci iz mrežnih zbirk so bili spuščeni skozi 2-milimetrska in 330-milimetrska zlagana sita. Preostale frakcije velikosti med 0,330 in 2 mm so bile shranjene v steklenih čašah in 48 ur sušene pri 75 °C. Organski material se je razgradil z mokro peroksidno oksidacijo z mešanico 0,05 M Fe (II) in 30-% vodikovim peroksidom pri približno 75 °C. Mokra peroksidna oksidacija ne vpliva na plastiko.

Ločevanje gostote na podlagi slanosti se je izvedlo z uporabo natrijevega klorida. Mikroplastika je plavala, medtem ko je bil težji anorganski material odveden iz vzorca. Mikroplastika se je nato filtrirala in štela pod secirnim mikroskopom. Zaradi velikega števila mikroplastike in delcev, ki se lepijo na filter, je bil za štetje uporabljen pristop s »podvzorci«. Za vsak vzorec je bilo prešteti 5 naključnih podvorcev filtra, pri čemer je vsak podvzorec predstavljal 3 % površine filtra.

Vrsta mikroplastike (amorfni delec, folija, mikrokroglica, pena ali vlakno) je bila zabeležena za vsak delec v vsakem vidnem polju. Ta metoda je omogočila natančno kvantifikacijo in karakterizacijo mikroplastike v Severnem obalnem kanalu, kar je pomembno za razumevanje njenega vpliva na okolje in mikrobne habitate v urbanih vodnih telesih.

2. Kunz et al., 2023: »*Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways*«

V študiji, izvedeni v mestu Taichung na Tajvanu, so raziskovalci preučevali prisotnost mikroplastike v rekah vzdolž urbanega-ruralnega gradienta. Vzorčenje je bilo izvedeno z mrežo z velikostjo mrežnega očesa 300 µm in trsko iz istega materiala. Okvir mreže je imel odprtino velikosti 30 × 15 cm, kar je omogočalo vzorčenje zgornjih 10 cm površinskega sloja vode.

Hitrost pretoka reke na vsakem mestu vzorčenja je bila izmerjena z enosmernim mehanskim merilnikom pretoka General Oceanics 2030RC. Meritve iz merilnika pretoka so bile pretvorjene v prostornino vode, ki je šla skozi mrežo. Mreža manta in merilnik pretoka sta bila na vsaki lokaciji postavljena v reko za pet minut, med vzorčenjem pa sta ostala nepremična.

Po izvleku mreže je bil odstranjen konec trske in vstavljen v plastično vrečko z zadrgo. Čisti in prazen konec vreče je bil pritrjen na mrežo manta za ponovno vzorčenje. Na vsaki lokaciji so bili odvzeti trije ponovljeni vzorci. Vsebina vreče se je nato sprala na situ, ki ima mrežo z odprtinami premera 5 mm, s čimer so bili odstranjeni delci, večji od frakcije mikroplastike. Za zadržanje delcev za nadaljnjo analizo so bila uporabljena sita z odprtinami premera 0,3 mm.

Vejice in listi, ki so bili zajeti v vzorcih, so bili skrbno sprani, da se je zbrala morebitna mikroplastika, ki je bila pritrjena nanje. Oprani vzorci so bili s sit preneseni v steklene čaše in posušeni pri 50 °C v sušilniku. Posušeni vzorec je bil dodan Fentonov reagent (20 ml H₂O₂ in 20 ml FeSO₄), da bi odstranili organske snovi. Reakcija se je aktivirala pri 50 °C na grelnih ploščah 10 minut, pri čemer se je dodajal dodatni H₂O₂, dokler ni bilo opaziti nobene reakcije.

Obdelane vzorce so oprali z vodo in posušili pri 50 °C v sušilniku. Encimska razgradnja je bila izvedena z uporabo industrijskega detergenta Tergazyme, ki vsebuje proteazni encim *Bacillus licheniformis* subtilizin Carlsberg. Raztopini 20 g Tergazyma v enem litru vode so dodali vzorce in jih pustili 12 ur v mešalniku pri sobni temperaturi.

Ta metoda je omogočila natančno zbiranje in analizo mikroplastike v rekah vzdolž urbanega-ruralnega gradienta v mestu Taichung. Rezultati študije so pokazali korelacijo med prisotnostjo mikroplastike in rabo zemljišč, kar je pomembno za razumevanje potencialnih virov in poti mikroplastike v urbanih in ruralnih okoljih.

3. Mani et al., 2015: »*Microplastics profile along the Rhine River*«

Poleti 2014 je bila izvedena obsežna študija vzorčenja mikroplastike v reki Ren v Nemčiji. Na enajstih različnih lokacijah je bilo zbranih skupno 31 vzorcev. Za vzorčenje je bila uporabljena mreža manta, ki ima pravokotno odprtino velikosti 60 cm x 18 cm in mrežna očesa v velikosti 300 µm. Mesta vzorčenja so bila izbrana na podlagi posebnih meril, ki so vključevala prisotnost komercialnih pristanišč, velikih mest z veliko prebivalci in industrijo ter enakomerno porazdelitev med prvim in zadnjim mestom vzorčenja.

Za natančno merjenje vzorčene površine in prostornine je bil na sredini odprtine mreže manta uporabljen merilnik pretoka (HYDRO-BIOS, model 438 110). Prostornina uporabljene mreže manta je bila 0,108 m³. Dinamika valovanja in nihanje hitrosti vlečne mreže sta bila v reki Ren zanemarljiva, kar je zagotovilo, da je bila celotna odprtina mreže med vsakim postopkom vzorčenja obrnjena proti dotoku vode.

Po vzorčenju so bili vzorci preneseni v stekleno čašo in izprani z lokalno vodovodno vodo. Nato so bili shranjeni v steklenih kozarcih z 10-odstotno raztopino NaCl za konzerviranje.

V laboratoriju so bili vzorci obdelani z uporabo vode Milli-Q, ki je bila speljana skozi vrsto kovinskih sit z velikostjo oces 5 mm, 1 mm in 300 µm. Koščke biološkega organskega materiala, večje od 5 mm, so splaknili in zavrgli. Vse frakcije so hranili pri 5 °C. Frakcije, večje

od 300 μm , so bile encimsko obdelane z uporabo 0,25-% natrijevega dodecil sulfata (SDS) v Milli-Q destilirani vodi, čemur je sledilo mešanje in inkubacija pri 70 °C čez noč.

Po ohlaiditvi so vzorce tri dni pri 37 °C obdelovali z lipazo, proteazo in amilazo. Za odstranitev biološkega materiala je bilo opravljeno ponovno spiranje z destilirano vodo ter oksidacija. Oksidacija z vodikovim peroksidom je potekala 24 ur pri 37 °C, da se biološki material še dodatno razgradi. Sledila je obdelava s hitinazo v fosfatnem pufru in celulazo ter izpiranje.

Izvedeno je bilo ločevanje gostote na podlagi slanosti z natrijevim kloridom (23-% NaCl/voda; gostota 1,16 g/cm³). Za prekinitev površinske napetosti je bil dodan detergent, težji material pa je bil po 4 urah pri sobni temperaturi odcejen. Na koncu je bilo izvedeno vizualno iskanje mikroplastike pod mikroskopom.

4. Tamminga et al., 2019: »On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis«

Jezero Tollensee, ki se nahaja na severovzhodu Mecklenburga-Predpomorjanske v Nemčiji, je bilo izbrano kot raziskovalno območje za študijo o mikroplastiki. Povodje jezera Tollensee pokriva 374 km² in je usmerjeno od jugozahoda proti severovzhodu. Večina pritokov se nahaja v južnem delu jezera, medtem ko ima severni del eno odtočno mesto. Prevladujoča smer vetra je od zahoda proti jugozahodu. Območje je večinoma namenjeno kmetijstvu in gozdarstvu, največje mesto v bližini pa je Neubrandenburg. Rekreatijske dejavnosti, kot so ribolov, jadrnanje, vožnja s kajakom in deskanje, so priljubljene v severnem delu jezera, poleti pa redno vozijo trajekti.

Za vzorčenje mikroplastike so bile uporabljene mreže manta, ki so bile postavljene prečno čez jezero. Površina in prostornina vlečne mreže sta bili izračunani na podlagi širine in višine odprtine za mrežo manta. Velike ostanke, ki so se ujeli v mrežo, so odstranili in zavrgli, preostali material za vzorčenje pa prenesli v rjave steklene kozarce. Za fiksacijo vzorcev je bila dodana klorovodikova kislina (HCl), vzorci pa so bili shranjeni v hladilniku za nadaljnjo obdelavo.

Sistem za vzorčenje s črpalko je bil sestavljen iz potopne črpalke, presejalne kaskade, kovinske šobe in cevi iz PVC. Dejanski pretok črpalke je bil določen na kraju s polnjenjem umerjene posode z vodo in merjenjem časa. Na vsaki postaji se je črpalka spustila v vodo, s siti pa so se zajeli odpadki. Zbrani material je bil prenesen v kozarce iz rjavega stekla, obdelan s klorovodikovo kislino za fiksacijo in shranjen v hladilni skrinji za nadaljnjo obdelavo.

Filtri so se posušili in obarvali z raztopino Nile red, prisotnost obarvanih delcev pa se je preverila s fluorescenčno mikroskopijo. Oblika in velikost delcev sta bili zabeleženi. Pri nekaterih delcih (9 %) je bila za potrditev opravljena μ Ramanska spektroskopija. S fotobeljenjem se je zmanjšalo motenje fluorescence. Spektri so bili primerjani s knjižnicami, ki so vsebovale spektre plastike in naravnih materialov.

Študija je pokazala, da lahko različne metode vzorčenja mikroplastike v vodi prinesejo različne rezultate. Vzorčenje z mrežo manta in sistemom za vzorčenje s črpalko ima svoje prednosti in slabosti, odvisno od specifičnih pogojev in ciljev raziskave. Ugotovitve študije bodo prispevale k boljšemu razumevanju učinkovitosti različnih metod vzorčenja in pomagale pri standardizaciji postopkov za prihodnje raziskave mikroplastike v sladkovodnih okoljih.

5. Campanale et al., 2020: »*Microplastics and their possible sources: The example of Ofanto river in southeast Italy*«

V študiji, izvedeni ob reki Ofanto v jugovzhodni Italiji, so raziskovalci zbrali vzorce mikroplastike na isti lokaciji, 6 km zahodno od ustja reke. Za zbiranje vzorcev so uporabili tri planktonske mreže, z velikostjo očesa 333 μm in odprtino 55 $\times$ 55 cm. Mreže so bile pritrjene na sredini reke s pomočjo vrvi, ki je bila napeta z enega brega reke na drugega.

Ob vsakem vzorčenju sta bila izbrana dva različna časovna intervala: od 11.00 do 13.00 in od 13.00 do 15.00. Med vsako kampanjo je bilo odvzetih šest ponovitev vzorcev, kar je skupaj nanese na 30 vzorcev. Vzorci so bili odvzeti iz zgornjih 45 cm vodne faze, pri čemer je bila mreža potopljena skozi celotno vzorčenje.

Količina filtrirane vode je bila izračunana na podlagi dimenzij mreže, trajanja vzorčenja in povprečne hitrosti vode v reki. Vzorci so bili usmerjeni v snemljive zbiralne cevi na dnu mreže. Te zbiralne cevi so bile nato ločene od mreže, vsak vzorec pa je bil prenesen v 1000-mililitrski steklen kozarec in shranjen v hladilniku za nadaljnje analize.

V laboratoriju so vzorce mokro presejali s 5 mm in 300 μm in sitom iz nerjavnega jekla. Material, večji od 5 mm, so zavrgli, material med 300 mm in 5 mm pa so 24 ur sušili pri 40 °C. Suha teža vsakega vzorca je bila zabeležena. Kemična razgradnja je bila opravljena z uporabo 30-odstotnega vodikovega peroksida z železovim (II) katalizatorjem, da so odstranili labilne organske snovi.

Mikroplastiko so ločili od težjega anorganskega materiala z uporabo nasičene raztopine NaCl (gostota 1,2 g/cm³). Usedle delce so odcedili, preostalo tekočino pa filtrirali skozi 1,2-milimetrski filter iz steklenih mikrovlagen. Vizualni pregled usedlih trdnih delcev so opravili pod mikroskopom za ekstrakcijo polimerov z večjo gostoto.

Vizualna in kemijska karakterizacija je bila izvedena z uporabo 40X digitalnega mikroskopa in pirolizne plinske kromatografije/masne spektrometrije (PyeGC/MS). Mikrodelci plastike so bili identificirani, preštet, fotografirani in kategorizirani na podlagi velikosti, barve in morfologije. Razlikovali so vrste mikroplastike, kot so drobc, vlakna, peleti, filmi in pene.

6. Scherer et al., 2020: »*Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river*«

V študiji, izvedeni ob reki Elbi v Nemčiji, so raziskovalci zbrali vzorce vode in sedimentov, da bi ocenili prisotnost in porazdelitev mikroplastike. Vzorci vode so bili odvzeti na vhodu v pristanišča ali na robu reke, kjer se nabirajo drobnozrnate usedline. Za zbiranje vzorcev vode je bilo uporabljenih deset planktonskih mrež Apstein, ki so bile pritrjene na raziskovalno plovilo. Planktonska mreža je bila nameščena neposredno pod vodno gladino, kar je omogočilo učinkovito zbiranje vzorcev.

Površina reke je bila vzorčena na razdalji približno enega km s hitrostjo 6–7 km/h. Količina filtrirane vode je bila izračunana z ročnim merilnikom pretoka in specifično formulo, kar je omogočilo natančno določitev količine vode, ki je bila obdelana. Vzorci so bili filtrirani v količinah od 3,2 do 32,7 m³ vode, odvisno od hitrosti toka, pri čemer je trajanje vzorčenja trajalo od 5 do 10 minut.

Po vzorčenju so bili vzorci vode preneseni iz planktonske mreže v steklene kozarce s splakovanjem z ultračisto vodo. Da bi preprečili kontaminacijo, so bile mreže po vsakem vzorčenju očiščene z ultračisto vodo. Vzorci sedimentacije so bili odvzeti na robu rečnega dna z vzorčevalnikom Van-Veen-grab. Sedimenti so bili shranjeni v zaprtih polipropilenskih vedrih, da bi jih zaščitili pred zunanjo kontaminacijo z delci.

Organske snovi v vzorcih so razgradili z dodajanjem mešanice 10 M raztopine kalijevega hidroksida in vodikovega peroksida v razmerju 1:1. Vzorce so mešali 3–4 dni, da so zagotovili popolno razgradnjo organskih snovi. Po tem postopku so vzorce nevtralizirali z mravljično kislino. Delci mikroplastike so bili izločeni iz preostale matrice z uporabo ločilnega lijaka, pri čemer je bil dodan kalijev format v prahu v razmerju 3,61 g na ml vzorca. Po 3–4 dneh se je zgornja plast vodne faze ločila. Tlačna filtracija je bila izvedena na anorganskih membranskih filtrih (GE Healthcare Life Sciences, Whatman, Anodisc kat. št. 514–518) s premerom 47 mm in velikostjo por 0,2 μm . Filtri so bili zaprti, posušeni na zraku pri 40 °C in shranjeni v aluminijastem kozarcu. Filtri so bili vizualno pregledani, delci, večji od 500 μm , in izbrani manjši delci pa so bili analizirani s spektroskopijo FTIR-ATR (Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflectance). Analiza ATR-FTIR je bila izvedena za vizualno identifikacijo delcev.

7. Uurasjärvi et al., 2020: »*Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake*«

V študiji, izvedeni na jezeru Kallavesi na Finskem, so raziskovalci preučevali koncentracije, velikostno porazdelitev in vrste polimerov mikroplastike v površinskih vodah. Vzorčenje je bilo izvedeno z uporabo manta mreže, ki je imela pravokotno odprtino 16 cm (višina) $\times$ 61 cm (širina) z velikostjo mrežnega očesa 333 μm . Mrežo manta so vlekli ob strani plovila približno 10 minut s hitrostjo 2,5 vozla. Vsebina mreže je bila splaknjena z vodo iz pipe v 5-litrska vedra s polipropilenskimi pokrovi. Vzorcena količina je bila izračunana na podlagi površine odprtine vlečne mreže in merilnika pretoka. Na vsaki lokaciji je bila uporabljena ena vlečna mreža.

Poleg vlečenja z mrežo manta so raziskovalci uporabili tudi črpalko za zbiranje manjših delcev. Črpalka na bencinski pogon je bila uporabljena za sesanje površinske vode skozi po meri izdelano kaskadi podobno filtrirno cev iz PVC. Cev je imela tri vijačne spoje, ki so držali navpično poravnane filtre z velikostjo por 300 μm , 100 μm in 20 μm . Voda je bila črpana skozi cev. Ko so se filtri z manjšimi porami zamašili, so jih zamenjali z večjimi. Povprečne vzorčene količine so bile 6,2 L s filtrom 20 μm , 83 L s filtrom 100 μm in 468 L s filtrom 300 μm . Vzorci so bili zbrani dvakrat, rezultati pa so predstavljeni kot povprečje obeh vzorcev. Filtri iz črpalne filtracije so bili takoj shranjeni v zaprtih petrijevkah.

Filtre z vzorci so vizualno pregledali s stereolupo (Zeiss Stemi 508) z razponom povečave 6,3–50 $\times$. Vse delce, ki so izgledali kot plastika, so ročno izbrali iz filtrov z mikropinceto. Ti delci so bili položeni na objektiv ter fotografirani preko stereolupe. Delci so bili upoštevanji kot plastični, če so izpolnjevali posebna merila, vključno z elastičnostjo, trajnostjo, enakomerno barvo, nenaravnim ali brezbarvnim/prozornim videzom in posebno obliko (debel vlaknat ali gladek fragment). Rezultati so zaradi jasnosti predstavljeni na podlagi velikosti por filtra.

Za vsak plastični delec je bil izmerjen spekter FTIR. Delci na oknih ZnSe so bili analizirani z mikroskopom FTIR (PerkinElmer Spectrum Spotlight). Meritve so potekale v transmissijskem načinu s posebnimi parametri; velikost odprtine: 25 $\times$ 25 μm ; spektralna ločljivost: 4 cm^{-1} ; število skeniranj: 16; spektralno območje: 4000–700 cm^{-1} . Spektri so bili analizirani s programsko opremo Thermo OMNIC 9. Izmerjeni spektri so bili primerjani s komercialno knjižnico polimerov (Hummel Polymer Sample Library, Thermo Fisher Scientific) in po meri izdelano knjižnico sintetičnih vlaken. Korelacijsko iskanje je bilo izvedeno v celotnem spektralnem območju, pri čemer je bila meja prepoznavanja nastavljena na 70 %. Izvedena je bila individualna interpretacija spektrov za zagotovitev prepoznavanja, zlasti pri vremensko spremenjenih ali umazanih mikroplastičnih delcih. V rezultate so bili vključeni samo delci, za katere je bilo potrjeno, da so plastični. Mikroskopske slike in spektri delcev FTIR so na voljo v dodatnih informacijah.

8. Schrank et al., 2022: »*Riverine microplastic contamination in southwest Germany: A large-scale survey*«

Za vzorčenje je bila uporabljena vlečna mreža manta s 300 µm očesi. Od leta 2014 do leta 2017 je bilo zbranih skupaj 53 vzorcev vodne površine iz 23 rek. Mreže manta so bile postavljene prečno čez reke, pri čemer je bila povprečna hitrost vlečenja mreže $5,3 \pm 0,3$ km/h. Površina in prostornina vlečne mreže sta bili izračunani na podlagi širine in višine odprtine za mante. Velike ostanke, ki so se ujeli v mrežo, so odstranili in zavrgli, preostali material za vzorčenje pa so prenesli v rjave steklene kozarce. Za fiksacijo vzorcev je bila dodana klorovodikova kislina (HCl), vzorci pa so bili shranjeni v hladilniku za nadaljnjo obdelavo.

Pred identifikacijo delcev se je izvedlo frakcioniranje velikosti z uporabo 500-µm sita iz nerjavečega jekla. Za delce, večje od 500 µm, je bila uporabljena spektroskopija FTIR-ATR. Uporabljen je bil spektrometer FTIR-ATR „Tensor 27“. IR spektri so bili zabeleženi v valovnem območju $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ z ločljivostjo 8 cm^{-1} .

Za delce, manjše od 500 µm, je bila uporabljena µFTIR analiza na osnovi FPA. Uporabljen je bil mikroskop FTIR „Hyperion 3000“ z detektorjem FPA s 64×64 slikovnimi pikami. IR spektri so bili posneti v območju valovnih števil $3600\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ z ločljivostjo 8 cm^{-1} . Spektri so bili primerjani s knjižnico polimerov za preverjanje vrst polimerov. Delci so bili razvrščeni v 13 kategorij polimerov in pet oblik. Izmerjena sta bila največja dolžina in širina za razvrstitev velikosti delcev.

Korekcija laboratorijske kontaminacije se je izvedla z odštevanjem rezultatov slepega vzorca in normalizacijo na prostornino vzorčene vode. Statistične analize so bile opravljene z uporabo programske opreme Jamovi za analizo podatkov.

Rezultati raziskave so pokazali, da je onesnaženost z mikroplastiko v rekah jugozahodne Nemčije raznolika in je odvisna od več dejavnikov, vključno z bližino urbanih območij, čistilnih naprav in pritokov. Ugotovitve študije bodo prispevale k boljšemu razumevanju razširjenosti in virov mikroplastike v sladkovodnih okoljih ter pomagale pri oblikovanju strategij za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko.

9. Shi et al., 2023: »*Comprehensive Comparison of Various Microplastic Sampling Methods in Sea Water: Implications for Data Compilation*«

V študiji, izvedeni v Zhoushanu v Vzhodnem kitajskem morju, so raziskovalci preučevali različne metode vzorčenja mikroplastike v morski vodi, da bi ocenili njihovo učinkovitost in zanesljivost. Vzorčenje je bilo izvedeno z uporabo več različnih tehnik, vključno z mrežo manta, črpalkami za plankton (SPP in DPP) ter potopnimi črpalkami. Mreža manta z velikostjo mrežnega očesa 330 µm je bila postavljena vzdolž vodne površine za 30 minut, medtem ko je čoln potoval s hitrostjo 2–3 vozlov. Količina vode, ki je prešla skozi mrežo, je bila določena z merilnikom pretoka. Po zbiranju so bili vzorci temeljito sprani z morskovo vodo, da bi odstranili morebitne kontaminante. Na ta način je bil zbran en vzorec.

Črpalke za plankton so bile uporabljane za vzorčenje v površinskem (1 m), srednjem (13 m) in spodnjem (23 m) sloju vode. Velikost mrežnega očesa je bila 150 µm. Vsaka vodna plast se je vzorčila 10 minut, pri čemer je plitva planktonska črpalka (SPP) filtrirala 5 m^3 vode, globoka planktonska črpalka (DPP) pa 3 m^3 vode. Filter črpalk se je po zbiranju spral z morskovo vodo, da bi odstranili morebitni delci kontaminacije. V vsakem vodnem sloju je bil zbran en vzorec z uporabo SPP in DPP.

Površinska voda (zgornjih 50 cm) se je črpala na krov in filtrirala na kraju samem z uporabo mrežnih oces velikosti 50 µm in 330 µm. Za vsako velikost mrežnega očesa so bili zbrani trije dvojniki. Vsi vzorci so bili zbrani v enem dnevu in pred laboratorijsko analizo shranjeni pri 5 °C .

Vzorci so bili sprva izprani skozi sito z velikostjo por 5 mm in 250 μm . Material, zbran na sitih z odprtinami premera 5 mm, je bil iz nerjavečega jekla prenesen v čisto petrijevko, medtem ko je bil material, ki se je zadržal na 250 μm situ, spran v čisto čašo. Preostali tekočini je bila počasi dodana raztopina, sestavljena iz 30 % H_2O_2 in ustrezne količine kislega železovega sulfata. Vzorec je bil pokrit z zgorelo folijo in postavljen v termostatsko vodno kopel pri 60 °C, dokler raztopina ni postala bistra. Po razgradnji so bili vzorci filtrirani na filter iz steklenih vlaken (GF/A Whatman) s premerom 47 mm in velikostjo por 1,6 μm z uporabo vakuumskega sistema. Na koncu je bil filter previdno prenesen v predhodno zažgano stekleno petrijevko in shranjen v eksikatorju za nadaljnjo analizo. Ta študija je pokazala, da različne metode vzorčenja mikroplastike v morski vodi lahko prinesejo različne rezultate, kar je pomembno za zbiranje in primerjavo podatkov. Ugotovitve študije bodo prispevale k boljšemu razumevanju učinkovitosti različnih metod vzorčenja in pomagale pri standardizaciji postopkov za prihodnje raziskave mikroplastike v morskem okolju.

10. Matjašič et al., 2023: »*Microplastic pollution in small rivers along rural-urban gradients: Variations across catchments and between water column and sediments*«

Raziskava, izvedena na rekah Ljubljanica in Kamniška Bistrica v Sloveniji, je preučevala onesnaženost z mikroplastiko v majhnih rekah vzdolž ruralno-urbanih gradientov. Cilj raziskave je bil oceniti variacije onesnaženosti med različnimi porečji ter med vodnim stolpcem in sedimenti.

Vzorci vode so bili zbrani z motorno črpalko in sesalno košaro z velikostjo por 1 × 1 cm. Na vsaki lokaciji je bilo trikrat prečrpano 1 m³ vode. Vzorci sedimentov so bili zbrani s cevjo, vstavljeno v rečno dno. Odstranjeni so bili veliki kamni, sedimenti (velikost zrn < 4 cm) pa so bili presejani in oprani. Na vsaki lokaciji so bili odvzeti trije vzorci (500 ml) z bregov in trije z mokrih kanalov.

Vzorci vode so filtrirali skozi sito z velikostjo por 150 μm . Zbrani material so oprali s 70-odstotnim etanolom in ga shranili v steklenih posodah. Vzorci sedimentov (300 g) so zmešali z nasičeno raztopino NaCl in jih pustili stati. Odstranili so supernatant in ga sprali skozi jekleno sito z odprtinami premera 0,063 mm. Postopek so ponovili trikrat. Ostanke so obdelali s FeSO_4 in H_2O_2 , da bi razgradili organske delce. Ostanke so nato ponovno sprali na jeklenem situ in jih filtrirali skozi stekleni filter.

Mikroplastični delci so bili iz vzorcev izolirani s stereolupo in razvrščeni v kategorije glede na obliko, velikost, barvo in vrsto polimera. Za določitev kemične sestave mikroplastike, razen vlaken v vodnem stolpcu, ki so bila vizualno prepoznana, je bila uporabljena infrardeča spektroskopija z oslajeno popolno odbojnostjo s FTIR-ATR.

Rezultati raziskave so pokazali, da je onesnaženost z mikroplastiko v majhnih rekah vzdolž ruralno-urbanih gradientov (območja z različnimi stopnjami urbanizacije od divjine do kanaliziranih vodotokov v mestih) raznolika in je odvisna od več dejavnikov, vključno z bližino urbanih območij, kmetijskih površin in industrijskih obratov. Ugotovitve študije bodo prispevale k boljšemu razumevanju razširjenosti in virov mikroplastike v sladkovodnih okoljih ter pomagale pri oblikovanju strategij za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko.

11. Haque et al., 2024: »*Distribution and risk assessment of microplastic pollution in a rural river system near a wastewater treatment plant, hydro-dam and river confluence*«

Raziskava, izvedena na reki Raquette v zvezni državi New York, je preučevala porazdelitev in oceno tveganja onesnaženosti z mikroplastiko v ruralnem rečnem sistemu, ki se nahaja v bližini čistilne naprave, hidroelektrarne in sotočja rek. Cilj raziskave je bil oceniti vpliv teh dejavnikov na onesnaženost z mikroplastiko in določiti tveganja za okolje in zdravje ljudi.

Za vzorčenje vode je bila uporabljena planktonska mreža, ki je bila pet minut potopljena en meter pod vodno gladino. S kovinskim vedrom so bili zbrani vzorci vode. Vzorci suspendiranega sedimenta so bili zbrani za ovirami v toku, vzorci obremenitve dna pa so bili odvzeti z zgornjih 5 cm rečnega dna. Vzorci vode so bili shranjeni v steklenicah, zaprtih s kovinskimi pokrovčki, vzorci sedimentov pa so bili pred nadaljnjo obdelavo shranjeni v steklenih vialah.

Vzorci so razgrajevali, ločevali po gostoti in filtrirali po tehniki NOAA s spremembami. Ta metoda vključuje uporabo nasičene raztopine NaCl za ločevanje mikroplastike od drugih delcev na podlagi njihove gostote. Po ločevanju so vzorce filtrirali skozi sito z velikostjo por 150 µm. Zbrani material so oprali s 70-odstotnim etanolom in ga shranili v steklenih posodah.

Mikroplastika je bila prešteta in analizirana s stereolupo. Delce so razvrstili glede na obliko, velikost, barvo in vrsto polimera. Nadaljnja analiza je bila opravljena s spektroskopijo FTIR za določitev kemične sestave mikroplastike. Spektroskopija FTIR omogoča identifikacijo polimerov na podlagi njihovih infrardečih spektrov, kar omogoča natančno določitev vrste plastike.

Rezultati raziskave so pokazali, da je onesnaženost z mikroplastiko v reki Raquette raznolika in je odvisna od bližine čistilne naprave, hidroelektrarne in sotočja rek. Najvišje koncentracije mikroplastike so bile zaznane v bližini čistilne naprave, kar kaže na pomemben vpliv odpadnih voda na onesnaženost reke. Tudi hidroelektrarna in sotočje rek sta prispevala k povečanju koncentracij mikroplastike, kar kaže na kompleksno dinamiko onesnaženosti v rečnem sistemu.

12. Idowu et al., 2024: »*Why Nigeria should ban single-use plastics: Excessive microplastic pollution of the water, sediments and fish species in Osun River, Nigeria*«

Raziskava, izvedena na reki Osun v Nigeriji, je preučevala prekomerno onesnaženost z mikroplastiko v vodi, sedimentih in ribjih vrstah. Cilj raziskave je bil oceniti vpliv mikroplastike na okolje in zdravje ljudi ter poudariti potrebo po prepovedi plastike za enkratno uporabo v Nigeriji.

Vzorci vode so bili zbrani v predhodno očiščene jantarne steklenice. Vzorci so bili do roba napolnjeni v steklenice proti toku reke, pokriti z aluminijasto folijo in zaprti. Vzorci sedimenta so bili pridobljeni z Van Veen grab vzorčevalnikom in združeni v en sam sestavljeni vzorec v steklenem kozarcu. Vzorci rib so bili pridobljeni od lokalnih ribičev, shranjeni z ledom v posodah iz nerjavečega jekla in prepeljani v laboratorij.

Prebavila rib so bila razrezana, razgrajena s kalijevim hidroksidom in vodikovim peroksidom ter filtrirana za analizo mikroplastike. Mikroplastika je bila identificirana in prešteta z digitalnim stereolupo. Oblike in barve mikroplastike so bile razvrščene v skladu s standardnimi smernicami. Na večjih kosih mikroplastike je bila opravljena analiza ATR-FTIR za določitev vrste polimerov.

Rezultati raziskave so pokazali, da je onesnaženost z mikroplastiko v reki Osun izjemno visoka. Vzorci vode, sedimentov in rib so razkrili prisotnost različnih vrst mikroplastike, vključno z vlakni, fragmenti in peleti. Najvišje koncentracije mikroplastike so bile zaznane v bližini urbanih območij in čistilnih naprav, kar kaže na pomemben vpliv človeških dejavnosti na onesnaženost reke.

Mikroplastika v vodi in sedimentih predstavlja resno grožnjo za vodna telesa, saj lahko vpliva na zdravje in preživetje vodnih organizmov. Poleg tega lahko mikroplastika v ribah vstopi v prehranjevalno verigo in ogrozi zdravje ljudi, ki uživajo ribe iz reke Osun. Ugotovitve študije poudarjajo nujnost ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko, vključno s prepovedjo plastike za enkratno uporabo.

Prepoved plastike za enkratno uporabo bi bila pomemben korak k zmanjšanju onesnaženosti z mikroplastiko v Nigeriji. Plastika za enkratno uporabo, kot so plastične vrečke, steklenice in embalaža, predstavlja velik delež odpadkov, ki končajo v rekah in oceanih. Te plastične odpadke se sčasoma razgradijo v mikroplastiko, ki onesnažuje vodne vire in ogroža zdravje ekosistemov in ljudi.

Poleg tega bi prepoved plastike za enkratno uporabo spodbudila razvoj in uporabo trajnostnih alternativ, kot so biorazgradljive embalaže in večkratno uporabne vrečke. To bi zmanjšalo količino plastičnih odpadkov in prispevalo k bolj čistemu in zdravemu okolju.

Onesnaženost z mikroplastiko v reki Osun predstavlja resno grožnjo za okolje in zdravje ljudi. Rezultati raziskave Idowu et al. (2024) poudarjajo nujnost ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko, vključno s prepovedjo plastike za enkratno uporabo. Prepoved plastike za enkratno uporabo bi bila pomemben korak k zaščiti vodnih virov, ekosistemov in zdravja ljudi v Nigeriji.

13. Stanković et al., 2024: »*Microplastics in the Danube River and Its Main Tributaries—Ingestion by Freshwater Macroinvertebrates*«

Cilj raziskave vplivov onesnaženosti mikroplastike na sladkovodne nevretenčarje na reki Donavi in njenih glavnih pritokih v Nemčiji je bil oceniti količino in vrsto mikroplastike, ki jo zaužijejo različne vrste večjih nevretenčarjev. S temi raziskavami so hoteli raziskovalci razumeti tudi vpliv mikroplastičnih delcev na vodna telesa.

Veliki nevretenčarji so bili vzorčeni s tehniko »kick and sweep« (K&S) z ročno mrežo ali bagrom v skladu z evropskimi standardi. Na vsakem mestu vzorčenja je bila draga potegnjena petkrat, vsak transekt pa se je štel za ločen vzorec. Ta metoda omogoča zajemanje različnih vrst velikih nevretenčarjev, ki živijo na dnu reke in v sedimentih. Vzorci so bili oprani s predhodno filtrirano deionizirano vodo in dani v steklene čaše za razgradnjo. Za razgradnjo tkiva so bili uporabljeni alkalni in encimski protokoli, ki jim je sledila filtracija skozi steklene filtre iz mikrovlagen. Ta postopek omogoča ločevanje mikroplastičnih delcev od biološkega materiala, kar olajša nadaljnjo analizo.

Delci so bili razvrščeni, prešteti, fotografirani in izmerjeni s stereolupo in programsko opremo ImageJ. Ta programska oprema omogoča natančno merjenje velikosti in oblike delcev, kar je ključnega pomena za razumevanje njihovega vpliva na organizme. Podvzorec delcev je bil analiziran s spektroskopijo μ FTIR-ATR za potrditev kemične sestave izoliranih mikroplastičnih delcev. Spektroskopija μ FTIR-ATR omogoča identifikacijo polimerov na podlagi njihovih infrardečih spektrov, kar omogoča natančno določitev vrste plastike.

Rezultati raziskave so pokazali, da je mikroplastika prisotna v vseh vzorcih večjih nevretenčarjev, zbranih iz reke Donave in njenih pritokov. Najpogostejši tipi mikroplastike so bili polietilen, polipropilen in polistiren, ki so pogosto prisotni v embalaži in drugih plastičnih izdelkih. Mikroplastični delci so bili najdeni v prebavilih vseh preučenih vrst večjih nevretenčarjev, kar kaže na široko razširjenost teh onesnaževal v vodnem okolju.

Zaužitje mikroplastike s strani večjih nevretenčarjev predstavlja resno grožnjo za vodna telesa, saj lahko vpliva na zdravje in preživetje teh organizmov. Poleg tega lahko mikroplastika vstopi v prehranjevalno verigo in ogrozi zdravje višjih trofičnih nivojev, vključno z ribami in drugimi vodnimi živalmi.

Ugotovitve študije Stanković et al. (2024) poudarjajo nujnost ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko v rekah in drugih vodnih telesih. Zmanjšanje uporabe plastike za enkratno uporabo in izboljšanje ravnanja z odpadki sta ključna koraka k zmanjšanju vnosa mikroplastike v okolje. Poleg tega je pomembno nadaljevati raziskave o vplivu mikroplastike na vodna telesa in razviti strategije za zaščito teh občutljivih habitatov.

Onesnaženost z mikroplastiko v reki Donavi in njenih pritokih predstavlja resno grožnjo za sladkovodne makroinvertebrate in celotno vodno telo. Rezultati raziskave poudarjajo potrebo po nujnih ukrepih za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko in zaščito vodnih virov. Prepoved plastike za enkratno uporabo in izboljšanje ravnanja z odpadki sta ključna koraka k bolj čistemu in zdravemu okolju.

14. Stratmann et al., 2024: »*Monitoring microplastics in the Seine River in the Greater Paris area*«

Raziskava, izvedena v zgornjem toku reke Sene v Franciji, je preučevala prisotnost in porazdelitev mikroplastike v širšem območju Pariza. Cilj raziskave je bil oceniti količino in vrsto mikroplastike v reki ter razumeti vpliv teh delcev na vodna telesa.

Mikroplastika je bila vzorčena in situ s kaskadno filtracijsko črpalko (UFO, Univerza Aalborg) z velikostjo mrežnega očesa 300 in 10 μm , da bi zajeli delce med 25 μm in 300 μm . Vzorci so bili zbrani 1–3 metre od rečne obale z vodo, prečrpano skozi vrsto filtrov. Količine vzorcev so se spreminjale glede na stanje vode, pri čemer je večja količina suspendiranih delcev povzročila hitrejšo zamašitev (74–940 l). Filtri so bili izprani, ultrazvočno očiščeni ter podvrženi mokri oksidaciji in gostotni separaciji. Mokra oksidacija vključuje uporabo kemikalij za razgradnjo organskih snovi, medtem ko gostotna separacija omogoča ločevanje mikroplastičnih delcev od drugih delcev na podlagi njihove gostote. Ta postopek omogoča pridobitev čistih vzorcev mikroplastike za nadaljnjo analizo. Ekstrahirane delce smo analizirali z infrardečo spektroskopijo z $\mu\text{-FTIR}$. Spektroskopija $\mu\text{-FTIR}$ omogoča identifikacijo polimerov na podlagi njihovih infrardečih spektrov, kar omogoča natančno določitev vrste plastike. Delce smo razvrstili glede na obliko, velikost in barvo ter jih prešteli s stereolupo.

Rezultati raziskave so pokazali, da je mikroplastika prisotna v vseh vzorcih, zbranih iz reke Sene. Najpogostejši tipi mikroplastike so bili polietilen, polipropilen in polistiren, ki so pogosto prisotni v embalaži in drugih plastičnih izdelkih. Mikroplastični delci so bili najdeni v različnih velikostih in oblikah, kar kaže na široko razširjenost teh onesnaževal v vodnem okolju. Prisotnost mikroplastike v reki Seni predstavlja resno grožnjo za vodna telesa, saj lahko vpliva na zdravje in preživetje vodnih organizmov. Poleg tega lahko mikroplastika vstopi v prehranjevalno verigo in ogrozi zdravje višjih trofičnih nivojev, vključno z ribami in drugimi vodnimi živalmi.

Ugotovitve študije (Stratmann et al., 2024) poudarjajo nujnost ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko v rekah in drugih vodnih telesih. Zmanjšanje uporabe plastike za enkratno uporabo in izboljšanje ravnanja z odpadki sta ključna koraka k zmanjšanju vnosa mikroplastike v okolje. Poleg tega je pomembno nadaljevati raziskave o vplivu mikroplastike na vodno telo in razviti strategije za zaščito teh občutljivih ekosistemov.

Onesnaženost z mikroplastiko v reki Seni predstavlja resno grožnjo za vodno telo in zdravje ljudi. Rezultati raziskave poudarjajo potrebo po nujnih ukrepih za zmanjšanje onesnaženosti z mikroplastiko in zaščito vodnih virov. Prepoved plastike za enkratno uporabo in izboljšanje ravnanja z odpadki sta ključna koraka k bolj čistemu in zdravemu okolju.

2.2.2 Načini črpanja in vrste uporabljenih črpalk

Pri raziskavah, kjer so za vzorčenje uporabili črpalko, smo pod drobnogled vzeli metodo vzorčenja, vrsto črpalke in način delovanja naprave. Proučevanje in razumevanje raziskav je prispevalo dragocene informacije za izdelavo prototipa ter pisanju metode za vzorčenje mikroplastike. Od vseh zbranih člankov v Preglednici 1 je bilo 9 raziskav, v katerih so bile uporabljene črpalke.

V dveh raziskavah na Kitajskem so uporabili teflonsko črpalko, kjer so v obeh primerih v zgornjem delu vodnega stolpca (0–20 cm globine) zajeli 20 litrov vode, ki so jo na mestu prefiltrirali skozi sito z odprtinami premera 333 μm (Zhao et al., 2015) in 50 μm (Wang et al., 2017). Teflonske črpalke so specializirane črpalke, katerih notranja konstrukcija je narejena iz PTFE (politetrafluoroetilen) oz. teflona, ki je kemično zelo inerten in naredi te črpalke optimalne za delo z korozivnimi, alkalnimi in kislimi tekočinami, visoka zaščita pred abrazijo pa zmanjša možnost kontaminacije prečrpane tekočine. V raziskavi na Finskem (Uurasjärvi et al., 2020) so raziskovalci uporabili tako metodo mreže manta kot metodo z črpalko, ki je bila v tem primeru bencinska batna črpalka s pritrjeno filtracijsko napravo. Ta filtracijska naprava je bila sestavljena iz treh segmentov, vsak od njih je vseboval filter z manjšimi porami, 300, 100 in 20 μm v navpični konfiguraciji. Mreža je bila izrezana iz planktonskih mrež. Povprečno so na 20 μm zajeli 6,2 L, na 100 μm 83 L ter na 300 μm 468 L. V Amsterdamu so raziskovalci za testiranje v različnih vodnih telesih testirali vzorčno napravo UFO (universal filtering object) (slika 4), ki uporablja črpalko PD (volumetrična črpalka, Oberdorfer zobniška črpalka N994RE). Naprava vodo filtrira skozi tri medsebojno povezane enote iz nerjavečega jekla. Prva je jeklena kletka z odprtinami velikosti 5000 μm , nato sledi sesalna cev, ki blokira velike delce, nato sfiltrira delce v velikosti do 300 μm v prvi enoti in dokončno do 10 μm v preostalih dveh enotah. Merilnik pretoka meri količino filtrirane vode, manometer pa spremlja delovanje filtra in kaže na zamašitev, če se tlak poveča (Sefiloglu et al., 2024).



Slika 4: UFO" filtrirna naprava za vzorčenje mikroplastike (vir: Rist et al., 2020)

V Sloveniji so raziskovalci na Kamniški Bistrici in Ljublanici z nemodificirano črpalko ter sesalno glavo s porami velikosti 1 cm vzorčili $3 \times 1 \text{ m}^3$ vode na lokacijo. Vodo so sproti filtrirali na situ z velikostjo 150 μm , material, pridobljen s filtracijo, so spirali s 70-% etanolom in shranili v steklenih posodah za nadaljnjo uporabo (Matjašič et al., 2023).

V raziskavi v Vzhodnokitajskem morju so raziskovalci poleg uporabe manta mreže za raziskovanje globljih predelov vodnega stolpca uporabili planktonsko črpalko, ki je

specializirana črpalka za vzorčenje fitoplanktona. V planktonski črpalki z integrirano filtrirno komoro so uporabljali filter z velikostjo por 150 µm. V zgornjem delu vodnega (prvih 20 centimetrov globine) stolpca so prefiltrirali 5 m³ vode, v globljem delu pa 3 m³ vode (Shi et al., 2023). Skupina raziskovalcev na Antarktičnem oceanu je vzorčila mikroplastiko v morju s pomočjo potopne črpalke, ki so jo potopili 30–80 cm globoko. V zadrževalni bazen na plovilu brez predhodne filtracije so sčrpali 1 m³ morske vode, kar je zaradi pretoka črpalke trajalo približno 2,5 minute. Nadaljnjo filtracijo s 500–10 µm so opravili po končanem črpanju (Leistenschneider et al., 2024).

2.3 Metoda viharjenja možganov (Brainstorming)

Viharjenje možganov, bolj znano pod tujko »*brainstorming*«, je metoda ustvarjanja idej za reševanje nalog, ki združuje sproščen, neformalni pristop razmišljanja. Namenjena je ustvarjanju čim večjega števila novih in inovativnih idej za reševanje določene naloge, zahteva odprtost do nenavadnih in nerealnih idej z namenom iskanja novih pristopov k reševanju obravnavane naloge. Je zelo pogosto uporabljena metoda zaradi preprostosti, kjer lahko iz nenavadne ideje na koncu skupina pride do logičnih ali preprostih rešitev. Na sliki 3 so prikazani koraki pri metodi viharjenja možganov (slika 5) (Furnham, 2000; Osborn, 1953).



Slika 5: Grafični prikaz poteka viharjenja možganov.

Osnovni koraki viharjenja možganov:

- Definiranje izziva: Najprej je potrebno jasno opredeliti izziv, ki ga želimo rešiti. Izziv mora biti specifičen in ne preveč obsežen, saj ga je v nasprotnem primeru potrebno razdeliti na manjše, obvladljive dele.
- Definiranje omejitev: Treba je definirati, kaj je realno izvedljivo in smiselno, ter druge omejitve, kot na primer omejitve glede uporabljenih materialov, razpoložljivih sredstev, znanja ...
- Sestava skupine: Skupina za viharjenje možganov običajno vključuje več udeležencev, ki so lahko iz različnih področij, kar spodbuja raznolikost idej. Pomembno je, da skupina vključuje tudi zapisovalca, ki beleži vse predlagane ideje.
- Zbiranje in zapisovanje idej: Udeleženci iščejo možne rešitve za izziv. Ideje se predlagajo brez kritiziranja ali ocenjevanja. Cilj je ustvariti čimveč idej, saj kvantiteta rodi kvaliteto. Nenavadne in radikalne ideje so še posebej dobrodošle, saj lahko vodijo do inovativnih rešitev. Eden ali več udeležencev sproti beleži vse predlagane ideje in jih na glas ponovi, da se zagotovi pravilno razumevanje. Ideje se lahko zapisujejo na tablo, list papirja ali v digitalno orodje.

- Izpeljevanje novih idej: Po končanem zbiranju idej se skupina osredotoči na kombiniranje in izboljševanje predlaganih idej. To lahko vodi do boljših in bolj dodelanih rešitev.
- Pregled idej in izbira najboljših: V zadnji fazi se zbrane ideje kritično ovrednotijo glede na njihovo izvedljivost, učinkovitost in inovativnost. Skupina izbere najboljše ideje, ki jih nato lahko nadalje razvija in implementira.

Prednosti viharjenja možganov:

- Spodbuja kreativnost: Metoda omogoča sproščeno okolje, kjer so udeleženci spodbujeni k ustvarjanju nenavadnih in inovativnih idej.
- Povečuje sodelovanje: Skupinsko delo krepi timski duh in omogoča izmenjavo različnih pogledov.
- Generira veliko število idej: Zaradi osredotočenosti na kvantiteto se poveča verjetnost za iskanje učinkovitih rešitev.

Slabost viharjenja možganov:

- Možnost prevladovanja posameznikov: Včasih lahko nekateri udeleženci prevladujejo, kar lahko zavira prispevek drugih.
- Omejevanje razmišljanja in ozkoglednost: Ideja, ki jo predlaga druga oseba nas lahko usmeri v eno smer razmišljanja, kar omeji našo kreativno mišljenje, z nadgrajevanjem prejšnjega predloga.

2.4 Metode za vrednotenje rešitev

Obstaja veliko metod za vrednotenje rešitev. Med njimi sta uveljavljeni metodi Pughova odločitvena matrika (angl. Pugh Decision Matrix) in težkana odločitvena matrika (angl. Weighted Decision Matrix). Namen obeh metod je zagotoviti strukturirano primerjavo različnih rešitev na podlagi določenih meril in s tem olajšati odločanje v razvojnih projektih.

Splošni pomen in namen ocenjevalnih metod:

Glavni namen metod za ocenjevanje rešitev je lažja in bolj objektivna primerjava različnih možnosti. Razvoj inženirskih naprav ali proizvodnih procesov lahko hitro postane kompleksen, saj vključuje veliko različnih dejavnikov: tehnične zahteve, stroške, čas razvoja, izvedljivost, tveganja, uporabnost itd. Zaradi tega je koristno, da z ustreznimi metodami hitro preverimo in zožimo nabor rešitev na tiste, ki obetajo največ. Sistematične metode za vrednotenje rešitev:

Zagotavljajo preglednost: Jasno se pokaže, kako dobro se vsaka rešitev ujema z izbranimi kriteriji.

Spodbujajo objektivnost: S transparentnim in kvantitativnim sistemom ocenjevanja se zmanjšuje vpliv osebnih preferenc na končno odločitev.

Omogočajo ponovljivost: Če so izhodiščni podatki in merila enaki, se ob isti metodi ocenjevanja praviloma pride do istega rezultata, kar je ključno za tehnično in znanstveno utemeljitev izbrane rešitve.

Pughova matrika odločanja, znana tudi kot Pughova matrika ali metoda primerjalne matrike, je ena preprostejših in pogostejše uporabljenih metod pri ocenjevanju inženirskih rešitev, pri kateri se posamični kriteriji težkajo na podlagi pomembnosti, ki vplivajo na vpliv določenega kriterija na končni rezultat (slika 6). Ime je dobila po Stuartu Pughu, ki jo je razvil kot del integriranega inženiringa (Pugh, 1991).

Preglednica 3.3.4 Primer vrednotenja zobniškega reduktorja po točkah

j-ti kriterij za vrednotenje	Faktor težkanja g_j	Varianta A		Varianta B		Varianta C	
		w_{jA}	$g_j \cdot w_{jA}$	w_{jB}	$g_j \cdot w_{jB}$	w_{jC}	$g_j \cdot w_{jC}$
dimenzije reduktorja	1	8	8	9	9	7	7
hrupnost, vibracije	3	7	21	7	21	9	27
življenjska doba	2	8	16	8	16	8	16
izkoristek	1	9	9	8	8	9	9
mazanje-vzdrževanje	1	9	9	8	8	8	8
cena	1	9	9	8	8	8	8
vrednost variante i G_i		50		48		49	
Pond. vrednost variante i G_{gj}			72		70		75
Spec. vrednost variante i W_i		0,833		0,8		0,82	
Pond. spec vrednost variante i W_{gj}			0,8		0,778		0,833

Slika 6: Primer vrednotenja različnih rešitev po točkah z dodanim faktorjem težkanja (vir: Hlebanja, 2003)

Poleg Pughove metode obstajajo še mnoge druge metode za vrednotenje konceptnih rešitev s faktorji težkanja ali brez, glede na potrebe pri izdelavi. V nekaterih primerih se lahko težkanje tudi opusti, kadar so kriteriji bolj ali manj enako pomembni (slika 7).

TEHNIČNI KRITERIJI		OCENA KONCEPTOV		TEHNIČNI KRITERIJI		OCENA KONCEPTOV	
ZNAČILNI KRITERIJI	MAX	KONCEPT 1: JERMENSKI POGON	KONCEPT 2: HIDROSTATI- ČNI POGON	STANDARDNI TEHNIČNI KRITERIJI	MAX	KONCEPT 1: JERMENSKI POGON	KONCEPT 2: HIDROSTATI- ČNI POGON
VELIKOST POGONA	5	5	3	KVALITETA IZDELAVE	5	5	3
MAJHNA MASA	5	5	2	ENOSTAVNA MONTAŽA IN DEMONTAŽA	5	5	3
TOGA IZVEDBA	5	4	2	ZANESLJIVOST OBRATOVANJA	5	4	4
ODPORNOST PROTI OBRABI	5	4	4	ENOSTAVNO VZDRŽEVANJE	5	5	3
KOMPAKтна IZVEDBA	5	4	5	DOSTOPNA LOKACIJA VGRADNJE	5	4	4
NIZKA RAVEN HRUPA	5	4	4				
DOBER IZKORISTEK	5	5	3	SKUPNO ŠTEVILO TOČK	70	62	47
MAJHNI TEMPERATURNI VPLIVI	5	3	4	TEHNIČNA VREDNOST VARIANTE REŠITVE V_i	1	0,88	0,67
ENOSTAVNA IZDELAVA	5	5	3	RANG VARIANTE REŠITVE		1	2

Slika 7: Primer matrike vrednotenja koncepta rešitve (vir: Križnik, 2015)

Osnovni koraki metode za vrednotenje rešitev:

Opredelitev kriterijev: Prvi korak je določitev kriterijev, po katerih bomo vrednotili rešitve. Kriteriji morajo biti jasni, merljivi in relevantni za nalogo, ki ga rešujemo. Primeri kriterijev vključujejo stroške, čas izvedbe, učinkovitost, trajnost in tveganja.

Težkanje kriterijev: Vsakemu kriteriju se dodeli pomembnost oz. utež glede na njegovo pomembnost. Uteži se običajno določijo s pomočjo strokovnjakov. Težkanje omogoča, da se bolj pomembni kriteriji ustrezno upoštevajo pri končni oceni.

Zbiranje podatkov: Za vsako rešitev je potrebno zbrati podatke, ki omogočajo oceno glede na izbrane kriterije. Podatki lahko vključujejo kvantitativne meritve, kot so stroški in čas, ter kvalitativne ocene, kot so mnenja strokovnjakov.

Ocena rešitev: Rešitve se ocenijo glede na vsak kriterij. Ocene so lahko izražene v različnih oblikah, kot so točkovanje, razvrščanje ali uporaba večkriterijskih metod.

Izračun skupne ocene: Na podlagi ocen in težkanje kriterijev se izračuna skupna ocena za vsako rešitev.

Izbira najboljše rešitve: Na podlagi skupnih ocen in analize občutljivosti se izbere najboljša rešitev. Ta rešitev mora biti tista, ki najbolje izpolnjuje vse določene kriterije in ima najvišjo skupno oceno.

Prednosti metode za vrednotenje rešitev so številne. Ena izmed glavnih prednosti je objektivnost, saj metoda omogoča objektivno primerjavo različnih rešitev na podlagi jasnih in merljivih kriterijev. To pomeni, da se lahko rešitve ocenijo na podlagi dejanskih podatkov in meril, kar zmanjšuje možnost subjektivnih vplivov in napak. Poleg tega je postopek strukturiran in sistematičen, kar dodatno prispeva k zmanjšanju napak in subjektivnih vplivov. Sistematičnost metode zagotavlja, da se vse rešitve ocenijo na enak način, kar omogoča pošteno in dosledno primerjavo (Hlebanja, 2003; Pahl et al., 2007).

Druga pomembna prednost metode za vrednotenje rešitev je prilagodljivost. Metoda je prilagodljiva in se lahko uporablja za različne vrste izzivov in odločitev. Ne glede na to, ali gre za tehnične, finančne, organizacijske ali druge vrste izzivov, se lahko metoda prilagodi specifičnim potrebam in zahtevam. To omogoča široko uporabo metode v različnih kontekstih in situacijah, kar povečuje njeno uporabnost in učinkovitost.

Kljub številnim prednostim ima metoda za vrednotenje rešitev tudi nekatere slabosti. Ena izmed glavnih slabosti je kompleksnost. Metoda je lahko kompleksna in zahteva veliko časa ter virov za zbiranje podatkov in ocenjevanje rešitev. To pomeni, da je lahko postopek dolgotrajen in zahteven, kar lahko predstavlja oviro pri njeni uporabi, zlasti v primerih, ko so na voljo omejeni viri in čas.

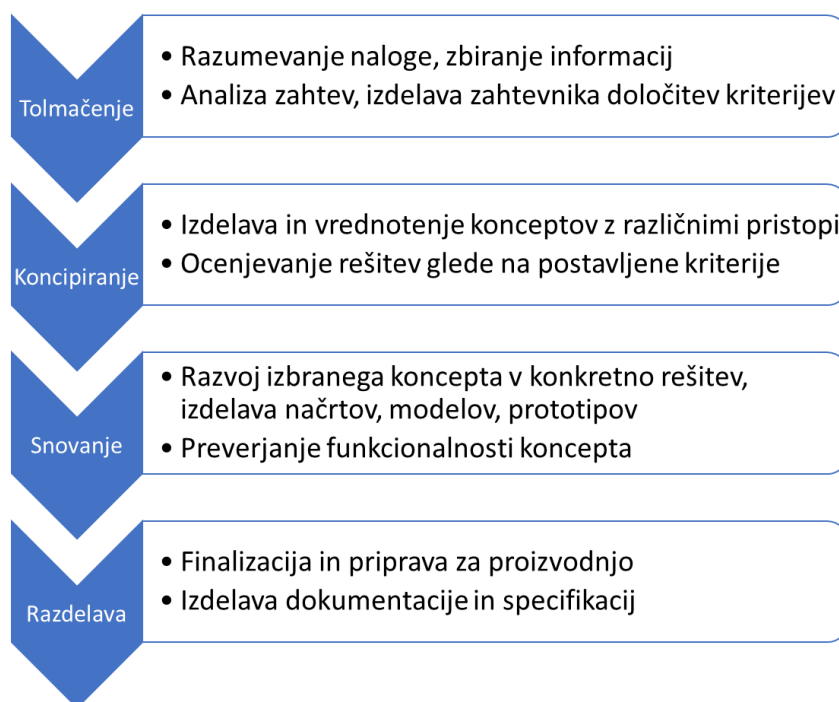
Poleg tega je določanje težkanja kriterijev lahko subjektivno in odvisno od mnenj strokovnjakov. Čeprav se pri določanju le-tega običajno uporabljajo strokovna mnenja in metode, še vedno obstaja možnost subjektivnosti. To lahko vpliva na končne rezultate ocenjevanja in vodi do različnih interpretacij in odločitev. Kljub tem slabostim pa metoda za vrednotenje rešitev ostaja ključna za sprejemanje informiranih in učinkovitih odločitev, še posebej pri kompleksnih izzivih, kjer je potrebno upoštevati več kriterijev (Pahl et al., 2007).

2.5 Razvoj izdelkov po priporočilih VDI 2221

Razvoj izdelkov za določene naloge je dolgotrajen proces od začetne ideje do končne proizvodnje. Ta proces vključuje več stopenj, vključno z ustvarjanjem idej, razvojem konceptov, načrtovanjem, izdelavo prototipov, testiranjem in lansiranjem na izdelkov trg. Vsaka stopnja zahteva natančno načrtovanje, koordinacijo in izvedbo, da izdelek zadosti potrebam trga in doseže komercialni uspeh. VDI 2221 so smernice, ki jo jih razvili Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (združenje nemških inženirjev). Te smernice zagotavljajo strukturiran in sistematičen pristop k razvoju tehničnih izdelkov. Namenjene so oblikovalcem in inženirjem z namenom izboljšanja učinkovitosti in kakovosti ter zmanjšanja tveganja med razvojem izdelkov. Smernica temelji na razdelitvi procesa konstruiranja v več jasno definiranih faz, VDI 2221 se pogosto uporablja zaradi svoje prilagodljivosti in uporabe na različnih področjih, od strojegradnje do programske opreme (VDI 2221, 1987). Priporočila VDI 2221 vključuje več faz, ki se začnejo z opredelitvijo izziva in prepoznavanjem potreb uporabnikov. Sledi ustvarjanje idej, razvoj konceptov in priprava podrobnih načrtov. Razvijanje prototipa in testiranje sta ključna koraka za potrditev zasnove in zagotavljanje, da izdelek izpolnjuje standarde zmogljivosti in varnosti. Na koncu se izdelek lansira na trg, povratne informacije pa se zbirajo za stalno izboljševanje (Pahl et al., 2007).

Glavne faze v procesu VDI 2221 so sledeče:

1. **Tolmačenje naloge:** Razumevanje in definiranje naloge, ki ga je treba rešiti. Zbiranje informacij, analiza zahtev in omejitev, določitev ciljev in kriterijev uspešnosti.
2. **Koncipiranje:** Generiranje in vrednotenje konceptov, ki bi lahko rešili izziv. Uporaba kreativnih tehnik za ustvarjanje različnih rešitev, ocenjevanje teh rešitev glede na določene kriterije in izbira najboljših konceptov.
3. **Snovanje:** Razvoj izbranih konceptov v podrobnejše rešitve. Izdelava podrobnih načrtov, modelov in prototipov, preverjanje funkcionalnosti in izvedljivosti.
4. **Razdelava:** Finalizacija in priprava za proizvodnjo. Izdelava končnih tehničnih risb, specifikacij in dokumentacije. (slika 8)



Slika 8: Grafični prikaz postopka VDI 2221

S pomočjo te preizkušene metode konstruiranja izdelkov smo se racionalno lotili izziva konstruiranja prototipa za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih in nato tudi izdelali prototip.

3. MATERIALI IN METODE

3.1 Razvoj in izdelava prototipa

3.1.1 Tolmačenje naloge

Tolmačenje naloge je prva faza konstrukcije izdelka, ki se prične, ko se konstruktorji prvič srečajo z neko nalogo oziroma izzivom. Z preučevanjem zadane naloge in razpoložljivih sredstev lahko postavimo tehnične zahteve izdelka. Na podlagi ugotovljenih zahtev se izdelava konstrukcijski zahtevnik v obliki seznama.

Ob pregledu naše zadane naloge smo pripravili konstrukcijski zahtevnik, ki je prikazan v preglednici 2.

Preglednica 2: Konstrukcijski zahtevnik naprave za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih

Zahteva	Opis	Zahteva/želja /min./max.	Opomba
Potrebno št. operaterjev	1 oseba	Zahteva	Za upravljanje naprave brez držanja sesalne glave mora zadostovati ena oseba
Način uporabe	Enostaven za uporabo	Zahteva	
Način vzorčenja	Mehanska filtracija	Zahteva	
Lokacija uporabe	Zunanja uporaba, terensko delo, neraven in umazan prostor	Zahteva	
Odpornost na vremenske vplive	Vodoodporno za rahel dež, vlago	Zahteva	Kot terenska oprema za delo ob vodi potrebuje neko mero vodoodpornosti
Vir energije	Neodvisno delovanje brez energije iz omrežja	Zahteva	Mogoče obratovanje neodvisno od električnega omrežja
Prenosljivost	Skupna teža 20 kg	Max.	Naprava mora biti prenosna na kratke razdalje
Hitrost črpanja (pretok)	pretok = 4 m ³ /h	Min.	Čas vzorčenja mora biti sprejemljiv (zajem enega vzorca naj traja 15 minut).
Tlak potisnega dela	P > 2 Bar	Min.	Zagotovi dovolj tlaka za nemoteno filtriranje
Tlak sesalnega dela	P > 0,5 Bar	Min.	Omogoči vzorčenje nižje od položaja črpalke
Nekompleksna sestava	Možnost manjših terenskih popravil	Zahteva	
Dodatna mobilnost	Kolesa/odstranljiva platforma s kolesi	Želja	Za lažji transport do mesta vzorčenja

Natančnost meritev pretoka	(+/- 3 %)	Zahteva	
Sistem menjave filtrov	Zamenljivi filtri	Zahteva	Omogočiti vzorčenje več lokacij s hitro menjavo filtrov na lokaciji v nekaj minutah
Nastavljiva globina vzorčenja	Sistem za nastavljanje globine vzorčenja	Želja	
Dimenzije	0,7 m × 0,5 m × 0,6 m	Max.	Naprava mora biti prevozna v prtljažniku osebnega avtomobila
Čas razvoja	3 mesece	Želja	
Stroški delovanja aparata	Minimalni	Zahteva	
Zahtevnost vzdrževanja	Enostavno čiščenje	Zahteva	Zmožnost hitrega čiščenja med in po vzorčenjih
Strošek izdelave	2000 EUR	Zahteva	
Število aparatov	1	Zahteva	

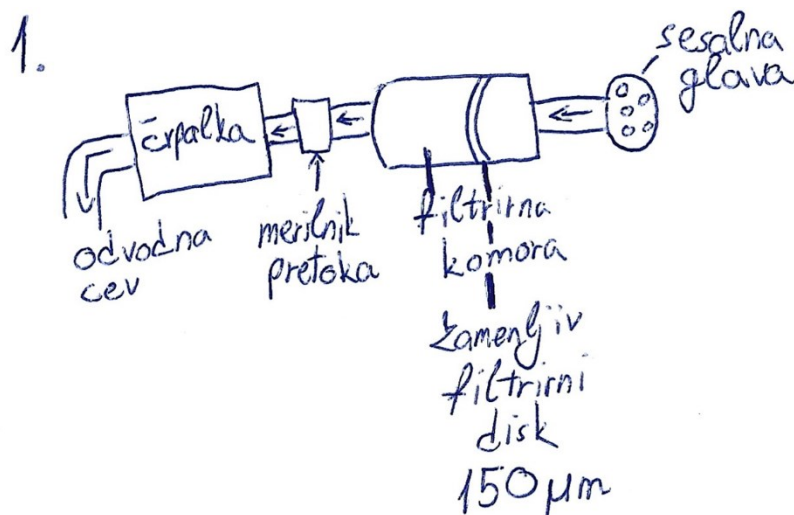
Zahteve, navedene v tabeli 2, smo prepoznali kot najpomembnejše za načrtovanje naprave za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih. Ti kriteriji so služili tudi kot osnova za oblikovanje odločitvene matrike, ki je omogočila strukturirano in pregledno ocenjevanje različnih rešitev ter njihovo primerjavo. S tem smo zagotovili, da so bile vse ključne zahteve enakovredno obravnavane v procesu odločanja.

3.1.2 Koncipiranje

Z uporabo metode viharjenja možganov smo z ekipo štirih oseb v sklopu sestanka zbirali potencialne konceptne rešitve za napravo za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih. Prva zamisel je bila uporaba zamenljivega diska in vodoravnega filtra, ki bi bil tehnično dokaj zahteven. V nadaljevanju poglavja so prikazane zbrane konceptne rešitve.

Koncept z izmenljivimi filtrirnimi diski

Prvi koncept naprave za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih (slika 9) vsebuje po meri narejeno filtrirno komoro, ki bi vsebovala režo za izmenjevanje filtrskih diskov, kar bi po teoriji omogočilo hitro menjevanje diskov, ki bi imeli nastavljeno določeno velikost por. Na koncu komore bi bil pritrjen merilnik pretoka, skozi katerega bi voda prišla v črpalko ter nazaj v vodno telo.

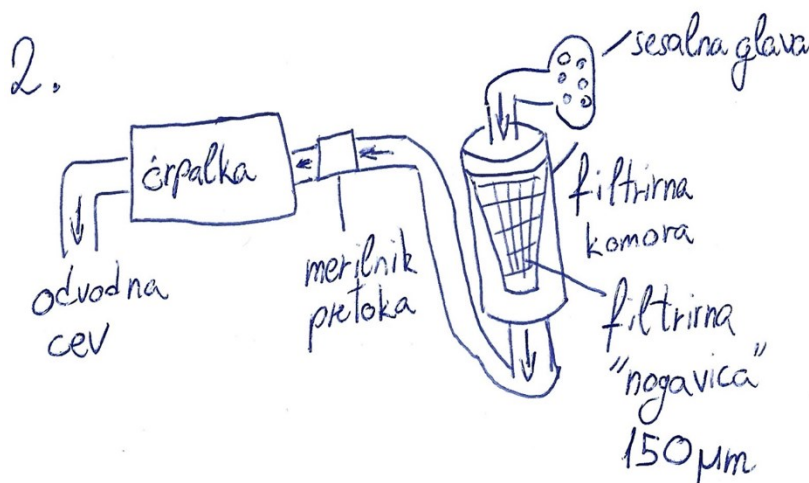


Slika 9: Skica koncepta z izmenljivimi filtrirnimi diski.

Ta koncept je bila prvotna ideja za izgled in delovanje prototipa, brez obstoječih delov bi bilo potrebno izdelati dodatne (po meri narejene) komponente.

Koncept z izmenljivo filtrirno vrečo

Drugi koncept (slika 10) je nadgradnja prvega koncepta, s spremembo v načinu filtriranja. Zaradi boljšega obratovanja in pomoči gravitacije smo se odločili za vertikalni pretok vode skozi komoro, ki naj bi v teoriji tudi preprečil uhajanje vzorca nazaj v vodo skozi sesalno cev po izklopu naprave. Kot filter pa smo se v tem konceptu odločili, da bi uporabili filtrirne vreče za bazene, ki imajo velikost por 150 μm .

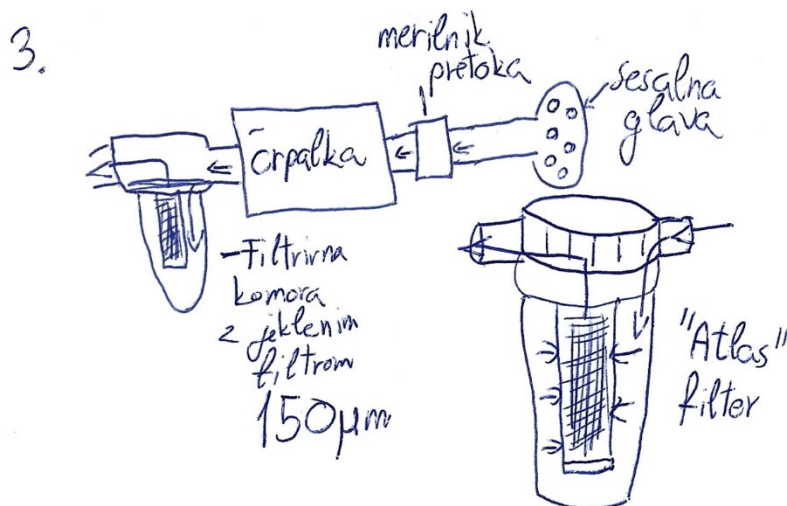


Slika 10: Skica koncepta z izmenljivo filtrirno vrečo.

Največja identificirana prednost nove ideje filtrirne komore je večja preprostost. Zasnovati bi bilo potrebno le filtrirno komoro. Ideja pri navpični postavitvi filtra je bila boljša učinkovitost filtrirne vrečke, saj bi z zmanjšanjem stika s stenami povečali filtrirno površino, hkrati pa bi zagotovili, da bi vsebnost filtrov ostala v vrečki brez izgube ob odstranjevanju le-tega iz ohišja.

Koncept z izmenljivim jeklenim filtrom

Tretji koncept (slika 11), ki temelji na filterih Atlas, namenjenih filtraciji pitne vode za osebne in industrijske namene. Zaradi dobro zasnovanih specifikacij, ki jih zahteva naprava smo morali v konceptu filtrirno komoro pomakniti na tlačni del, kjer je pritisk večji. Ojačani filtri in komora za filtracijo so testirani na osmih barih, kar več kot zadostuje našim zahtevam in dovoljuje nadgradnjo, če bi to bilo potrebno.



Slika 11: Skica koncepta z izmenljivim jeklenim filtrom.

3.1.3 Vrednotenje konceptnih rešitev in izbor najboljšega koncepta

Na podlagi treh predstavljenih konceptov smo oblikovali matriko odločanja, ki omogoča primerjavo ključnih značilnosti in prednosti vsakega koncepta (*Preglednica 3*). Pri določevanju uteži smo se odločili, da so za nas najpomembnejše enostavnost uporabe, cena in enostavnost izdelave/konstrukcije. Kot srednje pomembni kriteriji so pričakovani pretok ter stroški popravil. Zaradi merilnika pretoka se lahko nadzoruje pretok in s tem računa pretečena količina, zato časovna komponenta ni ključnega pomena, a še vedno pomeni zajem trenutnega stanja. Hitrost menjave filtrov smo označili kot najmanj težkan kriterij, saj menjave filtrov izvedemo pred oziroma po vzorčenju in nismo odvisni od časa vzorčenja, predvideni so tudi kot hitra opravila in zato niso ključni, vendar izboljšajo uporabniško izkušnjo.

Preglednica 3: Matrika vrednotenja konceptnih idej z težkanjem kriterijev.

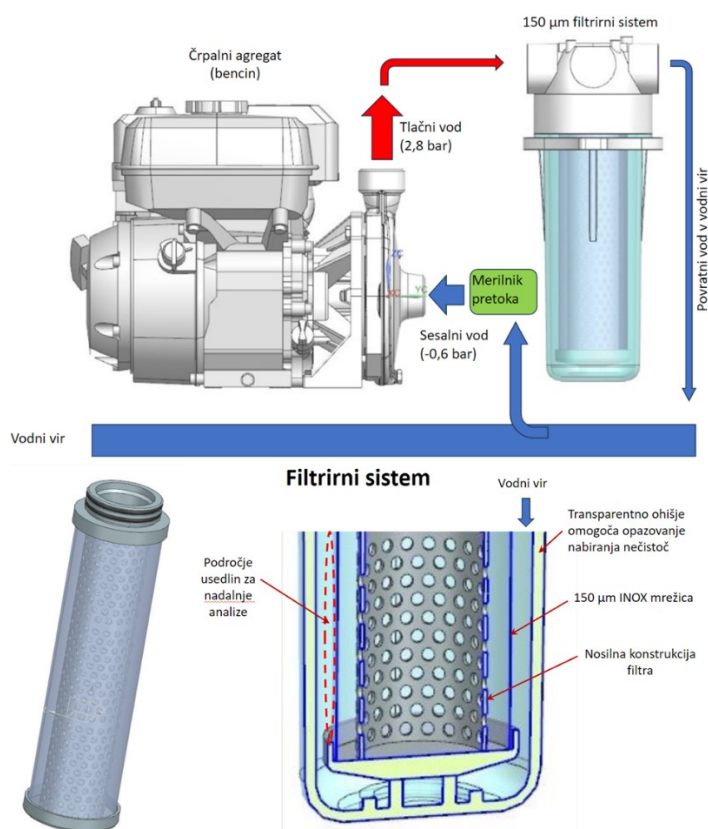
Kriterij	Utež	Koncept 1: Izmenljivi filtrirni disk	Koncept 2: Izmenljiva filtrirna vreča	Koncept 3: Izmenljivi jekleni filter
Enostavnost izdelave	3	2	4	5
Enostavnost uporabe	3	5	4	3
Hitrost menjave filtrov	1	3	2	2
Pričakovan pretok filtriranja	2	3	3	4
Pričakovana cena	3	2	4	4
Velikost filtrirne površine	2	2	3	4
Stroški popravila	2	3	3	4
SKUPAJ		46	56	62

Matrika vrednotenja, v kateri smo zajeli vse kriterije, ki smo jih zastavili v konstrukcijskem zahtevniku, nam je pomagala pri izbiri koncepta. Na podlagi te matrike odločanja smo se odločili za koncept z izmenljivim jeklenim filtrom. Ta koncept je dosegel največ točk, saj izstopa po enostavnosti izdelave, pričakovanem pretoku filtriranja, velikosti filtrirne površine ter nizkih stroških popravila. Prednost jeklenega filtra v komori je tudi ta, da tehnologija s filtrirnimi kartušami na trgu že obstaja in s tem olajša izdelavo.

3.1.4 Snovanje

V fazi razvoja prototipa za vzorčenje mikroplastike smo se odločili za uporabo tretjega koncepta, ki temelji na Atlas filtrih, namenjenih filtraciji pitne vode. Ta izbira je temeljila na že preizkušeni tehnologiji, ki so omogočale zanesljivo delovanje naprave in zadostitev vsem konstrukcijskim zahtevam.

V fazi snovanja smo se posvetili tudi podrobnostim, kot so dimenzije naprave, način montaže in povezovanje filtrirne komore s črpalko ter ostalimi komponentami. Zasnovo prototipa za vzorčenje smo prikazali na sliki 12. Na sliki je poleg črpalke prikazana filtrirna komora z vstavljenimi jeklenimi filtrirnimi kartušami. Ta model komore proizvajalca Atlas Filtri smo izbrali zaradi akrilnega ohišja, ki omogoča pogled na filter ter potencialno zamašitev filtrirne površine. Komplementarni filtri enakega proizvajalca so INOX mrežni filtri INOX z 150- μ m porami standardne višine 9 $\frac{3}{4}$ in. (24,76 cm). Izbrana črpalka je motorna črpalka GC-PW 16 proizvajalca Einhell. To črpalko smo izbrali zaradi moči (1,6 kW) in zmožnostjo črpanja do 14.000 L/h ter do 7 metrov sesalne višine, kar omogoča črpanje z višine na bolj nedostopnih mestih. Edina pomanjkljivost črpalke je nekoliko zahtevnejši zagon, ki potrebuje polnjenje cevi z vodo. To težavo smo odpravili z odstranljivo sesalno cevjo z nepovratnim ventilom, ki se pred črpanjem napolni z vodo, kar olajša zagon.



Slika 12: 3D model in shematika prototipa in filtrirnega sistema (avtor: Sebastijan Kotnik)

3.1.5 Razdelava

Za zasnovani izdelek je potrebno navesti dodatne informacije. Faza razdelave vključuje optimizacijo podrobnosti in izdelavo delavniške dokumentacije, ki vsebuje tudi dopustne tolerance mer, specifikacije filtrirne komore, izračune obremenitev, načrte sestavljanja ter opise delovanja posameznih komponent. Pri pripravi navodil za uporabo prototipa (Priloga I) smo morali upoštevati vse elemente zasnove. Poleg operativnih navodil smo pripravili tudi opis postopka menjave filterjskih kartuš in odpravljanje pogostih napak na terenu, kar je ključnega pomena za enostavno vzdrževanje in uporabo naprave. Na ta način smo zagotovili, da bo naprava delovala zanesljivo in učinkovito ter da bo uporabniku omogočala enostavno uporabo in vzdrževanje. V primeru razvoja prototipa za vzorčenje mikroplastike je pri razdelavi šlo predvsem za izdelavo navodil za obratovanje in vzdrževanje naprave, saj naprava ni namenjena za proizvodnjo in komercialno rabo, temveč za raziskovalne namene. Navodila za upravljanje in vzdrževanje vsebujejo sledeče informacije:

- opis naprave,
- seznam potrebne dodatne opreme,
- zaščita pri delu z napravo,
- podroben postopek uporabe naprave,
- postopek čiščenja naprave po uporabi.

V navodilih je opisan postopek tako hladnega zagona kot normalnega zagona, menjave filtrov, čiščenje in spiranje kot tudi varno rokovanje s prototipom za vzorčenje mikroplastike s fotografijami. Vsebina postopkov za vzdrževanje vključuje čiščenje in skrb za prototip pred, med in po uporabi. Dokumentaciji so priložena še navodila proizvajalca črpalke v primeru, da bi le-ta bila potrebna.

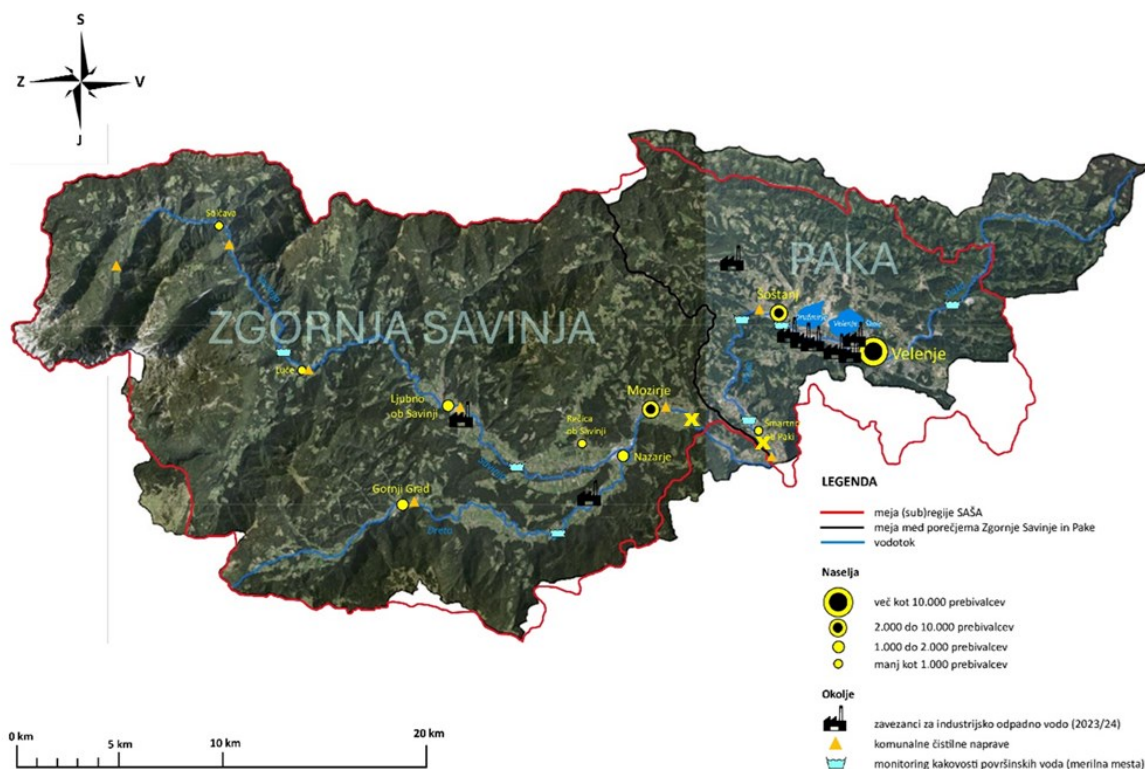
3.2 Testiranje prototipa in metode vzorčenja

Izbor lokacije:

Pred začetkom vzorčenja smo izvedli geografski pregled Savinjsko-Šaleške (SAŠA) regije in izbrali testne lokacije. S pomočjo karte SAŠA regije (slika 13) smo pregledali večja naselja, zavezance za monitoring industrijskih odpadnih vod, čistilne naprave ter tok reke Pake in reke Savinje. Na podlagi teh podatkov smo identificirali primerne lokacije za vzorčenje mikroplastike vzdolž obeh rek.

Izbira lokacij za testiranje prototipa:

Za testiranje prototipa smo izbrali dve lokaciji na vodotokih. Na rekah smo tako določili prvo lokacijo na najnižjem delu toka. To odločitev smo sprejeli, ker smo pričakovali, da se v tem delu toka zaradi daljše poti vodi kopičijo mikroplastični delci. S tem smo želeli preveriti, ali je mogoče učinkovito filtrirati mikroplastiko iz vode. Predpostavili smo, da bo ta lokacija nudila višjo koncentracijo mikroplastike, kar nam bo omogočilo natančnejšo oceno učinkovitosti prototipa.



Slika 13: Karta SAŠA regije z vodotoki, naselji in industrijskimi obrati in vzorčnimi točkama x. (avtor: Klemen Kotnik)

Pred testiranjem prototipa na izbranih dveh lokacijah smo 26. januarja 2024 izvedli preliminarne zagon naprave, kjer smo preverili njeno delovanje. Testiranje je potekalo na Centralni čistilni napravi Šaleške doline, kjer smo napravo preizkusili dvakrat. Enkrat na iztočnem bazenu čistilne naprave in drugič tik pred izlivom v reko Pako. S tem smo pridobili dva kontrolna vzorca vode, pri čemer je bil glavni namen preizkusa predvsem tehnično preverjanje delovanja sistema in procesov. Terensko delo je potekalo nekoliko počasneje zaradi spoznavanja sistema ter sprotnih vprašanj in pojasnil.

Testiranje je služilo tudi kot usposabljanje za člane ekipe, ki so z napravo izvajali vzorčenje, da bi se seznanili z njenim delovanjem in pridobili občutek za rokovanje. Prvo pravo testiranje je potekalo 19. junija 2024 na reki Paki v kraju Rečica ob Paki, drugo testiranje pa 27. junija 2024 na reki Savinji pri kraju Ljubija (slika 14). Med vzorčenjem smo podrobno dokumentirali rokovanje z napravo ter zabeležili možne izboljšave, ki smo jih naknadno upoštevali pri nadgradnji (poglavje 4.1.1). Vzorce pridobljenih testiranj smo nato shranili za nadaljnjo laboratorijsko analizo.



Slika 14: Lokacija vzorčenja na reki Paki (A) ter reki Savinji (B).

Potek vzorčenja:

Vzorčenje je potekalo kot po naši zastavljeni metodi. Sesalno cev smo namestili gorvodno od črpalnega sistema, cev za odvod vode pa dolvodno (slika 14), da ne bi prihajalo do redčenja vzorca. Pred namestitvijo filtra smo sesalno cev napolnili z vodo ter zagnali črpalko. Črpalko smo pustili prižgano vsaj 5 minut in s tem zagotovili, da je bil sistem prečiščen z vzorčeno vodo. Nato smo črpalko izklopili, namestili filter ter vklopili merilnik pretoka in preverili, ali vsi sistemi delujejo pravilno, nakar smo pričeli s črpanjem 1 m³ vode. Vzorčenje je potekalo brez večjih zapletov, a z nekaj opazkami (okornost in teža naprave, zahtevno vzorčenje na sredini vodotoka), ki pa smo jih naknadno naslovili z manjšimi nadgradnjami (poglavje 4.1.1). Pri vzorcu reke Pake je bilo zaradi bližine travniških površin in sezone košnje v vzorcu prisotnih veliko organskih delcev trave in listja, vendar le-to ni vplivalo na hitrost vzorčenja. Tekom vzorčenja smo izvedli tudi osnovne fizikalne in kemijske meritve vode s terenskim kovčkom. Izmerili smo tudi prevodnost vode, pH, temperaturo in nasičenost s kisikom (Multiline® Multi 3620 IDS, WTW) (slika 15). Fizikalno-kemijske parametre smo izmerili zaradi pridobitve večjega nabora podatkov, ki so standardni pri vzorčenjih in analizah vode ter potencialno pomagajo pri nadaljnjih analizah. Hkrati smo spremljali še meteorološko stanje okolja – trenutno vreme, temperaturo ter število dni od zadnjih padavin.

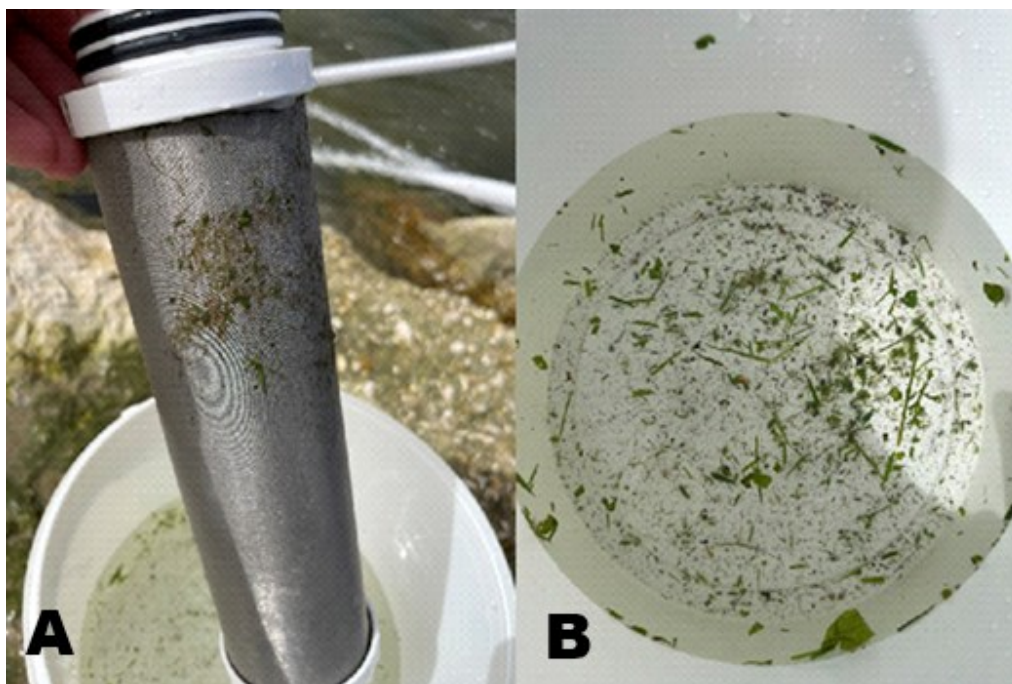


Slika 15: Merjenje fizikalno kemijskih lastnosti vode s terenskim kovčkom.

3.3 Priprava in analiza vzorcev

Pridobljeni vodni vzorci so bili sestavljeni iz dveh delov;

1. **Filtrat jeklenega filtra:** Gre za filtrat, ki obstane na filtru med vzorčenjem (Slika 16A).
2. **Ostanek vode iz filtrirne komore:** Po zaključku vzorčenja se v filtrirni komori poleg filtrata na filtru zadrži koncentrirana masa delcev v vodi (Slika 16B).



Slika 16: Jeklen filter in z zajetim vzorcem (A) ter filtrat zajet v filtrirni komori (B).

Pred izvajanjem analize je bila potrebna priprava vzorca, ki je zajemala filtriranje, oksidacijo, spiranje in pregledom pod stereolupo.

3.3.1 Priprava vzorcev vode

V laboratoriju smo filter postavili nad odprto vedro z vzorcem in s prho sprali vse filtrirane snovi v vedro. Če se vedro napolni, ga zamenjamo s praznim in čistim vedrom. Vzorec precedimo čez 200- μ m jekleno sito, pri čemer ostane le trdna snov, ki jo prenesemo na petrijevko, jo ustrezno označimo in pokrijemo.

Nato smo v petrijevko prilili 30 ml 30-% vodikovega peroksida. Nakar smo petrijevko zaprli in jo postavili na suho mesto na sobni temperaturi. Ta postopek je odvisen od količine biološkega materiala in lahko traja do 96 ur.

Ko je postopek končan, vzorec speremo v čaši z veliko deionizirane vode. S pomočjo vakuumске črpalke in papirnega filtra s premerom 47 mm in poroznostjo 10 μ m zberemo celoten vzorec, s čimer ga ločimo od vode. Če se filter zamaši, ga zamenjamo z novim, pri čemer označimo vse filtre istega vzorca kot enoten vzorec. Nazadnje pustimo, da se filtrirani papir posuši, nato pa ga pregledamo s stereopovečevalnim steklom.

3.3.2 Spektroskopska identifikacija delcev

Pred pričetkom analize smo za vsak vzorec pripravili testno ploščo s 96 luknjicami, nanjo smo označili ime vzorca in dan vzorčenja. Vsak filter papir vzorca se natančno pregleda pod stereolupo pri 20-kratni povečavi. Potencialni plastični delček smo previdno in posamično prenesli v svoj prekat v plošči, na kateri si oznake v mreži sledijo od 1 do 12 ter od A do H. Za vsak vzorec smo v Excel dokumentu ustvarili razporednico, z enako razporeditvijo in številom okenc kot na plošči, v katere smo po analizi vpisali podatke za enostavno arhiviranje in dostopanje. Končno analizo vzorcev smo izvedli z FTIR-ATR spektrofotometra Alpha II proizvajalca Bruker (slika 17).



Slika 17: FTIR-ATR Alpha II spektrometer proizvajalca Bruker

Spektroskopija FTIR je analitska tehnika, ki se uporablja za identifikacijo in karakterizacijo materialov na osnovi absorpcije infrardeče svetlobe. Ta metoda temelji na merjenju absorpcijskega spektra vzorca, ki se pridobi z obsevanjem vzorca z infrardečo svetlobo. Molekule v vzorcu absorbirajo določene valovne dolžine svetlobe, kar povzroči vibracije molekularnih vezi.

Ta metoda je poleg ramanske mikroskopije in μ -FTIR ena izmed najpogostejše uporabljenih tehnik za kvalitativno analizo mikroplastike. Kljub njeni široki uporabi se sooča z določenimi omejitvami, predvsem zaradi prisotnosti oljnih filmov ali nečistoč na vzorcih. Žarki IR prodrejo le nekaj mikrometrov globoko, kar pomeni, da je potrebno vzorce predhodno očistiti.

V teoriji naj bi se to zgodilo med procesom oksidacije, vendar v praksi sledi nečistoč pogosto ostanejo, kar zahteva človeško interpretacijo rezultatov. Dodatne izzive predstavljata kompleksnost vzorcev in potreba po standardizaciji metod, da bi bilo mogoče primerjati rezultate med različnimi študijami. V prihodnosti se pričakuje nadaljnji razvoj spektroskopije FTIR in drugih analitskih tehnik, kar bi lahko izboljšalo razumevanje in prispevalo k reševanju problema mikroplastike.

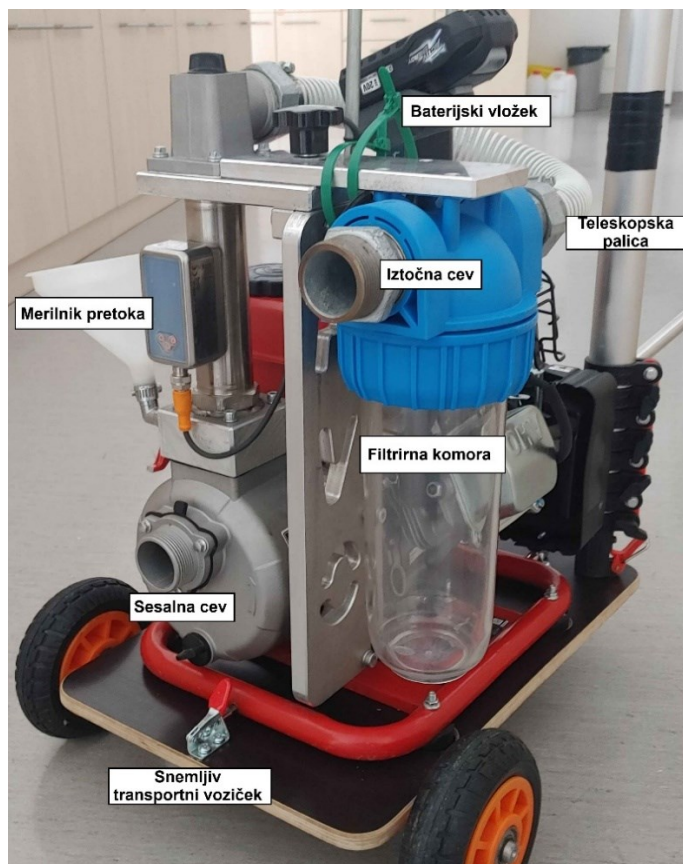
4. REZULTATI Z DISKUSIJO

4.1 Prototip za vzorčenje mikroplastike

Prvi in najpomembnejši rezultat magistrskega dela je razvoj in izdelava prototipa za vzorčenje mikroplastike (sliki 18 in 19). Trenutna oblika prototipa izpolnjuje vse zahteve konstrukcijskega zahtevnika. Glavni sestavni deli vzorčevalnika so:

- Bencinska črpalka
- Merilnik pretoka
- Baterijski vložek
- Filtrirna komora
- Teleskopska palica
- Sesalna/odvodna cev

Za upravljanje z napravo je potreben le en operater, z izdelanimi navodili (Priloga I) pa je uporaba relativno preprosta in po nekaj poskusih intuitivna. Pretok vode in tlak sta zadostovala za filtracijo in izmenljive filtre smo lahko menjali brez težav. Naprava je po dimenzijah ustrezna, stroški izdelave niso presegli zastavljene meje, stroški obratovanja pa vključujejo občasno menjavo filtrov in stroške goriva.



Slika 18: prototip z vsemi sestavnimi deli.

Prve izkušnje vzorčenja z napravo so bile pozitivne. Naprava je delovala kot zasnovana z nekaj pomanjkljivostmi ter željami za izboljšavo, ki smo jih na terenu zabeležili in pred drugim testiranjem implementirali (4.1.1.). Njena uporaba zahteva zadostno predznanje z opravljanjem vodne črpalke in seznanitev z navodili delovanja prototipa za vzorčenje mikroplastike ter metodo vzorčenja.



Slika 19: Prototip za vzorčenje mikroplastike med obratovanjem na Centralni čistilni napravi Šaleške doline, 26. 1. 2024

4.1.1 Nadgradnja po prvem testiranju

Ob testnem zagonu prototipa smo zaznali nekaj pomanjkljivosti, predvsem tehničnih, ki smo jih izboljšali pred nadaljevanjem dela oz. pred testiranjem prototipa na obeh lokacijah ob rekah.

1. Pri vzorčenju na čistilni napravi smo opazili potrebo po možnosti manipuliranja sesalne glave z večje razdalje, saj je bil nivo vode v bazenu znatno nižji kot naprava (slika 19), zaradi česar je bila sesalna glava brez opore ter plavala v vodi prepuščena toku. Zato smo se odločili za dodatno teleskopsko palico z nastavljivo dolžino, ki se lahko pripne na sesalno glavo in nam omogoča glavo držati na mestu tudi do 3 metre od operaterja (slika 20).



Slika 20: Teleskopska palica za sesalno glavo.

2. Med prenašanjem naprave od vozila do vzorčnega mesta smo opazili manjšo težavo, in sicer njeno težo. Težava je bila posebej izrazita v primerih, ko dostop z avtomobilom do vzorčne točke ni bil mogoč, zato je bilo treba napravo ročno prenašati na daljše razdalje. Da bi olajšali transport, smo sistemu dodali snemljiv voziček z ročko. Voziček ima dovolj velika kolesa, da omogoča premikanje naprave ne le po cesti, temveč tudi po pesku in travnatih površinah (Slika 18, 21).



Slika 21: Voziček za prevoz črpalke z zaklopkami za pritrditev črpalke.

Po prvotni uporabi prototipa za vzorčenje mikroplastike z implementiranimi nadgradnjami se zdi, da ima naprava potencial ne le v rekah, ampak tudi v drugih vodnih telesih. Zaradi narave sestave je različne dele možno menjati ter celo izboljšati. Za zagotavljanje točnosti rezultatov pa bi bilo potrebno implementirati teste, ki bi dokazovali učinkovitost naprave pri zajemu mikroplastike, hkrati pa tudi preprečevati kontaminacije vzorcev med vzorčenjem in pripravo vzorca. Zaradi tega bi bilo smiselno sproti in po potrebi prilagajati ter posodabljati napravo in metodo vzorčenja.

4.2 Rezultati fizikalno-kemijskih meritev na terenu

Ob vsakem testiranju prototipa za vzorčenje mikroplastike smo sočasno na terenu izmerili tudi fizikalno-kemijske parametre. Izdelali smo terenski list, kamor smo vnesli podatke o temperaturi zraka in vode, pH, motnost, koncentracijo raztopljenega kisika in električno prevodnost (Priloga II). Podatke s terena smo nato vnesli v skupno preglednico meritev (Preglednica 4). Pri testu na čistilni napravi nismo merili fizikalno-kemijskih parametrov zaradi nedostopnosti iztočnih bazenov.

Preglednica 4: Preglednica rezultatov fizikalno kemijskih meritev na reki Paki in Savinji.

Datum	Lokacija	Vreme	Zadnji dež	T (°C) zraka	T (°C) vode	pH	Motnost (NTU)	Raztopljen kisik (mg O ₂ /L)	El. prevodnost (µs/cm)
19. 6. 2024	Paka	Sončno	3 dni	26	18,3	8,23	6 NTU	9,43	480
27. 6. 2024	Savinja	Delno oblačno	0 dni	21	17,1	8,31	10 NTU	9,86	324

Ti osnovni parametri so pomembni, saj opisujejo kemijsko stanje vodnega telesa oz. nakažejo potencialno onesnaženje vode. S tem lahko pridobimo informacije, kaj se dogaja vzdolž vodnega telesa in pomaga pri interpretaciji rezultatov. Pomembno je omeniti, da so podatki iz zgornje preglednice za eno vzorčenje in je brez večjih setov podatkov ugibanje o možnih korelacijah le spekulativna.

Temperatura zraka: Temperatura zraka lahko vpliva na hitrost procesov razpadanja v okolju. Višje temperature lahko pospešijo degradacijo plastike, kar vodi do večje prisotnosti mikroplastike v vzorcih. V kombinaciji z sončnim vremenom lahko pomeni hitrejši razpad večjih kosov plastike.

Temperatura vode: Temperatura vode je ključna za določanje fizikalno-kemijskih lastnosti vode. Je najbolj osnoven parameter, meri se predvsem z drugimi parametri, kot sta pH in prevodnost, ki se glede na temperaturo spreminjata.

Na primeru naše meritve je bilo v vzorcu Pake, ki je imel višjo temperaturo vode in zraka (ter tudi sončno vreme), zaznanih več mikroplastičnih delcev, vendar ne dovolj, da bi se lahko vzpostavila močna korelacija.

pH: pH vrednost vode vpliva na kemijske reakcije, ki lahko spremenijo morfologijo. Nizek ali visok pH lahko povzroči hitrejši razpad mikroplastike. Kisle ali bazične razmere lahko namreč pospešijo razgradnjo plastike ali vplivajo na njeno sposobnost vezave z drugimi onesnaževali, kar bi bilo potrebno nadaljnjo raziskati.

V našem primeru je razlika med pH vrednostjo Pake in Savinje $<0,1$, kar je premajhna razlika, da bi realno vplivala na pojav mikroplastike, a parameter je kljub temu uporaben za monitoring in povezavo z prevodnostjo in temperaturo.

Motnost (NTU): Motnost meri količino suspendiranih delcev v vodi, kar lahko v potencialnem primeru pomeni tudi mikro- in nanoplastiko, vendar za količine le teh v vodi verjetno nimajo velikega vpliva na rezultat. Višja motnost lahko pomeni povišano vsebnost sedimentov v vodi, kar lahko nakazuje na povišan tok zaradi deževja, hitrejši pretok, ki pobira sedimente in podobno, kar je pomembno, saj je dokazano, da je sediment velik akumulator mikroplastičnih delcev.

Korelacije pri tem parametru ni možno vzpostaviti zaradi pomanjkanja ponovnih meritev, na terenu je motnost namreč zelo variabilna in zahteva ponovne meritve skozi daljša obdobja.

Raztopljen kisik ($\text{mg O}_2/\text{L}$): Koncentracija kisika v vodi je pomembna za oceno ekološkega stanja vodnega telesa. Nizke ravni kisika bi lahko nakazovale na počasnejši tok, vendar kot sam parameter ne pove veliko o onesnaženosti z mikroplastiko.

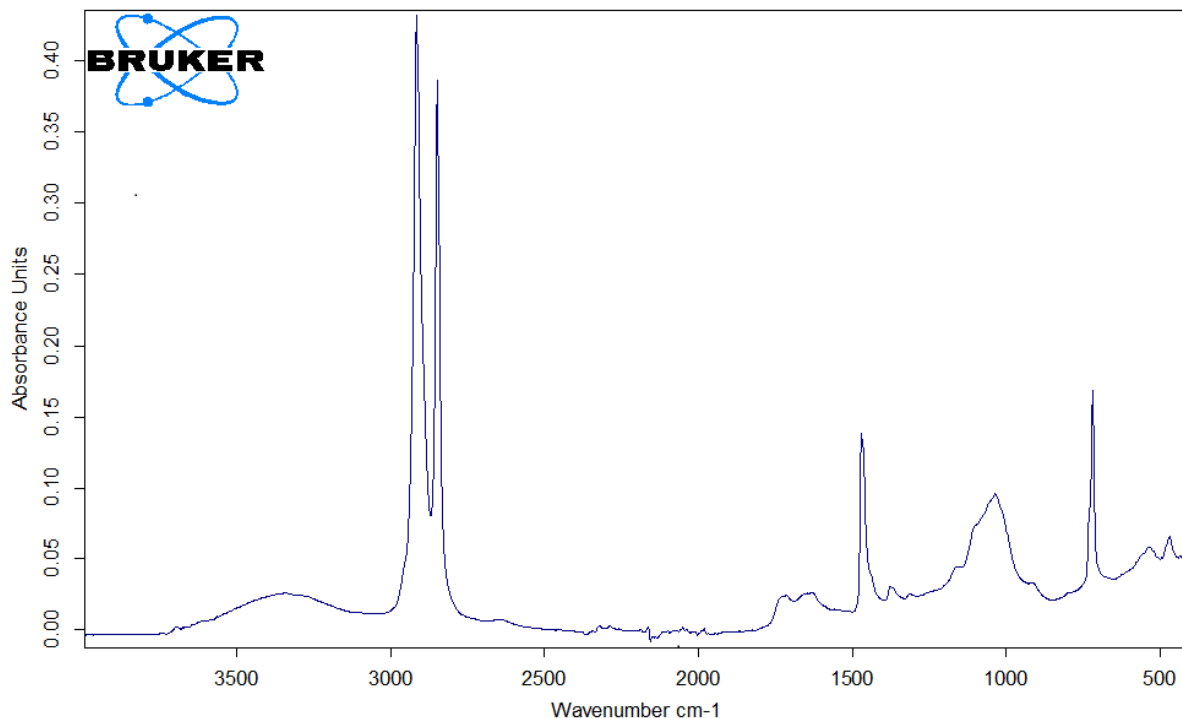
Kot predvidevano, sta relativno identični koncentraciji raztopljenega kisika, standardni za vodo pri teh temperaturah brez korelacije s številom delcev mikroplastike.

Prevodnost ($\mu\text{s}/\text{cm}$): Prevodnost meri sposobnost vode za prevajanje električnega toka, kar je odvisno od prisotnosti ionov. Visoka prevodnost lahko kaže na onesnaženost ali visoko prisotnost mineralne snovi, ki lahko v kombinaciji z motnostjo lahko potrdi prisotnost sedimentov.

Vsi izmerjeni parametri dajejo dodatne informacije o fizikalno-kemijskem stanju vode. Te informacije bi lahko bile potencialno koristne v prihodnje, v kolikor bi se iskale korelacije med količino mikroplastike ter določenim parametrom. Med temi najbolj izstopata temperatura ter pH vode, ki lahko ob večjih spremembah pospešita razgradnjo plastike v mikroplastiko. Zaenkrat zaradi majhnega nabora podatkov ter odprtih vprašanj o vplivu teh parametrov na pojav mikroplastike ti podatki ne povedo veliko. Koristni bi lahko bili na dolgi rok, ko se bo o tem onesnažilo in njegovem nastanku vedelo več.

4.3 Kemijska identifikacija delcev

Postopek analize z Alpha II FTIR-ATR spektrometrom in OPUS programsko opremo je dobro optimiziran, vendar zahteva predhodno znanje principa delovanja naprave ter osnovno usposabljanje za uporabo spektrometra. Ob koncu vsake analize pridobimo spekter (slika 22), ki ga z programsko opremo lahko nadaljnjo analiziramo in določimo tip polimera.



Slika 22: Spekter analizirane delca Paka

Končni rezultati analize vzorcev so potrdili prisotnost mikroplastike v **obeh** rekah in na iztoku CČN. Analizirali smo 45 potencialnih mikroplastičnih delcev, vendar smo opazili tudi veliko majhnih vlaken, ki so premajhna za FTIR in ročno izoliranje. Vse pridobljene podatke prvega vzorčenja smo prikazali v preglednici 5 in preglednici 6

Preglednica 5: Preglednica rezultatov analize FTIR

Ime vzorca	Datum	Število potencialnih pl. delcev	Število mikroplastičnih delcev	[%] mikroplastike
CČN Šoštanj	22. 1. 2024	7	3	43
Paka	19. 6. 2024	18	3	16.6
Savinja	27. 6. 2024	20	3	15
Skupaj	-	45	9	20

Vse skupaj je bilo na prvem testiranju (vzorčenje na čistilni napravi + Paka in Savinja) identificiranih 9 delcev mikroplastike v vodi in sedimentih. Tip identificirane plastike se je razlikoval, identificirani pa so bili naslednji polimeri:

Preglednica 6: pregleden prikaz najdenih delcev po posamični lokaciji

	Paka	Savinja	CČN	skupaj
PET	1	1	0	2
PA11	2	1	1	4
SEBS	1	0		1
Fenol formaldehidna smola	0	1	0	1
PA6	0	0	1	1

PET (polietilentereftalat): PET je pogosto uporabljen v plastenkah za pijače in embalaži za živila. V vodi se lahko znajde kot mikroplastika zaradi razgradnje teh izdelkov med uporabo in po odlaganju.

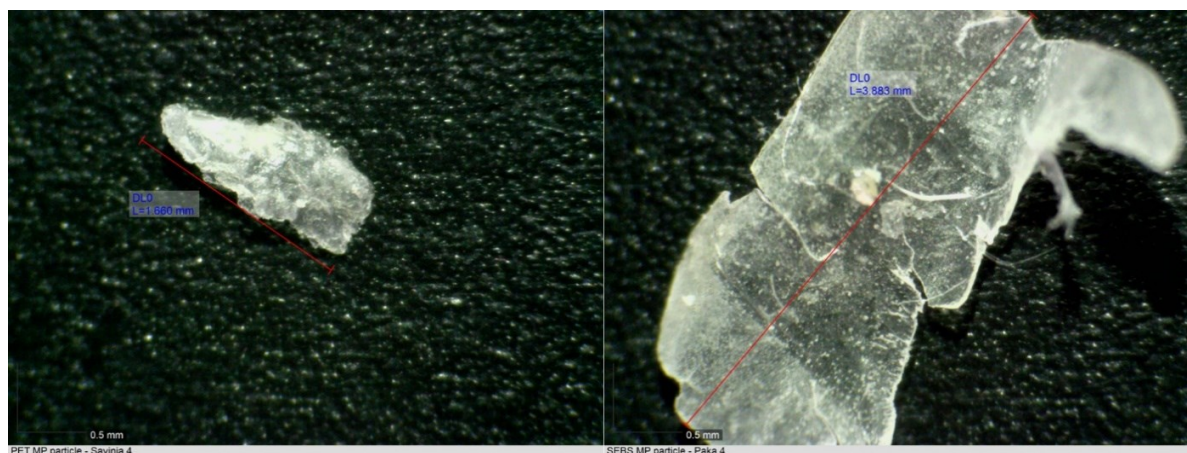
PA11 (poliamid 11): PA11 je polimer, pridobljen iz obnovljivih virov, kot je ricinusovo olje. Uporablja se v avtomobilski in športni industriji. Mikroplastika iz PA11 se lahko sprosti v vodo zaradi obrabe izdelkov, kot so cevovodi in športna oprema.

SEBS (stiren-etilen-butilen-stiren): SEBS je termoplastični elastomer, uporabljen v medicinskih pripomočkih in otroških igračah zaradi svoje varnosti in fleksibilnosti. Delci SEBS mikroplastike se lahko znajdejo v vodi zaradi degradacije teh izdelkov.

Fenol formaldehidna smola: Ta termo reaktivna smola se uporablja v lepilih, premazih in kompozitnih materialih. Delci fenol formaldehidne smole se lahko sprostijo v okolje med razgradnjo teh materialov.

PA6 (poliamid 6): PA6 je znan po svoji trdnosti in toplotni odpornosti, pogosto uporabljen v avtomobilski industriji in elektronskih komponentah. Mikroplastika iz PA66 lahko nastane zaradi mehanskih poškodb in obrabe izdelkov.

Delce, ki so bili potrjeni kot mikroplastika smo fotografirali, kadar v procesu vzorčenja vzorec ni bil uničen, kar se je zaradi velikosti delcev in agresivnega procesa organske razgradnje lahko zgodi dokaj pogosto. Primer slike mikroplastičnega delca PET in SEBS iz vzorca Paka 4 prikazuje morfologijo in velikost najdenih mikroplastičnih delcev (slika 23).



Slika 23: Mikroplastični delček vzorca Paka; PET (levo) in SEBS (desno) pod 20-kratno povečavo.

FTIR je najpogostejše uporabljena metoda za identifikacijo mikroplastike zaradi hitrosti, natančnosti in dolgoletni uvedbi na tem področju raziskav. Uporaba Alpha II FTIR spektrometra je bila preprosta, sama identifikacija in interpretacija rezultatov pa potrebuje veliko več dela in tudi izkušnje, ki se pridobijo le z zadostno uporabo. Z bodočo nadgradnjo programske opreme, uporabo umetne inteligence in vsemi preboji na področju spektroskopije IR se pričakuje, da bo identifikacija postala hitrejša, učinkovitejša ter tudi bolj zanesljiva.

5. SKLEPI

Razvoj prototipa za vzorčenje mikroplastike predstavlja pomemben korak naprej v prizadevanjih za spremljanje onesnaženosti z mikroplastiko v vodnih telesih. Uspešno smo razvili prototip, ki omogoča hitro in učinkovito vzorčenje mikroplastike tudi v manjših in plitvih rekah, kar je ključnega pomena za natančno spremljanje stanja vodnih teles.

Prototip smo testirali v rekah Paki in Savinji ter na čistilni napravi. V teh preizkusih je naprava zajela delce, večje od 150 μm , vključno z nekaterimi vlakni, ki so sicer precej ožji, a se kljub temu ujamejo med filtracijo. Vendar pa nimamo ustreznih primerjalnih meritev, zato ni mogoče dokončno trditi, da so pri testiranju dobljeni rezultati absolutno zanesljivi.

Pri testiranju smo ugotovili, da lahko s prototipom v približno 10 minutah prečrpamo 1 m^3 vode, pri čemer pridobimo okoli 2 L filtrata. Med črpanjem smo lahko konstantno spremljali pretok z ultrasoničnim merilcem pretoka, ki nam je poleg trenutnega pretoka kazal tudi skupno pretočeno količino. Prototip v kombinaciji z napisano metodo je po nadgradnji predstavljal dobro začetno točko za razvoj vzorčenja v manjših vodotokih.

Laboratorijske analize vzorcev, zbranih med testiranjem, so potrdile prisotnost mikroplastike v vseh treh testnih vzorcih. To nakazuje, da naš prototip tehnično deluje pri zajemu mikroplastike, hkrati pa opozarja na možnost onesnaženosti testiranih vodotokov. Preden lahko sklepamo o obsegu problema, je potrebno izključiti možnost kontaminacije vzorcev ter večkratno ponovitev vzorčenja. Prisotnost mikroplastike v vseh vzorcih bi bila zaskrbljujoča, vendar bi za to bilo potrebno ponovno vzorčenje ter testiranje prototipa z pozitivno kontrolo ter izključitvijo možne kontaminacije. Med testiranjem smo potrdili, da sistem deluje, kot smo ga načrtovali, vendar zaradi omejenih podatkov o učinkovitosti zajema (nismo ocenjevali morebitnih izgub med filtracijo) ne moramo potrditi točnosti pridobljenih rezultatov. Pridobljeni podatki so dragoceni, saj bodo pripomogli k boljšemu razumevanju razširjenosti in vpliva mikroplastike na okolje ter podprli nadaljnje raziskave.

Praktična uporaba testiranega prototipa je široka, saj je primeren za uporabo v različnih vodnih telesih. To pomeni, da lahko prispeva k boljšemu razumevanju onesnaženosti z mikroplastiko in pomaga pri oblikovanju strategij za zmanjšanje tega onesnaževala. Prototip je pokazal učinkovitost pri zajemu mikroplastike, kar je ključnega pomena za raziskave in spremljanje stanja vodnih teles. Zanesljivost rezultatov, ki jih omogoča naš prototip, je ključna za natančne analize in oblikovanje ustreznih ukrepov za zaščito okolja. S tem prototipom lahko pomembno prispevamo k raziskavam onesnaženosti okolja z mikroplastiko in k iskanju rešitev za ta pereč problem. Naša prizadevanja so usmerjena v nadaljnji razvoj in izboljšave sistema, da bi še bolj učinkovito prispevali k varovanju naših vodnih virov in okolja nasploh. Prototip je predvsem omejen na višino, s katere se lahko vzorči ter za daljša vzorčenja odvisnost od goriva. V bodoče bi se lahko prototip uporabil v monitoringih tako rek kot drugih vodnih teles.

V uvodu magistrskega dela smo si zastavili tri hipoteze:

Hipoteza 1: Prototip za vzorčenje mikroplastike omogoča filtracijo 1 m^3 vode v 15 minutah. Z vgrajenim merilnikom pretoka smo merili čas, potreben za filtracijo 1 m^3 vode. Na vseh treh meritvah je bil čas vzorčenja okoli 10 minut, s čimer je bila hipoteza **potrjena**.

Hipoteza 2: Prototip za vzorčenje mikroplastike omogoča pridobivanje koncentriranega vzorca z volumnom dveh litrov. Končni vzorec po filtraciji zajema vsebino filtrirne komore in delce, ujete na filter. Skupna količina vzorca je manj kot dva litra, kar **potrjuje** hipotezo.

Hipoteza 3: Prototip je primeren za testiranje v plitkih rekah in potokih. Testne meritve smo opravili v Paki in Savinji, kjer je globina znašala približno 15–20 cm. Vzorčenje je potekalo brez težav, zato je bila tudi ta hipoteza **potrjena**.

6. POVZETEK

V tem magistrskem delu smo pregledali obstoječo literaturo na področju vzorčenja in identifikacije mikroplastike. Razvili in testirali smo prototip za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih, pri čemer smo se osredotočili na manjše in plitke reke, kjer tradicionalne metode, kot je mreža manta, niso učinkovite. Spremljali smo tudi fizikalno-kemijske parametre ob vzorčenju ter izvedli identifikacijo mikroplastike z metodo FTIR-ATR.

Mikroplastika v okolju je pereč problem, saj ima zaradi svojih kemijskih lastnosti, potenciala za prenos patogenih organizmov ter razpada na toksične produkte potencialno negativen vpliv na ekosisteme in zdravje ljudi. V zadnjem desetletju se raziskave na tem področju intenzivirajo, vendar pa ostaja področje vzorčenja in analiziranja mikroplastike nestandardizirano.

V prvem delu naloge so podane teoretične osnove, kjer so natančno opredeljeni pojmi mikroplastike, njeni viri, vplivi in razširjenost v različnih okoljih. Poudarjena sta pomen kategorizacije mikroplastike glede na izvor (primarna in sekundarna) ter različne oblike mikroplastičnih delcev. Preučena je bila tudi aktualna literatura o metodah vzorčenja, pri čemer je bilo ugotovljeno, da prevladujejo metode z uporabo mreže (manta, planktonske mreže), medtem ko metode z uporabo črpalke predstavljajo manjši delež, a omogočajo boljši zajem manjših delcev ter možnost kaskadne filtracije.

V drugem delu sta predstavljena zasnova in razvoj prototipa za vzorčenje mikroplastike, ki temelji na metodologiji VDI 2221. Opisan je celoten razvojni proces: od tolmačenja naloge in generiranja konceptov, do izbire optimalne rešitve in končne razdelave naprave. Poseben poudarek je bil na zagotavljanju mobilnosti, robustnosti in možnosti uporabe v plitvih vodah. Razvita naprava vključuje črpalke, ultrasonični merilec pretoka ter filtracijsko komoro za zajem delcev, večjih od 150 μm .

Tretji del naloge obsega testiranje prototipa na treh lokacijah v Savinjsko-Šaleški regiji. Pridobljeni vzorci so bili obdelani v laboratoriju, kjer sta bili uporabljeni metodi vizualni pregled pod stereolupo ter FTIR-ATR spektroskopija za identifikacijo mikroplastičnih delcev. V tem delu, tako kot v zaključnem, je opredeljena tudi karakteristika naprave med vzorčenjem, količina pridobljenega filtrata in čas filtracije.

V zaključnem delu so podani tudi rezultati analiz, ki potrjujejo prisotnost mikroplastike v vseh testiranih vzorcih, a število delcev v 1 m^3 ne presega števila 3, kar je zelo nizka vrednost. Na podlagi testiranj lahko predpostavimo, da izbrana vodna telesa niso močno obremenjena z mikroplastiko. A potrebno je spremljanje stanja, saj se kot posledica vodne ujme iz leta 2023 na brežinah rek še vedno nahajajo odpadki, ki bodo v prihodnosti količino mikroplastičnih delčkov povečali. Prav tako je v prihodnosti smiselno načrtovati tudi analizo sedimenta. Znano je namreč, da se plastični delčki v vodnem stolpcu lahko posedajo. Identificirani so bili različni polimeri, kar kaže na različne vire onesnaženja ali možnosti kontaminacije. Prototip je bil po prvem testiranju tudi nadgrajen, kar še dodatno povečuje njegovo uporabnost in praktičnost.

7. SUMMARY

In this master's thesis, we reviewed the existing literature on microplastic sampling and identification. We developed and tested a prototype for sampling microplastics in water bodies, focusing on smaller and shallow rivers where traditional methods, such as manta nets, are not effective. We also monitored physical and chemical parameters and identified microplastics using the FTIR-ATR method.

Microplastics in the environment are a pressing problem because, due to their chemical properties, potential for transferring pathogenic organisms and decomposition into toxic products, they have a potentially negative impact on ecosystems and human health. Research in this field has intensified over the last decade, but the sampling and analysis of microplastics remains unstandardized.

The first part of the thesis provides a theoretical framework, precisely defining the concepts of microplastics, their sources, impacts and prevalence in different environments. The importance of categorizing microplastics according to their origin (primary and secondary) and the different forms of microplastic particles is emphasized. The current literature on sampling methods was also analyzed, and it was found that methods using nets (manta, plankton nets) predominate, while methods using pumps represent a smaller proportion but allow for better collection of smaller particles and the possibility of cascade filtration.

The second part presents the design and development of a prototype for sampling microplastics based on the VDI 2221 methodology. The entire development process is described: from interpreting the task and generating concepts to selecting the optimal solution and final design of the device. Particular emphasis was placed on ensuring mobility, robustness and the possibility of use in shallow waters. The developed device includes a pump, an ultrasonic flow meter and a filtration chamber for capturing particles larger than 150 μm .

The third part of the task involves testing the prototype at three locations in the Savinjska-Šaleška region. The samples obtained were processed in a laboratory, where visual inspection under a stereomicroscope and FTIR-ATR spectroscopy were used to identify microplastic particles. In this part, as in the final part, the characteristics of the device during sampling, the amount of filtrate obtained and the filtration time are also defined.

The final part also presents the results of analyses confirming the presence of microplastics in all tested samples, but the number of particles in 1 m^3 does not exceed 3, which is a very low value. Based on the tests, we can assume that the selected water bodies are not heavily polluted with microplastics. However, monitoring is necessary, as waste is still present on river banks as a result of the 2023 floods, and this will increase the amount of microplastic particles in the future. It would also be useful to plan sediment analysis in the future. It is known that plastic particles can settle in the water column. Various polymers have been identified, indicating different sources of pollution or possibilities of contamination. The prototype was also upgraded after initial testing, further increasing its usability and practicality.

8. LITERATURA

- Akdogan, Z., & Guven, B. (2019). Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental Pollution*, 254, 113011. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>
- Bagaev, A., Mizyuk, A., Khatmullina, L., Isachenko, I., & Chubarenko, I. (2017). Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion. *Science of The Total Environment*, 599–600, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185>
- Balla, A., Teofilovic, V., & Kiss, T. (2024). Microplastic Contamination of Fine-Grained Sediments and Its Environmental Driving Factors along a Lowland River: Three-Year Monitoring of the Tisza River and Central Europe. *Hydrology*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.3390/hydrology11010011>
- Barboza, L. G. A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- 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*, 258, 113284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113284>
- Chandra, S., & Walsh, K. B. (2024). Microplastics in water: Occurrence, fate and removal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 264, 104360. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104360>
- Cincinelli, A., Scopetani, C., Chelazzi, D., Lombardini, E., Martellini, T., Katsoyiannis, A., Fossi, M. C., & Corsolini, S. (2017). Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR. *Chemosphere*, 175, 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.024>
- Collignon, A., Hecq, J.-H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., & Goffart, A. (2012). Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 64(4), 861–864. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.011>
- Desforges, J.-P. W., Galbraith, M., Dangerfield, N., & Ross, P. S. (2014). Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.035>
- Frias, J. P. G. L., Otero, V., & Sobral, P. (2014). Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Marine Environmental Research*, 95, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.01.001>
- Furnham, A. (2000). The Brainstorming Myth. *Business Strategy Review*, 11(4), 21–28. <https://doi.org/10.1111/1467-8616.00154>
- Gago, J., Henry, M., & Galgani, F. (2015). First observation on neustonic plastics in waters off NW Spain (spring 2013 and 2014). *Marine Environmental Research*, 111, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.07.009>
- Gallagher, A., Rees, A., Rowe, R., Stevens, J., & Wright, P. (2016). Microplastics in the Solent estuarine complex, UK: An initial assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 102(2), 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.002>

Gao, S., Orlowski, N., Bopf, F. K., & Breuer, L. (2024). A review on microplastics in major European rivers. *WIREs Water*, 11(3), e1713. <https://doi.org/10.1002/wat2.1713>

Ghosh, S., Sinha, J. K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. *Sustainability*, 15(14), 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>

Haque, A., Holsen, T. M., & Baki, A. B. M. (2024). Distribution and risk assessment of microplastic pollution in a rural river system near a wastewater treatment plant, hydro-dam, and river confluence. *Scientific Reports*, 14(1), 6006. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56730-x>

Hlebanja, Jože. (with Mrkun, J.). (2003). *Metodika konstruiranja*. Fakulteta za strojništvo.

Horton, A. A., Weerasinghe, K. D. I., Mayor, D. J., & Lampitt, R. (2024). Microplastics in commercial marine fish species in the UK – A case study in the River Thames and the River Stour (East Anglia) estuaries. *Science of The Total Environment*, 915, 170170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170170>

Idowu, G. A., Oriji, A. Y., Olorunfemi, K. O., Sunday, M. O., Sogbanmu, T. O., Bodunwa, O. K., Shokunbi, O. S., & Aiyesanmi, A. F. (2024). Why Nigeria should ban single-use plastics: Excessive microplastic pollution of the water, sediments and fish species in Osun River, Nigeria. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 13, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100409>

International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 24187:2023*. ISO. Retrieved April 30, 2025, from <https://www.iso.org/standard/78033.html>

Isobe, A., Uchiyama-Matsumoto, K., Uchida, K., & Tokai, T. (2017). Microplastics in the Southern Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 623–626. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.037>

Jelen, Ž., Svetec, M., Majerič, P., Kapun, S., Resman, L., Čeh, T., Hajra, G., & Rudolf, R. (2024). Contaminants in the Soil and Typical Crops of the Pannonian Region of Slovenia. *Sustainability*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su16198678>

Kunz, A., Schneider, F., Anthony, N., & Lin, H.-T. (2023). Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways. *Environmental Pollution*, 321, 121096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121096>

Laglbauer, B. J. L., Franco-Santos, R. M., Andreu-Cazenave, M., Brunelli, L., Papadatou, M., Palatinus, A., Grego, M., & Deprez, T. (2014). Macrodebris and microplastics from beaches in Slovenia. *Marine Pollution Bulletin*, 89(1), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.036>

Leistenschneider, C., Wu, F., Primpke, S., Gerds, G., & Burkhardt-Holm, P. (2024). Unveiling high concentrations of small microplastics (11–500 µm) in surface water samples from the southern Weddell Sea off Antarctica. *Science of The Total Environment*, 927, 172124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172124>

Lima, A. R. A., Costa, M. F., & Barletta, M. (2014). Distribution patterns of microplastics within the plankton of a tropical estuary. *Environmental Research*, 132, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.031>

- Lusher, A. L., Burke, A., O'Connor, I., & Officer, R. (2014). Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling. *Marine Pollution Bulletin*, 88(1–2), 325–333. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.08.023>
- Mani, T., & Burkhardt-Holm, P. (2020). Seasonal microplastics variation in nival and pluvial stretches of the Rhine River – From the Swiss catchment towards the North Sea. *Science of The Total Environment*, 707, 135579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135579>
- Mani, T., Hauk, A., Walter, U., & Burkhardt-Holm, P. (2015). Microplastics profile along the Rhine River. *Scientific Reports*, 5(1), 17988. <https://doi.org/10.1038/srep17988>
- 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*, 858, 160043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160043>
- McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J., & Kelly, J. J. (2014). Microplastic is an Abundant and Distinct Microbial Habitat in an Urban River. *Environmental Science & Technology*, 48(20), 11863–11871. <https://doi.org/10.1021/es503610r>
- Osborn, A. F. (1953). *Applied imagination: Principles and procedures of creative thinking*. Charles Scribner's Sons.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer Science & Business Media.
- Prata, J. C., Da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of The Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Saad, D., Ramaremissa, G., Ndlovu, M., Chauke, P., Nikiema, J., & Chimuka, L. (2024). Microplastic Abundance and Sources in Surface Water Samples of the Vaal River, South Africa. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 112(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03845-y>
- Samuels, W., Awe, A., & Sparks, C. (2024). Microplastic pollution and risk assessment in surface water and sediments of the Zandvlei Catchment and estuary, Cape Town, South Africa. *Environmental Pollution*, 342, 122987. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122987>
- 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*, 738, 139866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139866>
- 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. *Frontiers in Earth Science*, 10, 794250. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.794250>
- Sefiloglu, F. Ö., Stratmann, C. N., Brits, M., Van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., Vethaak, A. D., Dris, R., Gasperi, J., & Lamoree, M. H. (2024). Comparative microplastic analysis in urban waters using μ -FTIR and Py-GC-MS: A case study in Amsterdam. *Environmental Pollution*, 351, 124088. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124088>

Shi, H., Wang, X., Zhu, L., & Li, D. (2023). Comprehensive Comparison of Various Microplastic Sampling Methods in Sea Water: Implications for Data Compilation. *Water*, 15(6), 1035. <https://doi.org/10.3390/w15061035>

Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>

Stanković, J., Milošević, D., Paunović, M., Jovanović, B., Popović, N., Tomović, J., Atanacković, A., Radulović, K., Lončarević, D., & Raković, M. (2024). Microplastics in the Danube River and Its Main Tributaries—Ingestion by Freshwater Macroinvertebrates. *Water*, 16(7), 962. <https://doi.org/10.3390/w16070962>

Stratmann, C. N., Dris, R., Gasperi, J., Buschman, F. A., Markus, A. A., Guerin, S., Vethaak, A. D., & Tassin, B. (2024). Monitoring microplastics in the Seine River in the Greater Paris area. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1386547. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1386547>

Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., & Shi, H. (2016). Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 216, 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.036>

Sutton, R., Mason, S. A., Stanek, S. K., Willis-Norton, E., Wren, I. F., & Box, C. (2016). Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.077>

Tamminga, M., Stoewer, S.-C., & Fischer, E. K. (2019). On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environmental Pollution*, 254, 112970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112970>

Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, 304(5672), 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>

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*, 92(1), 149–156. <https://doi.org/10.1002/wer.1229>

Valentić, L., Kozel, P., & Pipan, T. (2022). Microplastic pollution in vulnerable karst environments: Case study from the Slovenian classical karst region. *Acta Carsologica*, 51(1), 79–92. <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10597>

VDI 2221: *Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*. (1987). Verein Deutscher Ingenieure.

Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>

Viršek, M. K., Lovšin, M. N., Koren, Š., Kržan, A., & Peterlin, M. (2017). Microplastics as a vector for the transport of the bacterial fish pathogen species *Aeromonas salmonicida*. *Marine Pollution Bulletin*, 125(1–2), 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.024>

Wang, W., Ndungu, A. W., Li, Z., & Wang, J. (2017). Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of The Total Environment*, 575, 1369–1374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.213>

Weston, J. N. J., Carrillo-Barragan, P., Linley, T. D., Reid, W. D. K., & Jamieson, A. J. (2020). New species of Eurythenes from hadal depths of the Mariana Trench, Pacific Ocean (Crustacea: Amphipoda). *Zootaxa*, 4748(1). <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4748.1.9>

Yonkos, L. T., Friedel, E. A., Perez-Reyes, A. C., Ghosal, S., & Arthur, C. D. (2014). Microplastics in Four Estuarine Rivers in the Chesapeake Bay, U.S.A. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14195–14202. <https://doi.org/10.1021/es5036317>

Zhao, S., Zhu, L., & Li, D. (2015). Microplastic in three urban estuaries, China. *Environmental Pollution*, 206, 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.027>

Zhao, S., Zhu, L., Wang, T., & Li, D. (2014). Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 86(1–2), 562–568. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.032>

Priloga I – Navodila za uporabo prototipa za vzorčenje

NAVODILA za uporabo

naprave za vzorčenje mikroplastike v površinskih vodah

IME NAPRAVE µPlastiTrap	Lokacija Laboratorijsko skladišče FVO Trg mladosti 7, 3320 Velenje 2. nadstropje, soba 3	Inventarna številka
Datum posodobitve navodil: 27. 2. 2025		Pripravili: Aljoša Krajnc Anja Bubik Nataša Uranjek

1. NAVODILO ZA DELO

1. Opis naprave
2. Potrebna dodatna oprema
3. Postopek uporabe naprave
4. Vzdrževanje naprave
5. Kontrolni seznam opreme

2. REZERVACIJA OPREME

Predčasna rezervacija ni potrebna

3. VPISOVANJE UPORABE OPREME

Ni potrebno.

4. SHRANJEVANJE IZPISOV

Izpisov ni.

5. ZAŠČITA PRI DELU

Pri delu z napravo upravljam v skladu z navodili proizvajalca črpalke, priporočljiva je uporaba čevljev z zaščitno kapico zaradi teže naprave. Deli črpalke se med dolgoročno uporabo segrejejo. Poseganje po teh predelih med obratovanjem ni dovoljeno.

6. OKVARA

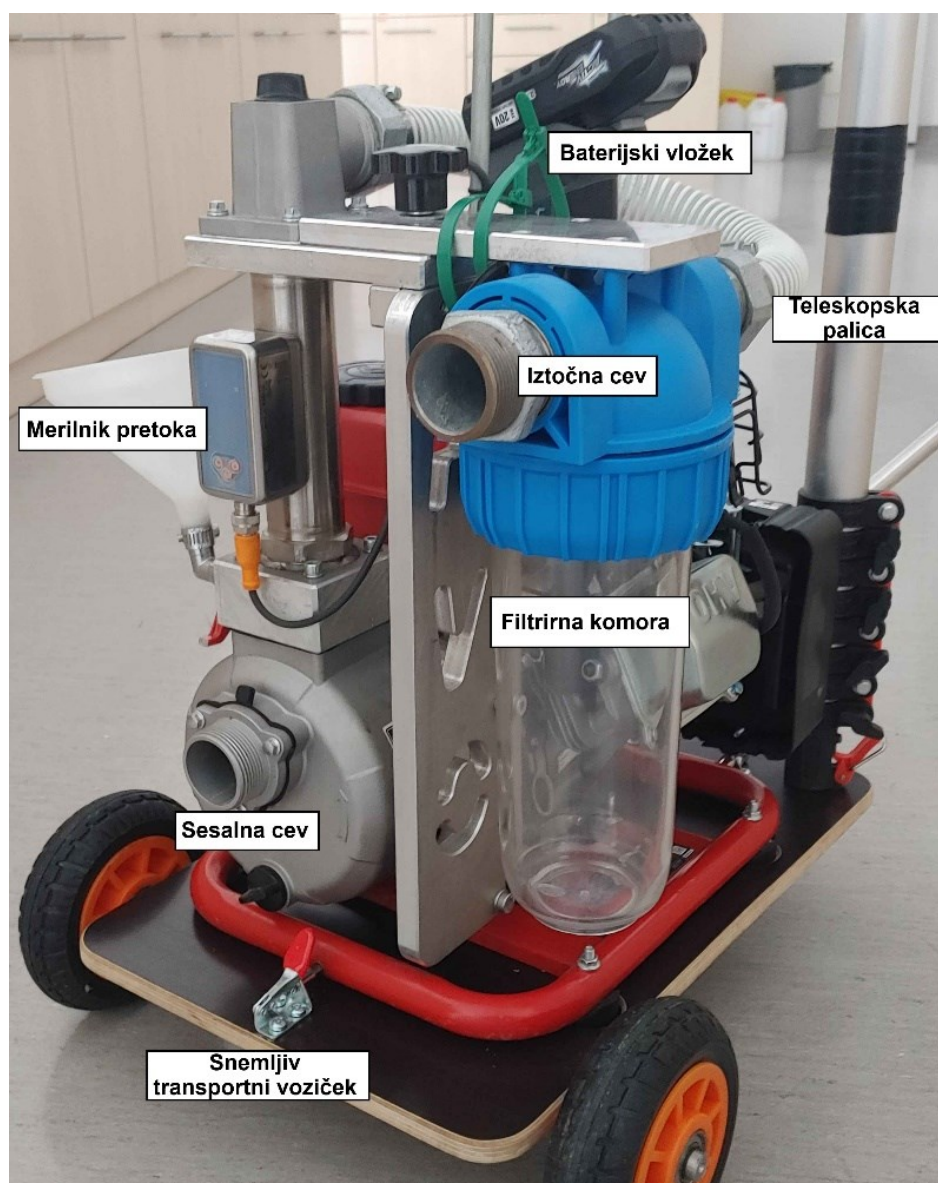
Okvaro naprave je potrebno javiti skrbniku, naprava se v okvarjenem stanju ne uporablja

7. POSTOPKI ČIŠČENJA

Po vsakem dnevu uporabe je napravo potrebno sčistiti. Iz naprave se izlije odvečna voda z ventilom za praznjenje, navoji in tesnila se temeljito obrišejo z vlažno krpo da se odstrani umazanija. Filtrirna komora in filtri se po uporabi sčistijo z vodo in milnico ter razkužijo s 70-% etanolom in pustijo na razstavljeni, da se posušijo.

1. Opis naprave

Vzorčevalnika za mikroplastiko (slika 1) je terenska oprema namenjena za vzorčenje mikroplastike v vodnih telesih. Temelji na principu črpanja in filtracije s pomočjo bencinske črpalke in filtrirne komore z snemljivimi filtri, pretočen volumen vode pa spremlja merilec pretoka. Poleg glavne enote naprave sta še komplementarni cevi; daljša cev za vtok z nastavkom za teleskopsko palico ter krajša iztočna cev z pritrdilnim klinom. Na vzorčevalniku so pritrjeni tudi tesnilni obročki, ki se pred pritrditvijo vstavijo v cev. Naprava je pritrjena na voziček za lažji transport, ki se lahko odstrani z odpenjanjem treh pritrdilnih klinov na vozičku.



Slika 24: Prikaz glavnih komponent vzorčevalnika.

2. Potrebna dodatna oprema

Za pravilno in nemoteno izvajanje vzorčenja je potrebna sledeča dodatna oprema:

- Sesalna in odtočna cev ter komplementarna tesnila
- Zadostno število filtrov
- Napolnjena baterija za merilec pretoka
- Dodatno gorivo za črpalko
- Vedro za vzorec z pokrovom (min. 3 L)

3. Postopek uporabe naprave

Pred terenom:

Pred odhodom na teren je potrebno preveriti ustreznost opreme. Pregled sestavlja vizualni pregled za vidnimi poškodbami naprave, nivojem goriva, preverjanje stanja baterijskega vložka ter zbiranje vseh potrebnih pripomočkov za vzorčenje.

Pred zagonom:

- Črpalko postavite na relativno ravno površino.
- V obe cevi namestite tesnila ter cev za odtok namestite na napravo.
- Pod lijakom odprite ventil za polnjenje komore in v lijak zlijte vodo iz vodnega telesa z vedrom.
- Vodo nalivajte, dokler se komora ne napolni, nato ventil zaprite.
- Vodo nato napolnite v sesalno cev s pomočjo vedra iz strani z navojem. Na sesalno cev po potrebi namestite teleskopsko palico.
- Ko je cev napolnjena, jo previdno navijte na črpalko z glavo sesalne cevi ves čas pod vodo in cevjo napolnjeno z vodo.
- Preverite, da je črpalna komora brez filtra in dobro nameščena na črpalko.
- Vzorčevalnik je pripravljen na zagon. Vključite baterijo merilca pretoka, da se le-ta prižge.

Prvi zagonu:

- Ob hladnem zagonu mora biti ročica črpalke za hladen zagon nastavljena na »choke« (slika 2).
- Črpalko prižgite z potegom na ročko. Ob prvem vžigu je potrebnih več potegov ročice.
- Sesalna glava mora ves čas vzorčenja biti pod vodo!
- Po minuti obratovanja ročko zasučite na »run«.
- Medtem ko vzorčevalnik črpa brez filtra, preverite delovanje merilca pretoka. Ta bi ob nemotenem delovanju moral prikazovati konstantno vrednost med 120 in 150 L/min.
- Vzorčevalnik po 2 minutah izklopite s tem, da ročico postavite v pozicijo »choke«.



Slika 25:Ročica za hladen vžig

Drugi zagon:

- Brez odstranjevanja sesalne cevi iz vode odstranite vzorčevalno komoro.
- Izpraznite komoro in jo sperite z vodo iz vodnega telesa.
- Vstavite filter v črpalko.
- Privijte komoro nazaj na vzorčevalnik.
- Ponastavite števec merilca za pretok (navodila v naslednjem odstavku).
- Ročico za hladen vžig postavite v položaj »run« in prižgite črpalko.
- Črpajte do zadane količine vode, ki jo lahko odčitate na merilcu pretoka.
- Napravo izklopite z premikom ročice v pozicijo »choke«.

Ponastavitev števca za pretok:

- Števec pretoka ima tri gumbе: ● za potrditev ter puščici ↓/↑ za navigacijo med opcijami.
- Ko se števec pretoka prižge, pritisnite ● in z ↓/↑ izberite opcijo »exit functions« ter potrdite z ●.
- Z ↓/↑ izberite opcijo »totaliser« in izbiro potrdite z ●.
- Z ↓/↑ izberite opcijo »Reset totaliser 1« in potrdite izbiro z ●, nato izberite opcijo »reset« in opcijo »yes«.
- Z ↓/↑ izberite opcijo »back« dokler ne pridete na začetni prikaz.
- Na zaslonu mora števec na spodnji strani kazati 0.000 L.

V primeru ne-delovanja merilnika pretoka zaradi izpraznjenja baterijskega vložka ali druge tehnične težave, ki je ni možno rešiti na terenu se lahko izvede filtracija po času. Zaradi povprečnega pretoka 140–150 L/min se črpalka zažene in ob začetku vklopi štoparico ter vzorči 7 minut. Po preteklih 7 minutah se vzorčevalnik izklopi in vzorčenje po normalnem postopku.

4. Vzdrževanje naprave

Vzdrževanje vzorčevalnika se opravlja po vsakem izvedenem terenu. Naprava se čisti se z vodovodno vodo in krpo. Filtrirna komora se odstrani in temeljito očisti, z vlažno krpo se obriše tesnilo in navoj, preveriti je potrebno, da na njih ni peska ali kamenja. V vodi se sperejo tesnila za vtočno in iztočno cev, očistijo se tudi navoji za obe cevi na črpalki. Po potrebi se z vlažno krpo očisti zunanost črpalke, predvsem predel za varnostno kletko, ki se segreva ter pri navoju za natakanje goriva, da se prepreči vnos umazanije v rezervoar.

Vzorčevalnik se mora po potrebi očistiti tudi v primeru, da se dlje časa ni uporabljal ob pregledu delovanja pred terenskim delom.

5. Kontrolni seznam opreme

- ☐ Sesalna cev
- ☐ Iztočna cev
- ☐ Vedra za vzorce
- ☐ Vedra za sediment
- ☐ Dodatno gorivo
- ☐ Filtrne kartuše
- ☐ Terenska lista (voda in sediment) in pisalo
- ☐ Železna lopatka za sediment
- ☐ Štoparica/telefon z štoparico
- ☐ Terenski kovček WTW multi 3620 IDS

Priloga II – Terenski list za vzorčenje mikroplastike



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: : : End: : :

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.)