

**MIKROPLASTIKA IZ  
PNEVMATIK –  
SPREGLEDAN  
ONESNAŽEVALEC  
OKOLJA**

# **MIKROPLASTIKA IZ PNEVMATIK– SPREGLEDAN ONESNAŽEVALEC OKOLJA**

Področje: **EKOLOGIJA Z VARSTVOM OKOLJA**

Vrsta naloge: **RAZISKOVALNA NALOGA**

Raziskovalke: **Nina Kucler, 3.a**

**Tia Pezelj, 3.a**

**Sara Kopač, 3.a**

Mentorici: **Helena Kregar, GJPL**

**mag. Darja Silan, GJPL**

Zunanji mentor: **Dr. Andrej Kržan, Kemijski inštitut  
Ljubljana**

**2021**

**Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana**

---

## Vsebina

1. UVOD .....	8
1.1. Namen .....	8
1.2. Hipoteze.....	8
2. TEORETIČNI UVOD .....	9
2.1. Splošno o polimerih in o gumi .....	9
2.1.1. Polimeri .....	9
2.1.2. Guma .....	11
2.2. Splošno o mikroplastiki.....	13
2.2.1. Definicija mikroplastike .....	13
2.2.2. Poimenovanje mikroplastičnih delcev iz gume .....	14
2.2.3. Informacije o mikroplastiki (svet, EU).....	14
2.2.4. Emisije mikroplastike iz prometa.....	16
2.2.6. Informacije o mikroplastiki v čistilnih napravah (Slovenija) .....	19
2.3. Mikroplastika na cestišču .....	20
2.3.1. Izračun mase mikroplastike v ozračju .....	20
2.4. Vplivi na živa bitja .....	21
2.4.1. Vpliv mikroplastike na vodni ekosistem .....	21
2.4.2. Vpliv mikroplastike na kopenski ekosistem.....	22
2.4.3. Vpliv mikroplastike na človeka .....	23
3. EKSPERIMENTALNI DEL .....	25
3.1. Zbiranje in priprava vzorcev .....	25
3.2. Analitske metode.....	31
3.2.1. Mikroskopiranje vzorcev.....	31
3.2.2. Fizikalno – kemijske preiskave vzorcev.....	32
.....	38
4. REZULTATI Z DISKUSIJO .....	39
5. ZAKLJUČEK IN MOŽNE REŠITVE .....	44
5.1. Zaključek na osnovi rezultatov eksperimentov .....	44
5.2. Možne rešitve .....	45
5.2.1. Biorazgradljiva plastika.....	46
5.2.2. Lovilec mikrodelcev.....	46
5.2.3. Rešitve Evropske unije .....	47
6. VIRI IN LITERATURA.....	49

## Kazalo slik

Slika 1: Nastanek polimerov iz monomerov v procesu polimerizacije .....	9
Slika 2: racionalna in skeletna formula izoprena.....	10
Slika 3: cis prostorska razporeditev izoprena.....	11
Slika 4: ponavljajoča enota kopolimera stiren-butadien (SBR) .....	11
Slika 5:Prerez avtoplašča.....	12
Slika 6: postavitve pnevmatik, Slika 7: pnevmatika Continental Premium 6 .....	18
Slika 8: lestvica posameznih rezultatov testiranja Motorevije .....	20
Slika 9:Lestvica obrabe testiranja Motorevije.....	20
Slika 10: odzemno mesto vzorca 3.....	26
Slika 11: odzemno mesto vzorca 5.....	26
Slika 12: odzemno mesto vzorca 1 .....	27
Slika 13: odzemno mesto vzorca 17.....	27
Slika 14: vzorec 1, Slika 15: vzorec 2 .....	27
Slika 16: vzorec 3, Slika 17: vzorec 4 .....	28
Slika 18: vzorec 5, Slika 19: vzorec 6 .....	28
Slika 20: vzorec 7, Slika 21: vzorec 8 .....	28
Slika 22: vzorec 9, Slika 23: vzorec 10 .....	29
Slika 24: vzorec 11, Slika 25: vzorec 12 .....	29
Slika 26: vzorec 13, Slika 27: vzorec 14 .....	29
Slika 28: vzorec 15, Slika 29: vzorec 16 .....	30
Slika 30: vzorec 17, Slika 31: vzorec 18 .....	30
Slika 32: mikromrežica .....	30
Slika 33: presejani vzorci v vzorčnih stekleničkah .....	31
Slika 34: stereomikroskop, Slika 35: računalnik in program, ki je bil vezan na stereomikroskop.....	32
Slika 36: vzorec 4 (avtomehanik Dolinar), Slika 37: vzorec 4 (avtomehanik Dolinar) .....	33
Slika 38: delec mikroplastike iz pnevmatike, Slika 39: delec mikroplastike iz pnevmatike .....	34
Slika 40: metode ločevanja.....	34
Slika 41: vzorec 4 pod mikroskopom, ločen z vodo, Slika 42: vzorec 4 pod mikroskopom, ločen z vodo in heksanom.....	35
Slika 43: uporaba magneta pri vzorcu 5, Slika 44: delci, ki so se prijeli na magnet .....	36
Slika 45: delci, ki so se prijeli na magnet pod lupo, Slika 46: delci, ki so se prijeli na magnet pod mikroskopom.....	36
Slika 47: vzorec 1 pod mikroskopom, Slika 48: vzorec 11 pod mikroskopom.....	36
Slika 49: vzorec 10 pod mikroskopom, Slika 50: vzorec 14 pod mikroskopom.....	37
Slika 51: vzorec 2 pod mikroskopom.....	37
Slika 52: Vzorec 3 pod mikroskopom.....	37
Slika 53: vzorec 5 pod mikroskopom, Slika 54: vzorec 5 pod mikroskopom.....	37
Slika 55: vzorec 6 pod mikroskopom, Slika 56: vzorec 8 pod mikroskopom.....	38
Slika 57: vzorec 9 pod mikroskopom, Slika 58: vzorec 12 pod mikroskopom.....	38
Slika 59: vzorec 7 pod mikroskopom.....	38
Slika 60: trije različni sistemi za upravljanje izrabljenih gum v EU .....	48

## Kazalo tabel

Tabela 1: sestava potniške in tovarne gume v %.....	13
Tabela 2: Povprečni PLDP za težka tovorna vozila .....	18
Tabela 3: zbiranje vzorcev in odvzemna mesta.....	26
Tabela 4: metoda ločevanja in rezultati.....	34
Tabela 5: pregled poskusa kvantificiranja in magnetnosti mikroplastičnih delcev v 18 vzorcih odvzetih na različnih lokacijah, sredi decembra 2020 .....	41

NASLOV NALOGE: Mikroplastika iz pnevmatik – spregledan onesnaževalec okolja

RAZISKOVALKE: Nina Kucler, 3.A; Tia Pezelj, 3.A; Sara Kopač, 3.A

ŠOLA: Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana

MENTORICI: Helena Kregar – Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, mag. Darja Silan – Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana

ZUNANJI MENTOR: dr. Andrej Kržan – Kemijski inštitut Ljubljana

KLJUČNE BESEDE: mikroplastika na cestišču, pnevmatike, guma, vzorčenje, promet

POVZETEK NALOGE:

V raziskovalni nalogi smo si želeli raziskati mikroplastične delce gume, ki nastajajo v prometu. Po najnovejši literaturi ti predstavljajo največji vir mikroplastike v okolju. V Sloveniji takšni delci še niso bili raziskani in nimamo nobenih ocen te vrste onesnaževanja.

Ob prometnicah in na različnih lokacijah vključno z vulkanizersko delavnico smo zbrali vzorce, ki smo jih obdelali in v njih z mikroskopijo identificirali delce gume. Izvedli smo več poskusov za selektivno izolacijo delcev gume, vendar nismo uspeli izvesti kvantifikacije delcev v vzorcih. V vzorcih smo identificirali delce gume. Največjo koncentracijo delcev smo določili v vzorcu iz avtocestnega tunela, jasno opazna pa je bila korelacija med prometno obremenjenostjo cest in koncentracijo delcev. Višje koncentracije so bile dosežene ob avtocestah in ob križiščih, manjše pa v večji oddaljenosti od cest in ob manj prometnih lokalnih cestah.

Proučili smo tudi dosegljive statistične podatke o cestnem prometu v Sloveniji in jih primerjali s podatki za nekatere druge evropske države. Na osnovi podatkov ocenjujemo, da zaradi cestnega prometa v Sloveniji letno nastane 100 ton delcev gume, ki onesnažujejo naše okolje. Rezultat smo potrdili z oceno izgube mase na primeru avtomobilske gume, ki je bila osupljivih 13 %.

Za bolj podrobno analizo onesnaževanja z delci gume bo potrebno v nadaljevanju razviti analitske metode in metode ločevanja. Ključno neraziskano vprašanje pa je, kakšen vpliv imajo delci gume na okolje in organizme.

ABSTRACT:

The aim of our research was to establish the amount of microplastic rubber particles generated in traffic. According to the latest findings, they present the largest source of microplastics in the environment. In Slovenia, such particles have not yet been studied and we do not have any estimates of this type of pollution.

We collected samples along traffic roads and at various locations, including a vulcanization workshop, we collected samples, processed them, and identified rubber particles in them by microscopy. Several experiments were performed to selectively isolate rubber particles, but we were unable to perform particle quantification in the samples. Rubber particles were identified in the samples. The maximum concentration of particles was determined in a sample from a motorway tunnel, and the correlation between the traffic load of roads in the concentration of particles was clearly noticeable. Higher concentrations were found along motorways and at intersections, and lower at longer distances from roads and along less busy local roads.

We also studied available statistical data on road traffic in Slovenia and some European countries. Based on the data, we estimate that 100 tons of rubber particles polluting our environment will be formed due to road traffic in Slovenia. Our findings were confirmed by an estimate of weight loss in the case of car tyres, which was 13 %.

Analytical and locating methods need to be further developed for a more detailed analysis of rubber particle pollution. A key unexplored question remains how rubber particles affect the environment and organisms.

## 1. UVOD

### 1.1. Namen

Mikroplastika je v zadnjih letih postala zelo zanimiva za raziskovanje, saj postaja vse večji del našega vsakdanjega življenja. Mikroplastične delce lahko najdemo v tleh, vodotokih, v zraku in v organizmih, v skoraj vseh ekosistemih na Zemlji. Vstopa v prehranjevalne verige in se s hrano pojavlja tudi v našem telesu, kar je zaskrbljujoče.

Pri raziskavah onesnaževalcev zraka in vode se raziskovalci vse bolj srečujejo z mikroplastiko, katere prisotnost se v našem okolju povečuje. V najnovejši strokovni literaturi so poročila o velikih emisijah mikroplastike iz prometa, posebej iz abrazije avtomobilskih pnevmatik.

Namen raziskovalne naloge je ugotoviti, koliko mikroplastike iz pnevmatik vozil pride v okolje, kje se zadržuje in kakšen je njen vpliv na okolje. Hkrati nas je zanimala tudi sestava pnevmatik in kje je količina mikroplastičnih delcev največja. Z raziskovalno nalogo poskušamo ugotoviti tudi, kako hitro se obrabljajo pnevmatike vozil in koliko teh delcev se letno izloči v okolje v Sloveniji. Med delom bomo mikroplastične delce pnevmatik poskušali izolirati iz vzorcev, nabranih v okolju, in ugotoviti, kakšen je njihov izgled pod mikroskopom.

### 1.2. Hipoteze

Ob začetku raziskovalne naloge smo si postavili nekaj hipotez:

- Mikroplastiko iz cestišča bomo prepoznali kot majhne črne delce, vidne zgolj z mikroskopom.
- Mikroplastiko najdemo skorajda povsod, največ pa tam, kjer je promet najgostejši.
- Mikroplastike je več ob prometnicah kot v okolici.

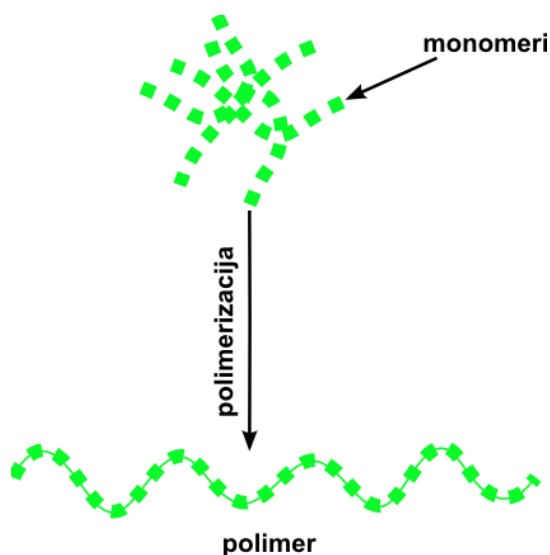


## 2. TEORETIČNI UVOD

### 2.1. Splošno o polimerih in o gumi

#### 2.1.1. Polimeri

Polimeri so snovi, sestavljene iz velikih molekul, ki nastanejo z združevanjem majhnih molekul – monomerov. Reakcijo povezovanja monomerov v polimere imenujemo polimerizacija (slika 1). Molekule polimera so dolge verige, ki jih imenujemo tudi makromolekule. Polimerne verige se razlikujejo po dolžini verige, lahko pa z večjo ali manjšo urejenostjo vključujejo različne monomere. Verige nekaterih polimerov se samo prepletajo in med seboj niso povezane z vezmi, pri drugih pa so verige s kovalentnimi ali vodikovimi vezmi povezane v tridimenzionalne strukture. (Grauner idr., 2019)



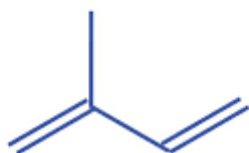
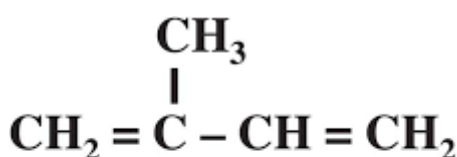
Slika 1: Nastanek polimerov iz monomerov v procesu polimerizacije

Poznamo dve vrsti polimerizacije, in sicer adicijsko in kondenzacijsko. Za nas bo posebej pomembna adicijska polimerizacija, saj je kavčuk, glavna sestavina avtomobilske pnevmatike, adicijski polimer. Pogoji za tovrstno polimerizacijo je, da imajo molekule monomera dvojno vez  $C=C$ , ki se med reakcijo odpre. Polimerizacija monomera je verižna adicija molekul. Pri verižni adiciji se odprejo šibkejši  $\pi$ -vezi in nastanejo nove  $\sigma$ -vezi med C-atomi sosednjih molekul. (Grauner idr., 2019)

Polimeri so v današnjem času nepogrešljivi materiali v vsakdanjem življenju in v industriji. Najbolj znana oblika polimerov je plastika, med polimere pa sodijo tudi tekstilna vlakna, lepila, premazi in seveda guma. Vzrok za široko uporabo polimerov so njihove lastnosti: imajo majhno

gostoto, so zelo trdni in vzdržljivi, so dobri električni in toplotni izolatorji, da se jih enostavno obdelovati, itd. Najbolj pomembno pa je dejstvo, da kemiki lahko načrtujejo njihovo kemijsko sestavo in s tem posledično njihove lastnosti. Polimere, ki so v naravi nepoznani in jih je naredil človek, imenujemo umetni oz. sintetični polimeri. **(Grauner idr., 2019)**

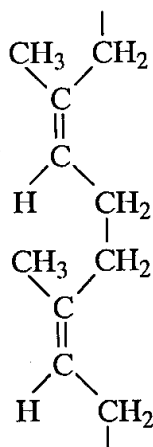
Človek je že dolgo pred odkritjem sintetičnih polimerov uporabljal naravne polimere. To so celuloza, škrob, beljakovine, ki sestavljajo del rastlin in živali. Kavčuk je glavna sestavina avtomobilskih pnevmatik. Sestavljen je iz monomera, ki se imenuje izopren ali 2- metilbuta-1,3 dien (slika 2). **(Grauner idr., 2019)**



Slika 2: racionalna in skeletna formula izoprena

Naravni kavčuk je cis- poliizopren, z empirično formulo  $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$  **(M. Faraday, 1826)**. Pridobivajo ga iz mlečka nekaterih rastlin, ki jih gojijo na plantažah. Iz mlečka dobijo surovi kavčuk oz. lateks, ki je lepljiv, pri nižjih temperaturah pa postane trd. Lateks tako segrevajo z žveplom, pri čemer se polimer delno zamreži in nastane guma. Postopek imenujemo vulkanizacija. **(Grauner idr., 2019)**

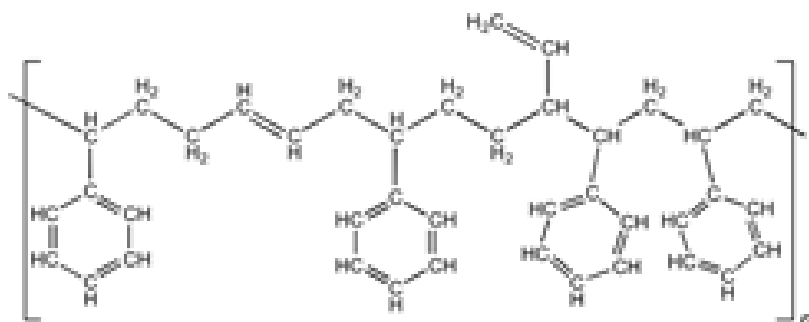
Vulkanizacija poteka z zamreženjem polimernih verig z mostički, ki jih tvorijo atomi žvepla, ki se vežejo na ogljikove atome ob dvojni vezi. To preprečuje, da bi se verige pri raztezanju kavčuka preveč oddaljile, kar mu daje veliko elastičnost. Odkritje je povzročilo veliko povpraševanje po takšnem materialu, zato so ga želeli proizvesti tudi industrijsko, na umeten način.



Slika 3: cis prostorska razporeditev izoprena

Sprva so umetni kavčuk želeli proizvesti iz izoprena, saj je kavčuk polimer izoprena. Skrivnost je v razporeditvi dvojnih vezi, ki imajo vse isto, in sicer cis razporeditev (slika 3). Šele z uporabo Ziegler-Natta katalizatorji so uspešno pripravili poli (cis-)izopren. Danes proizvodnja sintetičnih kavčukov močno presega pridobivanje naravnega kavčuka. (Atkins, 1988)

Po sintezni poti so raziskovalci pripravili sintetične kavčuke, ki vsebujejo tudi druge monomere, ne le izopren. Najbolj razširjen sintetični kavčuk je SBR (slika 4). To je sintetični kavčuk, ki je pridobljen s polimerizacijo stirena in butadiena. Ima podobne lastnosti kot naravni kavčuk, vendar ga odlikuje boljša odpornost pred obrabo. Poznamo pa še mnogo drugih, kot npr. EPDM (etilen-propilen-dienski kavčuk), CR (neopren) itd. (Klander, 2015)



Slika 4: ponavljajoča enota kopolimera stiren-butadien (SBR)

### 2.1.2. Guma

V notranjosti Srednje in Južne Amerike raste orjaško drevo kavčukovec. Njegov mleček ali lateks, bela gosta tekočina, se nabira v posodo in se na širnih plantažah pod vročim soncem

spreminja v surovino gumarske industrije. Vsebuje veliko vode, mineralov, hranilnih in drugih snovi, ki jih je treba izločiti, da dobimo najdragocenejšo sestavino mlečka - kavčuk. Njegova značilnost je elastičnost, hkrati pa ne prepušča vode in zraka, ter je izredno dober električni izolator. Leta 1839 je Charles Goodyear kavčuk zmešal z žveplom, mešanico po nesreči izpostavil vročini in jo nato vrgel skozi okno v sneg. Snov, ki jo je dobil, je ohranjala obliko in elastičnost. Tako je po naključju odkril postopek vulkanizacije. **(Tire story)**

#### Prerez avtoplašča



Slika 5: Prerez avtoplašča

Današnje, sodobne avtomobilске pnevmatike so sestavljene iz zmesi naravne in sintetične gume, polnilnih sredstev, olj, sredstev za vulkanizacijo, ojačevalcev, pomočnikov za predelavo, pospeševalcev, zaviralcev, lepil in aktivatorjev. (Sieber idr., 2020). Potniška in tovorna avtoguma se razlikujeta po svoji sestavi (Novljan, 2008), in sicer:

<b>Material</b>	<b>Potniška avtoguma</b>	<b>Tovorna avtoguma</b>
Naravna guma	14	27
Sintetična guma	27	14
Saje	28	30
Kovina	14-15	20-22
Tekstilna vlakna in ostalo	16-17	7-8
<b>Skupaj</b>	100	100

Tabela 1: sestava potniške in tovorne gume v %

Guma za pnevmatike vsebuje približno 50 % naravnih sintetičnih polimerov. Ti so verjetno prevladujoč vir mikroplastike, ki se med vožnjo sprošča v okolje. Polimerne verige v vulkanizirani gumi povezujejo močne kovalentne vezi. To za gumo pomeni manjšo obrabo. Druge lastnosti gume so tudi, da je za vodo in zrak neprepustna, da je odporna na kisline, ima velik temperaturni razpon uporabnosti in se odlično spaja z drugimi materiali (npr. s kovinami). **(Alves idr., 2020)**

Cinkov oksid (ZnO) je ena od najpomembnejših sestavin gume za pnevmatike. Nahaja se v vrhnji («tekalni») plasti, saj preprečuje obrabo in abrazijo gume in povečuje njeno mehansko odpornost. Pri obrabi se cinkov oksid izloča v okolje skupaj z ostalimi delci gume in zato nekatere metode določanja mikroplastike iz pnevmatik uporabljajo korelacijo vsebnosti Zn za identifikacijo mikroplastičnih delcev. **(Wagner idr., 2018)**

## 2.2. Splošno o mikroplastiki

### 2.2.1. Definicija mikroplastike

Z rafiniranjem ali destilacijo surove nafte v njene sestavine (derivate) pridobivajo spojine (monomere), ki jih lahko preoblikujemo v nove sintetične polimere. Ti imajo najrazličnejše lastnosti, popolnoma drugačne od lastnosti monomerov. Spremenijo se lahko skoraj v vsako obliko. Sprva se je vsem zdelo to neverjetna rešitev na mnogih področjih uporabe. Ob odkritju nihče ni razmišljal o razgradnji teh snovi. Čez sto let, torej danes, pa je ravno razgradnja polimerov, oziroma plastike eden od glavnih problemov, s katerim se soočamo po svetu. **(Unice idr., 2019)**

---

Polimere ali primarno plastiko predelujejo v različne plastične izdelke za vsakodnevno uporabo. To so na primer različne vrste sintetičnih tkanin za oblačila, platenke, igrače, avtomobili itd.. Ko se te stvari znajdejo na smetiščih ali v okolju, se s pomočjo vetra, dežja, morskih valov in UV-sevanja, razgradijo v manjše delce, ki jih po dogovoru imenujemo sekundarna mikroplastika. To so plastični delci, manjši od 5 mm. Ta se zaradi svoje sestave, zgradbe in lastnosti ne more dokončno razgraditi, zato se njena količina na Zemlji eksponentno dviga, kar ima negativen učinek na okolje in na vse organizme v naravi. **(Klößner idr., 2019)**

Od 9.5 milijona ton plastike, ki vsako leto konča v morjih, je mikroplastike že v osnovi med 15 in 31 %. Od tega dve tretjini prideta iz pranja sintetičnih oblačil in obrabe pnevmatik med vožnjo. **(Kovač Viršek, 2017)**

Mikroplastika je zelo raznolika, tako v sestavi, kot v obliki delcev, saj gre za produkte različnih polimernih virov, ki lahko vsebujejo zelo različne kemične aditive.

### 2.2.2. Poimenovanje mikroplastičnih delcev iz gume

Ko vozilo vozi po cesti, trenje med pnevmatikami in cestno površino zagotavlja oprijem, ki je bistven za zadrževanje vozila na cesti. Brez tega trenja bi vozilo zdrsnilo preko vozišča in ogrozilo varnost. Posledica tega trenja je drgnjenje, zaradi česar se delci zdrgnejo tako s pnevmatike kot s površine ceste. Ti se imenujejo "TWP (tire wear particiles)" **(Wagner, idr., 2018)** in se zaradi svoje velikosti in sestave pogosto štejejo za mikroplastiko. **(ETRMA, 2019)**

V strokovnih člankih smo naleteli na različno poimenovanje mikroplastičnih delcev iz pnevmatik:

- TRWP- tire and road wear particle **(Klockner in drugi, 2018)**
- TWP- tire wear particles **(Wagner in drugi, 2018)**
- MR- microrubber **(Halle in drugi, 2020)**
- TBMP- tire and bitumen microplastic particles **(Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater)**

Za opis delcev, ki so manjši od 1 mm je predlagan krovni izraz „mikroguma“ (MR), **(Halle idr., 2020)** zato bomo v nadaljevanju naloge uporabljali to kratico.

### 2.2.3. Informacije o mikroplastiki (svet, EU)

Zadnja leta vse več raziskovalnih ekip išče odgovor na vprašanje o izvoru mikroplastike. Sprva se je večina raziskav osredotočala predvsem na njen vpliv na oceane in posledično morske

organizme. S podrobnejšimi raziskavami so ugotovili, da so eden izmed glavnih virov mikroplastike ravno avtomobilske pnevmatike. Na količino teh delcev na določenih mestih vplivajo različni dejavniki, kot npr. tudi vreme, nevihte.

Študija iz San Francisca je pokazala, da je obraba pnevmatik največji vir mikroplastičnega onesnaženja v vodah pred Kalifornijo. **(E. Ersikine, 2020)**

Leta 2014 so biolog John Weinstein in njegovi podiplomski študentje iskali mikroplastiko. Pri delu v obalnem mestu so pričakovali, da bodo našli vsaj nekaj dokazov o mikroplastiki, ki jo odnese v ocean. Večina tega, kar so zbrali, je prišlo iz pričakovanih, prepoznavnih virov, na primer iz plastičnih vrečk. Toda več kot polovica kosov je bila črnih, cevastih in mikroskopsko majhnih, brez očitnega izvora. Raziskovalci trdijo, da so po obliki spominjale na cigare, saj so bile podolgovate oblike. Weinstein in njegovi učenci so po pristanišču v Charlestonu raziskovali običajne predmete iz črne plastike - na primer ribiške mreže – in iskali podobnosti z najdenimi delci. Preboj se je zgodil, ko so na vodni poti tik ob glavni cesti našli zelo podobno plastiko v obliki cigare. Ugotovili so, da imajo opravka z drobnimi delci avtomobilskih gum. **(Weinstein, 2014)**

Poročilo Tire Stewarda Manitobe iz Kanade iz leta 2013 je pokazalo, da so pnevmatike lahkih tovornih vozil med svojo življenjsko dobo (v povprečju 6,33 leta) izgubile skoraj 2,5 kilograma gume. Študija Kohl je pokazala, da Američani proizvedejo največ odpadkov iz obrabe pnevmatik na prebivalca, in ocenjuje, da na splošno samo v ZDA pnevmatike vsako leto proizvedejo približno 1,8 milijona ton mikroplastike. **(Root, 2019)**

V Evropski uniji vsako leto ustvarimo okoli 26 milijonov ton plastičnih odpadkov. Na žalost jih recikliramo manj kot 30 %. Del odpadne plastike izvozimo iz Evropske unije, jo enostavno le zakopljemo v odlagališča pod zemljo ali pa gre v sežig. **(Novice Evropski parlament, 2018)**

Ugotovljeno je bilo tudi, da čistilne naprave s sekundarnim čiščenjem zadržijo približno 92 % mikroplastike, čistilne naprave s terciarno stopnjo čiščenja do 96 %, čistilne naprave z membransko filtracijo pa več kot 99 % mikroplastike **(Blair s sod., 2019)**. Prva študija, ki je celostno obravnavala mikroplastiko v čistilnih napravah, je bila objavljena leta 2012 na Nizozemskem. Ugotovljeno je bilo, da se kar 90 % mikroplastike odstrani že v samem procesu čiščenja, medtem ko se le 10 % mikroplastike sprosti v okolje **(Leslie idr., 2013)**. Toda kljub ocenam, da naj bi več kot 90 % mikroplastike čistilne naprave zadržale v svojih bazenih in muljih, študije navajajo, da se iz čistilnih naprav sproščajo večje količine mikroplastike v

---

vodotoke. Tako so na Škotskem ocenili, da se iz čistilne naprave sprosti 65 milijonov delcev na dan (**Murphy idr., 2016**), na Švedskem pa 1770 delcev na uro (**Magnusson in Noren, 2014**).

#### 2.2.4. Emisije mikroplastike iz prometa

Delci mikroplastike iz pnevmatik predstavljajo glavnino vseh tovrstnih delcev, ki so jih izmerili v emisijah v okolje. Obraba pnevmatik sicer spada pod emisije brez izpušnih plinov. (**Amato idr., 2020**). Švicarski raziskovalci so z analitskimi metodami ugotovili neverjetne količine teh delcev v naravnem okolju. Našli so jih v zraku, vodi in v zemlji ob cestiščih. Leta 2018 je bilo tako izmerjeno  $1,29 \pm 0,45$  kg MR / prebivalca. S spiranjem cestišč ter čiščenjem teh odpadnih vod v čistilnih napravah so zmanjšali prisotnost mikroplastike iz prometa za 26 %. (**Wagner, 2018**)

Večina (74 %) mase MR se je v obliki depozitov znašla na obcestnih tleh (do 5 m oddaljenosti od ceste) in 22 % jih je zašlo v površinske vode. Dinamično modeliranje je v monitoringu od leta 1990 do 2018 pokazalo povečanje vnosa MR v okolje za približno 10 %. Po letu 2000 smo zaradi ustrezne okoljske zakonodaje uspeli zmanjšati direkten vnos MR v tla. Kljub temu strokovnjaki ocenjujejo, da se je v zadnjih 33 letih v okolju znašlo kar 22 000 ton delcev gume. (**Sieber in drugi, 2020**). Žal tovrstnih meritev za Slovenijo še nismo našli, tako da o dejanskih vrednostih izpusta MR v naše okolje lahko samo sklepamo.

Za izračun oziroma oceno masne koncentracije delcev mikroplastike iz avtomobilskih gum na državni ravni strokovnjaki uporabljajo dva pristopa:

- a) s posebnimi testi izmerijo »emisijski faktor za PM gum na kilometer«, nato ocenijo skupne prevožene kilometre v državi in določijo količino;
- b) preštejejo število gum, ki jih v posamezni državi odvržejo na leto in ocenijo obrabo ene gume ter določijo količino gume, izločene v okolje.

Oba pristopa bomo v nadaljevanju predstavile z lastnim izračunom in rezultate primerjale s podatki iz članka. (**Sieber in drugi, 2020**)

Velikost trdnih delcev (PM - particulate matter) iz avtomobilskih gum se giblje med 10 nm in 100  $\mu$ m, zato je pomembno, da razlikujemo med številčno (particle concentration [ $/m^3$ ]) in masno (mass concentration [ $\mu$ g/ $m^3$ ]) koncentracijo takih delcev.

V članku Kole in drugi, 2017 so opisani podatki za nekatere evropske države, Japonsko, Kitajsko, Indijo, ZDA, Avstralijo in Brazilijo. Slovenijo je najlažje primerjati z Nemčijo, saj je



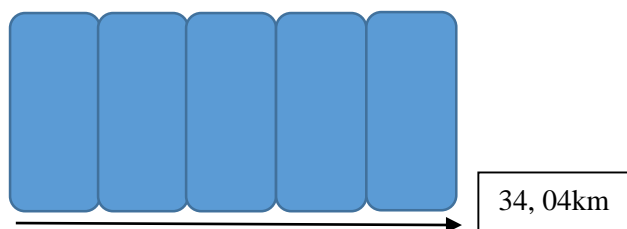
---

število avtomobilov na 1000 prebivalcev podobno. Tako ima Nemčija 561 avtomobilov na 1000 prebivalcev, Slovenija pa 541 avtomobilov na 1000 prebivalcev (**Kole in drugi, 2017**). Verjetno je podobno tudi povprečno število kilometrov, ki jih posameznik na leto naredi v vsaki državi. Direktne primerjave za Slovenijo in Nemčijo ne navajajo, a menimo, da je podobno. (**Kole in drugi, 2017**)

Upoštevati je treba tudi dejstvo, da slaba polovica vseh PM prihaja iz avtomobilov, medtem ko večja polovica odpade na tovornjake. Ker je Slovenija precej tovorno tranzitna država (Luka Koper, povezava z Balkanom), je verjetno to razmerje še bolj na strani tovornjakov v primerjavi z Nemčijo, vendar za to podatka nismo našli. V približku lahko rečemo, da so emisije PM iz avtomobilskih gum na človeka v Nemčiji in Sloveniji podobne oziroma zaradi tovrnega prometa so za Slovenijo lahko še večje.

Po navedbah v strokovni literaturi naj bi zaradi obrabe avtomobilskih pnevmatik vsak človek letno v okolje prispeval več kot 1,1 kg MR, kar v Švici nanese več kot 2200 ton letno. (**Sieber in drugi, 2020**)

Da smo podatek primerjali s Slovenijo, smo še sami stehali obrabljeno in novo pnevmatiko in iz tega naredili izračun. Stehtali smo pnevmatiko Continental Premium 6, velikosti 225 x 40R18. Nova pnevmatika je tehtala 9,2 kg, obrabljena pa 8,0 kg. Razlika med njima je 1,2 kg, kar pomeni maso ene obrabljene pnevmatike v 4-ih letih. Glede na zadnje podatke iz 1. 10. 2020 živi v Sloveniji 2 111 461 prebivalcev (**republika Slovenija statistični urad**) in upoštevajmo, da je v Sloveniji 541 avtomobilov / 1000 prebivalcev (**Kole in drugi, 2017**). Z danimi podatki smo izračunali, koliko tehtajo vsi obrabljeni delci pnevmatik vseh prebivalcev Slovenije po enem letu. Rezultat je 1 398 175 kg. To smo delili z 9,2 kg, kolikor znaša teža ene avtomobilske pnevmatike in tako dobili rezultat, koliko avtomobilskih pnevmatik bi dobili iz teh obrabljenih delcev. Izračun je prišel kar 151 301 pnevmatik. Če upoštevamo še širino avtomobilske pnevmatike (225 mm), izračunamo še razdaljo, ki bi jo zavzele pnevmatike, če bi jih zložili drugo zraven druge tako, da se držijo ob največji površini (slika 6). Dolžina bi bila kar 34 000 m ali 34 km.



Slika 6: postavitev pnevmatik



Slika 7: pnevmatika Continental Premium 6

So pa ogromne razlike med EU in ZDA (4 - 5 kratnik), kar je verjetno posledica večjih avtomobilov v ZDA, več avtomobilov na 1000 ljudi in večjih razdalj v ZDA na eni strani in manjše uporabe potniškega prometa (avtobusi, vlaki, metro) na drugi strani. (Rigler Martin, Aerosol d.o.o., ustni vir)

Ker je v Sloveniji tudi veliko tovrnega prometa, je vredno upoštevati tudi obrabo pnevmatik tovornih vozil. Iz revije *Tranzit* so nam posredovali podatke tovornih vozil v Sloveniji v zadnjih enajstih letih (tabela 2). (**uredništvo revije *Tranzit***)

leto	PLDP za težka tovorna vozila <sup>1</sup>
2009	3 119
2010	3 200
2011	3 298
2012	3 245
2013	3 222
2014	3 257
2015	3 409
2016	3 582
2017	3 733
2018	3 851
2019	3 976

Tabela 2: Povprečni PLDP za težka tovorna vozila

Iz navedenih podatkov smo naredili približni izračun števila tovornjakov, ki letno prevozi Slovenijo, in sicer 1 257 425 tovornjakov (**revija *Tranzit***). Za izračun smo uporabili tudi

<sup>1</sup> Povprečni letni dnevni promet za težka tovorna vozila, katera največja dovoljena masa presega 7,5 t, za celoten avtocestni križ

---

podatek o masi kamionske pnevmatike, ki tehta med 50 in 60 kg – uporabili smo 55 kg (**Dijak, 2021**). Kamionska guma se med 1,5 in 2 letih obrabi za približno 5 kg (**West transport, 2021**). Iz danih podatkov smo izračunali, da se letno vsaka guma obrabi za približno 2,9 kg. S temi podatki smo izračunali približno obrabo pnevmatik tovornih vozil, ki nastane v Sloveniji tekom enega leta, če upoštevamo, da imajo tovornjaki večinoma po 10 pnevmatik. Tako naši približni izračuni kažejo zelo velike vrednosti MR – 100 000 kg, vendar je ta številka verjetno še precej višja.

#### 2.2.6. Informacije o mikroplastiki v čistilnih napravah (Slovenija)

Prvo obsežnejšo raziskavo o prisotnosti mikroplastike so v Sloveniji naredili leta 2016 in 2017 v čistilni napravi Celje. Leta 2017 se je raziskava razširila še na pregled stanja v reki Savinji. Tam so vzorčili vodo pred iztokom in nato po iztoku iz čistilne naprave. Z raziskavo se je izkazalo, da ima ta čistilna naprava v povprečju 89 % zadrževalno sposobnost za mikroplastiko. S pridobljenimi podatki so nato izračunali, da čistilna naprava v reko Savinjo še vedno sprosti 23.000 delcev/h oziroma pol milijona na dan. V čistilni napravi so prevladovala vlakna iz različnih materialov, v vrednosti več kot 94,4 %. Iz tega podatka lahko sklepamo, da k prisotnosti mikroplastike v celjsko čistilno napravo največ prispevajo gospodinjstva s pranjem sintetičnih oblačil. (**Kovač Viršek, 2017**)

Primarni mikroplastični delci so manjši od 5 mm, medtem ko sekundarna mikroplastika nastane z razpadom večjih kosov plastike. K mikroplastiki uvrščamo sintetična vlakna, delce obrabljenih pnevmatik (28 %), plastične delce iz kozmetičnih produktov, delce cestnih oznak in plastične pelete, ki so surovina za izdelavo novih plastičnih izdelkov. V čistilnih napravah se nahaja mikroplastika v blatu čistilne naprave, nekaj pa je odteče v vodotoke. Raziskave so pokazale, da imajo čistilne naprave dokaj visoko zadrževalno zmogljivost za mikroplastiko (>90 %). (**Kovač Viršek, 2017**)

Toda kljub ocenam, da naj bi več kot 90 % mikroplastike čistilne naprave zadržale v mulju, študije navajajo, da se iz teh naknadno sproščajo večje količine mikroplastike v vodotoke (**Murphy et al., 2016; Magnusson in Noren, 2014**), kar so potrdili tudi v Sloveniji. Iz čistilne naprave Domžale - Kamnik se v Kamniško Bistrico sprosti okrog 140 milijonov delcev na dan, iz čistilne naprave Piran v morje okrog 20 milijonov delcev na dan in iz čistilne naprave Koper v Rižano, tik pred izlivom v morje, okrog 36 milijonov delcev mikroplastike na dan. (**Kovač Viršek, 2020**)

## 2.3. Mikroplastika na cestišču

### 2.3.1. Izračun mase mikroplastike v ozračju

Koščki gume iz obrabe pnevmatik na cesti se označujejo s kratico MR. Ti prispevajo k emisijam, ki so bili zaradi obrabe pnevmatik v več popisih ocenjeni kot glavni dejavniki k celotnemu izpustu mikroplastike. Količino delcev pnevmatike, obrabljene med prevoženimi kilometri, definira faktor emisij z enoto mg/km. Odvisen je od lastnosti pnevmatik, tipa vozišča in vozila, delovanja vozila in pogojev delovanja. Globalna proizvodnja gume, ki se uporablja v industriji pnevmatik, se je s 25,1 milijona ton v letu 2011 povečala na 29,1 milijona v letu 2018. **(Parker idr., 2020)**

Točke na površini pnevmatik med vožnjo dosežejo temperaturo, pri kateri začnejo izhlapevati hlapni deli pnevmatik, ki se kondenzirajo in tvorijo mikroplastiko. Če v bližini ni kanalizacije, mikroplastika lahko v večjih količinah neposredno vstopi v vodno okolje in prst. 74 % teh delcev se odloži na tleh ob cesti, 22 % v površinskih vodah, 4 % na tla. **(Klößner idr., 2019)**

Obraba pnevmatik je odvisna od sestave in tipa pnevmatik in je precej različna glede na izdelovalca pnevmatik. Pri Motoreviji to redno testirajo na njihovih testih pnevmatik. Na zadnjem testu zimskih pnevmatik za osebne avtomobile jeseni 2020 so pnevmatikam z dimenzijo 205/55 R16 ugotovili, da z najboljšo pnevmatiko lahko prevozimo 42.705 km, z najslabšo pa 29.565 km. Takšen razpon pri meritvah obrabe so označili kot običajen. Pri tovornjakih so pnevmatike zasnovane za še več prevoženih kilometrov. **(Poženel, 2021)**. V spodnji tabeli (slika 8,9) so razvidne meritve iz njihovega zadnjega testa:

Winter tire Test 2020 205/55 R16																		
	Michelin Alpin 6	Goodyear Winter	Pirelli Winter	Fahnestock Winter	King Mileage Test	WTEB	Bridgestone	Blizzak LM001	Yokoohama S.M.A.	Dunlop Sport 5	Sava Sava RFP2	Goodyear Ultraflex	Serpent Grip 3	Continental Winter Contact	Kumho Wintercraft WP51	Mazda Premia Snow WP	Tristar Winter WP	Hankook Winter R12
Wear	1,5	2,0	2,5	2,0	1,0	2,5	2,5	1,0	1,5	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5	0,0	2,5	1,5	2,0
run achiev	117	94	84	100	124	81	87	109	108	91	87	93	0	88	85	108		
run achiev	42.705	34.310	30.660	36.500	45.260	29.565	31.755	39.785	39.420	33.215	31.755	33.945	0	32.120	31.025	38.690		

Slika 8: lestvica posameznih rezultatov testiranja Motorevije

Wear	verschleiss	Note	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
s/s(bas) [%]			34	49	64	79	94	109	124	139

Slika 9: Lestvica obrabe testiranja Motorevije

Delci pridejo iz cestišča zaradi čiščenja cest, površinskega odtoka in pridejo v atmosfero skupaj z vodnimi hlapci. **(Wagner idr., 2018)**

## 2.4. Vplivi na živa bitja

Mikroplastične delce so zasledili že povsod, med drugim tudi v zraku. Ti delci z vetrom prepotujejo velike razdalje in s padavinami padejo na tla. Posledično so našli mikroplastiko tudi na vrhovih Alp in celo na Arktiki. Znanstveniki potovanje mikroplastike primerjajo s sahariskim peskom, za katerega vemo, da prepotuje ogromne razdalje.

### 2.4.1. Vpliv mikroplastike na vodni ekosistem

Ko plastična vrečka po različnih poteh pride v ocean, se makroplastika s pomočjo UV-sevanja iz sonca in mehanskega delovanja morja razgradi v mikroplastiko. Mikroorganizmi vsako podlago izkoristijo za poselitev. Tako na površini plastike nastane biofilm, ki povzroči, da se delci plastike posedajo v sedimente na morskem dnu. V vodi se na mikroplastiko vežejo kemikalije, ki so raztopljene v vodi, hkrati pa se iz plastike v vodo sproščajo dodatki, ki so plastiki primešani. Delce mikroplastike pogosto zaužijejo razni morski organizmi, ki preko prehranjevalne verige omogočajo prehajanje vplivov tudi na kopenski ekosistem in nazadnje na človeka. Majhne delce pa lahko absorbirajo tudi vodne rastline, ki predstavljajo primarni del prehranske verige v vodnem ekosistemu. **(Kovač Viršek, Lovšin, 2017)**

Mikroplastika lahko v vodni ekosistem vstopi tudi s prenosom mikroplastike iz cestišč preko tal v podtalnico ali pa se s padavinami spira iz zraka.

Raziskave zadnjih let preučujejo tudi vpliv mikroplastike na rastline. Za raziskave so uporabili malo vodno lečo (*Lemna minor*). Rastlino so za sedem dni izpostavili petim različnim tipom mikroplastike, ki jih najpogosteje uporabljamo v vsakodnevnom življenju (mikroplastika iz kozmetike, sintetična vlakna, plastična vrečka ...). Opazili so, da majhna koncentracija mikroplastike povzroča zmanjšanje dolžine korenin, medtem ko je bilo pri večji koncentraciji opazno zaviranje relativne rasti rastline, kar ji onemogoča tvorjenje funkcionalnih lastnosti listov. Ugotovitve so pokazale, da se mikroplastika močno absorbira v rastline. Vzrok za to so elektrostatične sile in morfologija listov, kar potrjuje tudi raziskava prisotnosti mikroplastike v morju, kjer so ugotovili, da je 75 % pregledanih listov morske trave (*Thalassia testudinum*) vsebovalo vsaj en košček mikroplastike. **(Špringer, 2020)**

Mikroplastika ima močan vpliv tudi na morske živali. Nevarnost predstavljata tako plavajoča mikroplastika kot tudi tista, ki se nahaja v sedimentih morskega dna. V kolikor pridejo majhni delci s hrano vanje, lahko povzroči fizično blokado ali poškodbo prebavnega trakta, lahko pa tudi zastrupitev, bodisi zaradi sproščanja kemijskih komponent plastike v organizme, bodisi

---

zaradi zaužitja ter akumulacije že v vodi absorbiranih kemikalij **(Kovač Viršek, Palatinus, 2014)**.

Tudi v slovenskem morju so bili najdeni koščki mikroplastike. Našli so jo v že kar 6 vrstah rib: zlati cipelj (*Liza aurata*), orada (*Sparus aurata*), morski list (*Solea solea*), brancin (*Dicentrarchus labrax*), oslič (*Merluccius merluccius*) in sardele (*Sardina pilchardus*) ter v školjkah klapavicah (*Mytilus galloprovincialis*), tako gojenih kot divjih. Po svetu pa poznamo že 700 vrst morskih organizmov z identificirano mikroplastiko, ki so jo vase prejeli z zaužitjem. Ker imajo ribe velik pomen v prehrani človeka in ker nekatere študije že kažejo na negativne vplive, celo nevrotoksične učinke mikroplastike na ribe, bo v prihodnosti izrednega pomena spremljanje mikroplastike v organizmih z usklajeno metodologijo. Zelo pomembno je bilo odkritje treh bakterijskih vrst iz rodu *Aeromonas*. To so patogene bakterije, ki pri ribah povzročajo bolezen furunkulozo. Te bakterije se največkrat prenašajo s plastiko, ki jo ribe večkrat zamenjajo za hrano. **(Kovač Viršek, Lovšin, 2017)**

#### 2.4.2. Vpliv mikroplastike na kopenski ekosistem

Ker je mikroplastika zelo majhna, jo lahko zaužijejo najrazličnejše živali – vse od najmanjših glist (nematode) in školjk pa tudi do velikih sesalcev. Ker se mikroplastika pojavlja že na samem začetku prehranjevalne verige, pri rastlinah, posledično lahko sklepamo, da se pojavlja tudi na samem vrhu prehranske verige. Morski organizmi sestavljajo prehrano na kopnem (npr. ptičem, ki pa predstavljajo prehrano drugim plenilcem). **(Kovač Viršek, Palatinus, 2014)**

Vpliv mikroplastike na živa bitja sicer ni še povsem znan, toda plastika vsebuje dodatke, kot so stabilizatorji in zaviralci gorenja, ki lahko škodujejo ljudem in živalim. Na mikroplastiko pa se vežejo tudi mikroorganizmi, katere so znanstveniki poimenovali »plastisfera«, ki na plastiki tvorijo biofilme. Nanje se vežejo tudi organski onesnaževalci, ki so v vodi slabo topni. Ko morska žival zaužije take mikroplastike s plastisfero, kemikalije in mikroorganizmi vstopijo v prehranjevalno verigo. Vplivi na kopenska živa bitja so podobna kot pri morskih organizmih. Tako lahko pri živih bitjih pride do fizične blokade v prebavilih, poškodbe celic, oksidativnega stresa, vnetja tkiv, poškodbe prebavnega trakta ali celo do zastrupitve (sproščanje kemijskih komponent plastike) **(Kovač Viršek, Palatinus, 2014)**.

Tako kot deževniki so tudi kopenski raki pomembni člani pri razgradnji rastlinskih odpadkov. Pri raziskavah so kopenske rake enakonožce za 14 dni izpostavili polietilenski mikroplastiki iz plastične vrečke in opazovali njen vpliv. Na te rake, za razliko od deževnikov, mikroplastika ni

vplivala niti na telesno maso živali niti na stopnjo prehranjevanja. Sicer so uporabljali majhne koncentracije mikroplastike, a se je z zviševanjem koncentracije prehranska aktivnost zmanjšala. **(Dolar, 2018)**

### 2.4.3. Vpliv mikroplastike na človeka

Mikroplastika lahko v človeka vstopi z vdihavanjem, zaužitjem ali preko kože oziroma sluznic. Zaradi sodobnega načina življenja bo problem onesnaženosti okolja z mikroplastiko predstavljal vedno večjo oviro za ohranjanje zdravega širšega in ožjega življenjskega prostora in s tem tudi našega zdravja. **(NIJZ, 2018)**

Raziskav, ki bi se ukvarjale z vplivom mikroplastike iz pnevmatik na zdravje ljudi, je zelo malo. Mikroplastiko so našli na primer med kristali kuhinjske soli, ki jo vsakodnevno uporabljamo. Tedensko lahko vsak posameznik zaužije za eno kreditno kartico, torej 5 gramov mikroplastike. Poleg školjk, ki so filtratorji in s tem prejemniki velike količine delcev mikroplastike, le ti vstopajo v človeka vse bolj tudi preko pitne vode. V novejših raziskavah so sicer ugotovili, da mikroplastika v vodi ne predstavlja velike težave, saj so to preveliki delci (150  $\mu\text{m}$ ), da bi se absorbirali skozi steno črevesja in dosegli druga tkiva, zato se iz telesa uspešno izločijo. **(film: Utopljanje v plastiki)**

Mikroplastični delci vplivajo na človeško telo na tri načine, in sicer: fizično, kemijsko in mikrobiološko. O tem vemo zaenkrat še presenetljivo malo. Z raziskavami ugotavljajo, da se delci večji od 150  $\mu\text{m}$ , težko absorbirajo v človeško tkivo. Predvidevajo, da je v našem telesu lahko bistveno več nanoplastike (1-1000 nm), ki je bistveno manjša od mikroplastike. Ker se mikroplastika nezadržno koncentrira v hrani, ki jo dnevno uživamo, je zelo pomembno spremljanje mikrobioloških analiz rib in školjk, med drugim tudi tistih iz Jadranskega morja. **(Kovač Viršek, 2019)**

V plastisferi so našli tudi nekatere za človeka patogene mikroorganizme. Tak primer je sev bakterije *Vibrio*. Raziskovalci se še posebej osredotočajo na analizo mikrobnega sveta v pitni vodi.

Izpostavljenost emisijam MR je povezana s številnimi kratkoročnimi in dolgoročnimi škodljivimi vplivi na zdravje, vključno s povečanim tveganjem za srčno-žilne, dihalne in razvojne razmere ter povečanim tveganjem za splošno smrtnost. V znanstveni literaturi obstaja soglasje, da so v emisijah iz prometa poleg izpušnih plinov vedno bolj pomembni trdni delci, ki imajo zaradi akumulacije in počasnejše razgradljivosti lahko vedno večji vpliv tudi na

zdravje ljudi. Velik del svetovnega prebivalstva je izpostavljen nivojem drobnih delcev, ki presegajo mejne vrednosti, določene za varovanje zdravja ljudi. **(Amato idr., 2020)**

Mikroplastika, sodeč po raziskavah, vpliva na nekatere organe v našem telesu in povzroča večjo možnost obolenj in določenih boleznih. Raziskave so pokazale, da mikroplastika:

- vpliva na hormone (zgodnja puberteta, neplodnost, splavi, oslabljen razvoj reproduktivni organi),
- vpliva na živčevje,
- povzroča rakava obolenja (rak na prsni, rak na prostati),
- povzroča alergije,
- povzroča različne slabosti, bruhanje, drisko.

Zaradi različnih virov mikroplastike, ki smo jim izpostavljeni (voda, zrak, hrana) so tudi vplivi na človeka lahko različni. Dejstvo je, da smo mikroplastiki izpostavljeni na vse možne načine. Ker vpliva še ne poznamo dobro, pa je pomembno sprejemati ukrepe in iskati rešitve za zmanjšanje vnosa mikroplastike v okolje. **(Klößner, 2019)**



### 3. EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1. Zbiranje in priprava vzorcev

Ob pregledu najnovejše strokovne literature smo se srečali z navedbami različnih metod za ugotavljanje mikroplastičnih delcev. Cestni prah so na primer vzorčili na cestišču z mokrim vzorčevalnikom prahu pred in po dvakratnem pometanju ceste. Vzorce so nato zbirali več mesecev in nato koncentracije MR določili z ločevanjem na osnovi gostote, čemur je sledila analiza s stereo mikroskopijo. (dr. Kržan, 2020)

Mi smo se raziskave lotili po drugačni poti. Vzorce smo zbirali v okolju, kjer živimo: Borovnica, Ljubljana (Gimnazija Jožeta Plečnika), Kozarje in Polhov Gradec. Zbirali smo jih iz različno prometnih cest, saj nas je zanimala razlika v količini mikroplastike. Imeli smo tudi pet mokrih vzorcev, torej snega in deževnice. Nekaj vzorcev je bilo zbranih iz roba ceste – umazan sneg, nekaj pa je čistega snega in deževnice, ki sta padala v kozarec.

<i>vzorec</i>	<b>Mesto odvzema</b>	<b>datum</b>	<b>Odvzemno mesto</b>	<b>Vrsta vzorca</b>
1	Pot čez Gmajno	28. 11. 2020	neprometna cesta	pesek
2	križišče Cesta na Ključ in cesta Dolomitskega odreda	28. 11. 2020	prometna cesta	pesek
3	Cesta Dolomitskega odreda nad avtocesto (nadvoz)	28. 11. 2020	prometna cesta nad avtocesto	pesek
4	Avtomehanik Dolinar	13. 11. 2020	avtomehanična delavnica	delci avtomobilskih gum
5	predor Jasovnik na avtocesti	27. 11. 2020	prometna cesta v predoru	pesek
6	balkon - Ljubljana	3. 12. 2020	balkon	sneg
7	Cesta Dolomitsekga odreda	4. 12. 2020	prometna cesta	umazan sneg iz ceste
8	balkon - Borovnica	3. 12. 2020	balkon	sneg
9	Ljubljanska cesta	3. 12. 2020	manj prometna cesta	umazan sneg iz ceste

10	Dolenja vas	16. 11. 2020	manj prometna cesta	pesek
11	Borovnica	28. 11. 2020	neprometna cesta	pesek
12	križišče Dolenja vas in Polhograjska cesta	4. 12. 2020	manj prometna cesta	umazan sneg iz ceste
13	Ljubljanska cesta	28. 11. 2020	manj prometna cesta	pesek
14	Prošca – Polhov Gradec	7. 1. 2020	manj prometna cesta	pesek
15	Terasa Gimnazije Jožeta Plečnika nad križiščem Šubičeve in Dunajske ceste	december	terasa nad prometno cesto	pesek
16	Zahodni del terase Gimnazije Jožeta Plečnika	december	terasa nad prometno cesto	pesek
17	Sredina terase Gimnazije Jožeta Plečnika	december	terasa	pesek
18	terasa Gimnazije Jožeta Plečnika nad križiščem Šubičeve in Dunajske ceste	december	terasa nad prometno cesto	deževnica

Tabela 3: zbiranje vzorcev in odvzemna mesta



Slika 10: odvzemno mesto vzorca 3



Slika 11: odvzemno mesto vzorca 5



Slika 12: odzemno mesto vzorca 1



Slika 13: odzemno mesto vzorca 17

Primerjalni, referenčni vzorec za določanje mikroplastičnih delcev iz pnevmatik je bil vzorec 4, zbran v avtomehanični delavnici Dolinar (Kozarje, okolica Ljubljane). Ker smo želeli dobiti veliko mikroplastičnih delcev iz pnevmatik, smo vzorec odvzeli iz naprave, s pomočjo katere menjavajo avtomobilске pnevmatike. Vzorec je bil odvzet 13. 11. 2020, kar je še posebej ugodno, saj je bil zadnji rok za menjavo avtomobilskih pnevmatik (iz poletne v zimske gume) 15. 11. 2020.

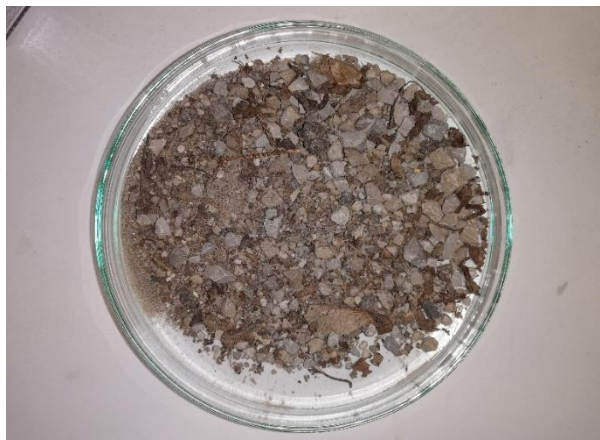
Vzorci smo pregledovali na Kemijskem Inštitutu. Najprej smo mokre vzorce prefiltrirali s pomočjo vakuumu in filtrirnega papirja. Filtrirni papir smo nato skupaj z oborino, ki se je nabrala na njem, osušili. Nato smo vse vzorce tudi fotografirali (slike 14 – 31).



Slika 14: vzorec 1



Slika 15: vzorec 2



*Slika 16: vzorec 3*



*Slika 17: vzorec 4*



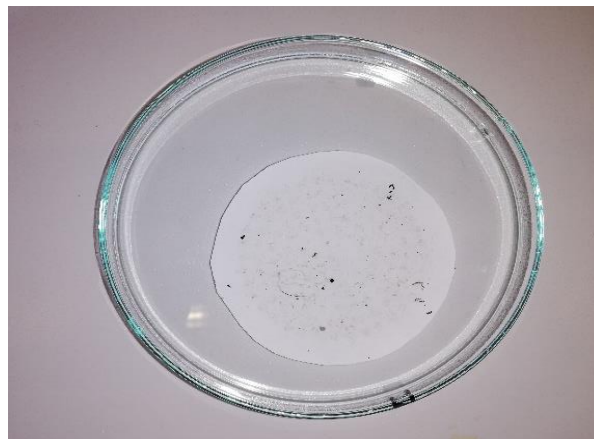
*Slika 18: vzorec 5*



*Slika 19: vzorec 6*



*Slika 20: vzorec 7*



*Slika 21: vzorec 8*



Slika 22: vzorec 9



Slika 23: vzorec 10



Slika 24: vzorec 11



Slika 25: vzorec 12



Slika 26: vzorec 13



Slika 27: vzorec 14



*Slika 28: vzorec 15*



*Slika 29: vzorec 16*

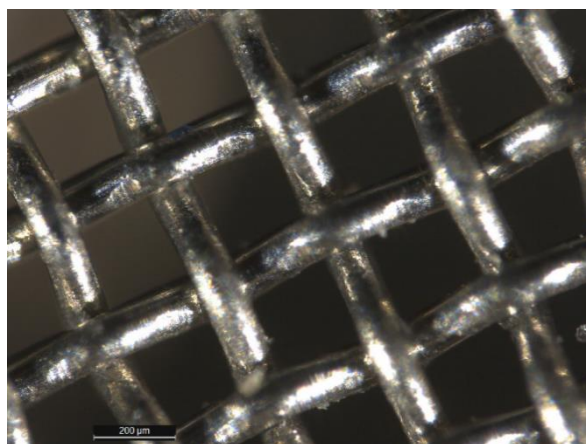


*Slika 30: vzorec 17*



*Slika 31: vzorec 18*

Z metodo sejanja smo iz vzorcev izločili večje delce. Pomagali smo si z mikromrežico iz nerjavečega jekla z odprtinami 200 x 200  $\mu\text{m}$  (slika 32).



*Slika 32: mikromrežica*

Prah različnih vzorcev smo nato spravili v vzorčne stekleničke (slika 33) in jih kasneje pregledali pod mikroskopom.



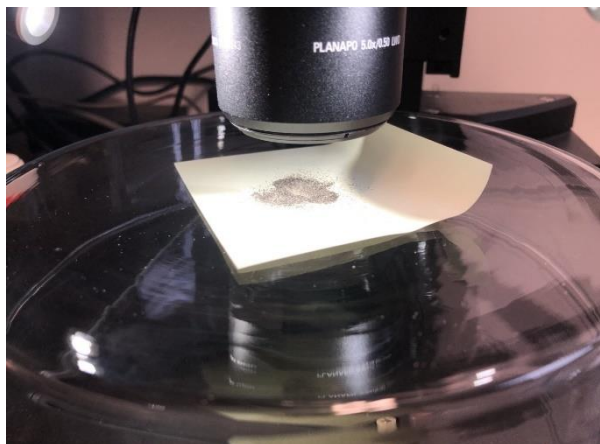
*Slika 33: presejani vzorci v vzorčnih stekleničkah*

Mokre vzorce smo najprej filtrirali s pomočjo vakuuma in filtrirnega papirja. Oborino, ki je ostala na filtrirnem papirju, smo pokrito sušili v laboratorijskem sušilniku pri  $T = 110\text{ °C}$ . Suhe vzorce smo presejali skozi mikromrežico in jih prav tako pogledali pod mikroskopom (slika 34).

## 3.2. Analitske metode

### 3.2.1. Mikroskopiranje vzorcev

Za podrobnejši pregled vzorcev smo uporabili digitalni stereo mikroskop Leica DMS1000 opremljen s kodiranimi lečami in pomično mizico (slika 34). Mikroskopske posnetke velikosti delcev smo obdelali s programsko opremo Leica Application Suite. S pomočjo mikroskopa smo lahko opazovali podrobnosti v velikostnem razredu nekaj mikrometrov, vendar je pri visokih povečavah težko doseči dobro globinsko ostrino.



Slika 34: stereomikroskop



Slika 35: računalnik in program, ki je bil vezan na stereomikroskop

Podroben pregled literature o delcih gume iz pnevmatik MR je pokazal, da je identifikacija teh delcev težavna. Infra rdeča spektroskopija (IR), ki je najbolj pogosto uporabljena metoda za identifikacijo delcev mikroplastike, v tem primeru ni bila uporabna zaradi velike prisotnosti saj. Rezultat je spekter slabe kvalitete, v katerem so zabrisane podrobnosti.

Za identifikacijo delcev gume iz pnevmatik so raziskovalci zato uporabili drugačne pristope. Eden najbolj neposrednih je bila določitev prisotnosti cinka. Takšno analizo je mogoče opraviti z elektronsko mikroskopijo, ki sočasno omogoča elementno analizo. Ker je prisotnost cinka specifična za gumo, je na takšen način mogoče pozitivno potrditi delce gume. Slaba stran je, da je takšen eksperiment zahteven glede časa in opreme in ne more služiti za rutinsko analizo in kvantifikacijo. (Klöckner in drugi, 2019)

### 3.2.2. Fizikalno – kemijske preiskave vzorcev

#### 1. METODE LOČEVANJA

Iz literature je znanih več različnih metod ločevanja delcev. Cestni prah so na primer vzorčili na cestišču z mokro vzorčevalno napravo za prah pred in po dvakratnem pometanju ceste. Vzorce so nato zbirali več mesecev in nato koncentracije MR določili z uporabo ločevanja gostote, čemur je sledila analiza s stereo mikroskopijo. (Halle in drugi, 2020)

Pri raziskovalni nalogi smo uporabili različne metode, ki smo jih zasledili v strokovni literaturi:

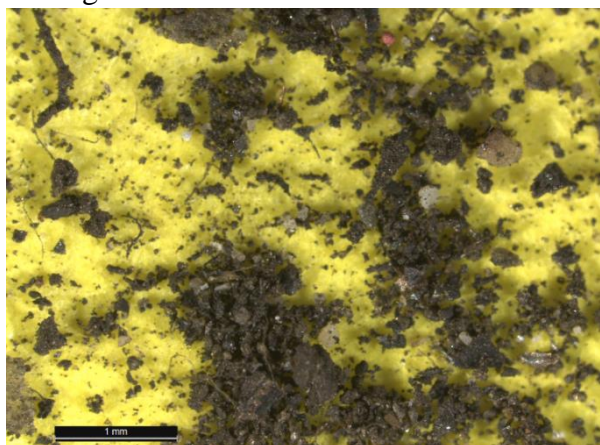
- filtriranje snega in deževnice – s tem smo ločili čisto vodo od oborine, ki se je pri filtriranju nabrala na filtrirnem papirju,



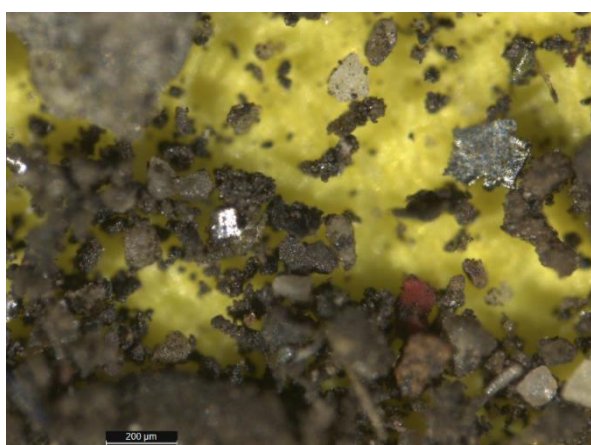
- sušenje mokrih vzorcev – oborino, ki smo jo dobili po filtraciji, smo sušili in s tem dobili suh vzorec, potreben za kasnejšo obdelavo,
- sejanje – s tem smo pri suhih vzorcih ločili večje delce in kamenčke, ki nas niso zanimali pri mikroskopiranju,
- ločevanje s heksanom, z detergentom, z destilirano vodo in z nasičeno vodno raztopino NaI – s tem smo poskusili ločiti delce mikroplastike od ostalega vzorca,
- ločevanje z magnetom – s to metodo smo prišli do ugotovitve, da se pri nekaterih delcih pojavi magnetnost.

## 2. DRUGE METODE IN MIKROSKOPIRANJE

Vzorec, vzet iz avtomehanične delavnice (slika 36, 37), nam je služil kot referenca, pri kateri smo zaradi velike koncentracije mikroplastičnih delcev zlahka identificirali mikroplastične delce gume.

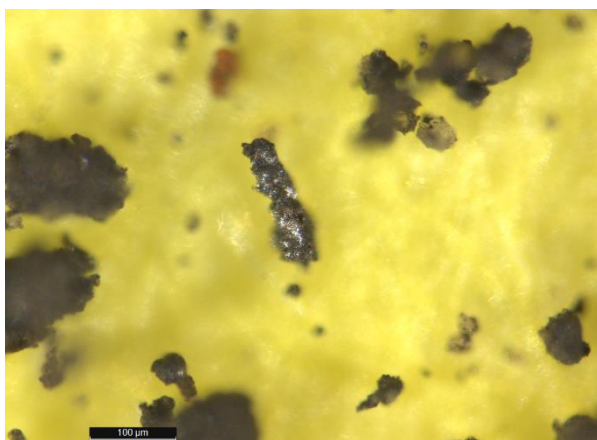


Slika 36: vzorec 4 (avtomehanik Dolinar)



Slika 37: vzorec 4 (avtomehanik Dolinar)

Preko tega vzorca smo določili izgled delcev mikroplastike iz pnevmatik. Z mikroskopskim pregledom smo ugotovili, da so delci gume vedno temno obarvani, povečini velikosti med 100 in 200 µm in imajo nehomogeno površino. V vseh primerih so bili gumi primešani svetlejši delci, za katere sklepamo, da so manjša zrnca peska. Takšna aglomerirana oblika je v skladu z opisi v literaturi. Domneva je, da se zmehčana guma pod vplivom mehanskih sil poveže z zrni peska na cestišču. Naše ugotovitve lahko potrdimo tudi z virom (**Klößner, 2020**), kjer je navedeno, da delci niso čista guma (aglomerat gume). Izgledali naj bi tako:

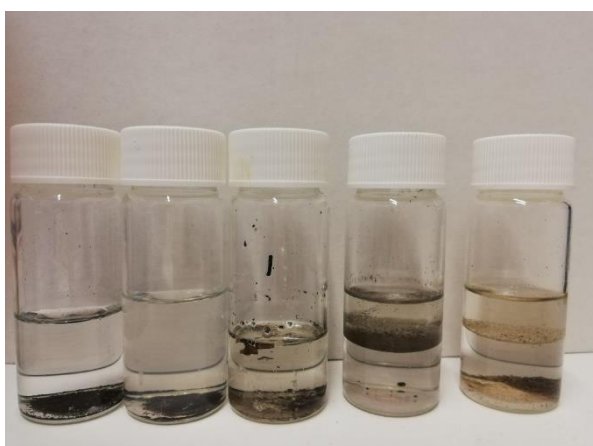


Slika 38: delec mikroplastike iz pnevmatike



Slika 39: delec mikroplastike iz pnevmatike

Zaradi težavne analize smo izvedli nekaj poskusov, s katerimi smo želeli delce gume izločiti iz vzorcev, kar bi nam omogočalo kvantifikacijo oziroma določitev količine mikroplastičnih delcev v vzorcih. Poskusi so temeljili na ločitvi na osnovi gostote delcev ali na osnovi površinskih lastnosti v polarnih in nepolarnih topilih. V pet vzorčnih stekleničk (slika 40) smo dali različne snovi, za katere smo sklepali, da bodo vsaj nekoliko ločile vzorec (tabela 4).

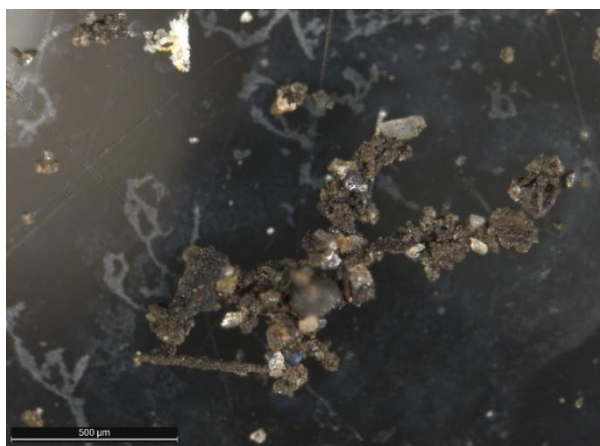


Slika 40: metode ločevanja

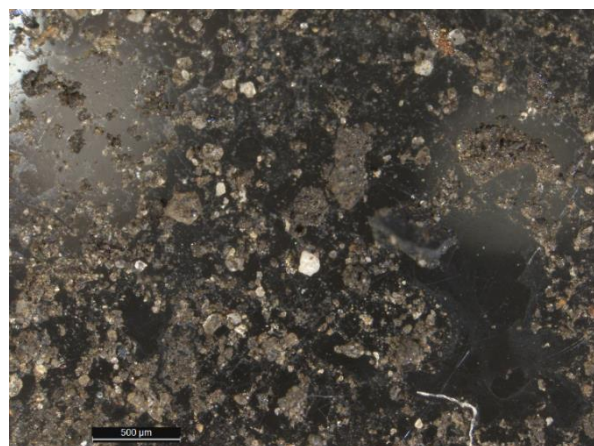
metoda ločevanja	rezultat
destilirana voda	neuspešno
detergent in voda	neuspešno
Vodna raztopina NaI (aq)	neuspešno
heksan, voda in nepresejen vzorec	delno uspešno
heksan, voda in presajen vzorec	delno uspešno

Tabela 4: metoda ločevanja in rezultati

V prvo vzorčno stekleničko smo dali samo destilirano vodo in **vzorec 4**. Kot je opazno, ločitev žal ni uspela. V drugo vzorčno stekleničko smo dali detergent, a tudi ta metoda ni bila učinkovita. Tretja metoda, z vodno raztopino NaI je dala enak rezultat kot prejšnje, zato smo se odločili uporabiti heksan ( $C_6H_{14}$ ) in vodo. V četrto vzorčno stekleničko smo dali originalen vzorec, v peto pa že presejan vzorec. Tukaj je že po izgledu kazalo drugače, saj je del vzorca ostal na dnu, del pa se je dvignil v vmesni sloj med vodo in heksanom. Del smo s kapalko odvzeli iz zmesi in ga posušili. Suha vzorca smo nato pogledali pod mikroskopom (slika 41, 42).



Slika 41: vzorec 4 pod mikroskopom, ločen z vodo



Slika 42: vzorec 4 pod mikroskopom, ločen z vodo in heksanom

Izvedeni poskusi, da bi izvedli ločitev delcev gume, niso dosegli cilja, zato nismo mogli izvesti kvantifikacije prisotnosti delcev gume. Enostavna ločitev in identifikacija tovrstnih delcev je zaenkrat še nerešen raziskovalni izziv, ki bo zahteval nadaljnje delo.

Med raziskovanjem vzorcev smo ugotovili, da skoraj vsi vsebujejo delce, ki jih privlači magnet. S pomočjo magnetja smo skozi stekleno steno vzorčnih stekleničk iz vzorcev pritegnili kovinske delce (slika 43, 44). Količino smo lahko ocenili s pogledom skozi povečevalno steklo. Količina je bila največja v vzorcu iz vulkanizerske delavnice in najmanjša v vzorcih, odvzetih z manj prometnih cest. Domnevamo, da gre za kovinske delce, ki nastajajo ob uporabi zavor, ko zavorne obloge drsijo po kovinskih zavornih diskah. Ker so ti delci temne (črne) barve, je pomembno, da se jih ob kvantifikaciji ne prišteva k delcem gume.



Slika 43: uporaba magneta pri vzorcu 5

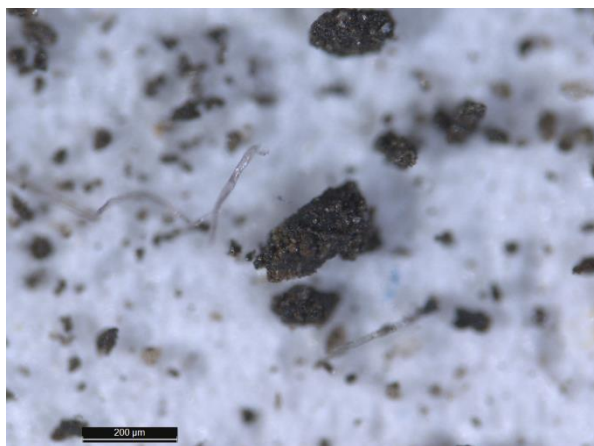


Slika 44: delci, ki so se prijeli na magnet

Delce, ki so se prijeli na magnet smo pogledali tudi pod mikroskopom (slika 45, 46)



Slika 45: delci, ki so se prijeli na magnet pod lupo

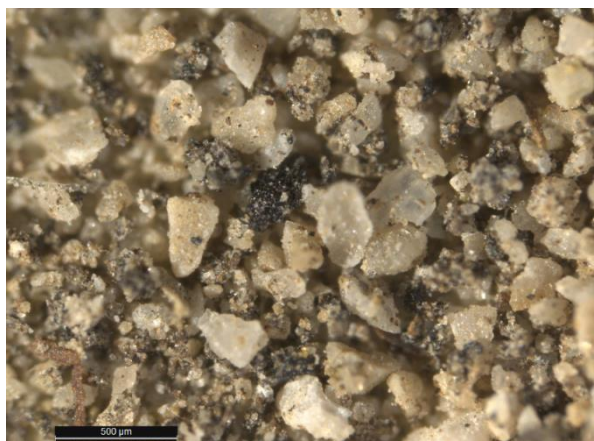


Slika 46: delci, ki so se prijeli na magnet pod mikroskopom

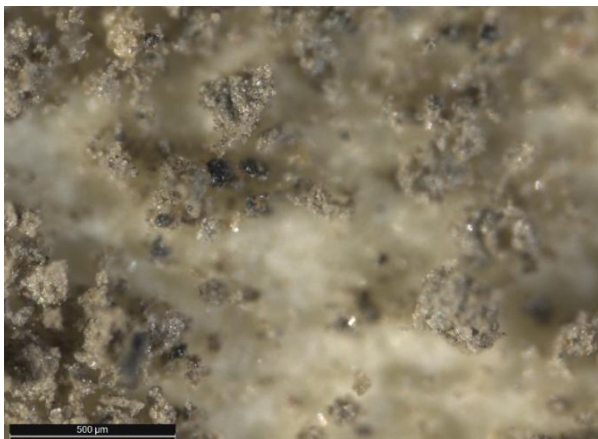
Delce, ki smo jih določili na kontrolnem **vzorcu 4**, smo poskusili najti še v ostalih vzorcih in poskusili določiti količino delcev in njihovo magnetnost v določenem vzorcu.



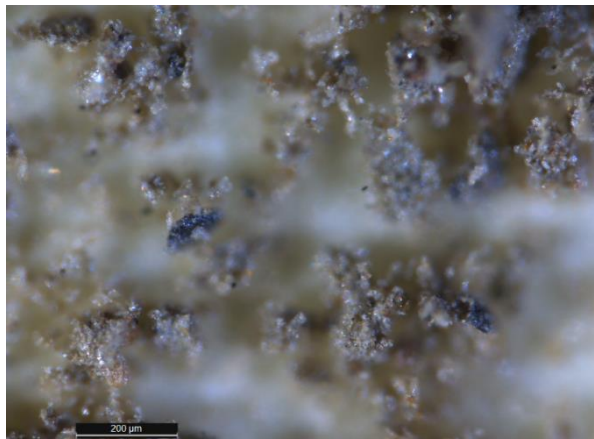
Slika 47: vzorec 1 pod mikroskopom



Slika 48: vzorec 11 pod mikroskopom



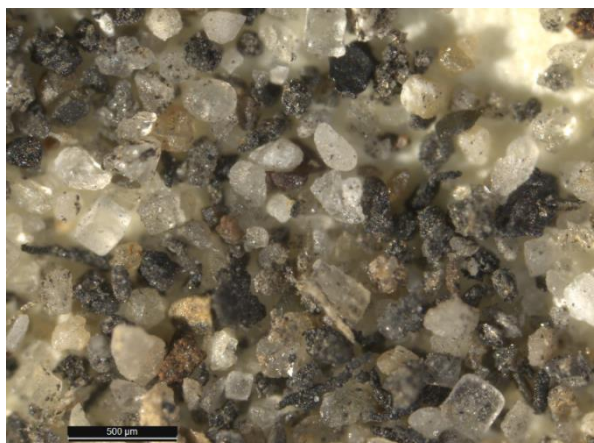
*Slika 49: vzorec 10 pod mikroskopom*



*Slika 50: vzorec 14 pod mikroskopom*



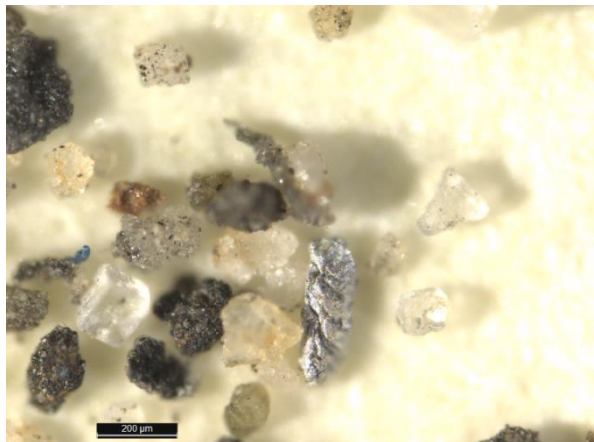
*Slika 51: vzorec 2 pod mikroskopom*



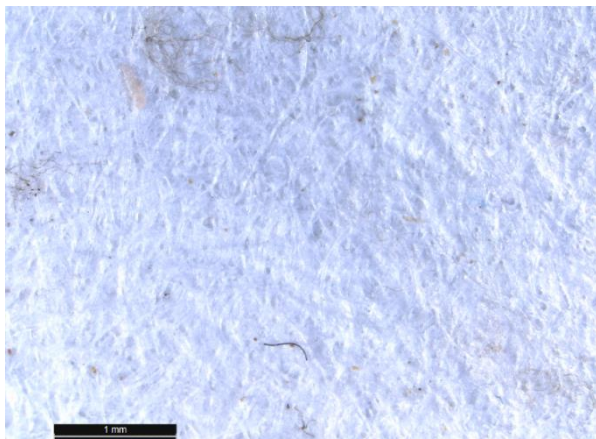
*Slika 52: Vzorec 3 pod mikroskopom*



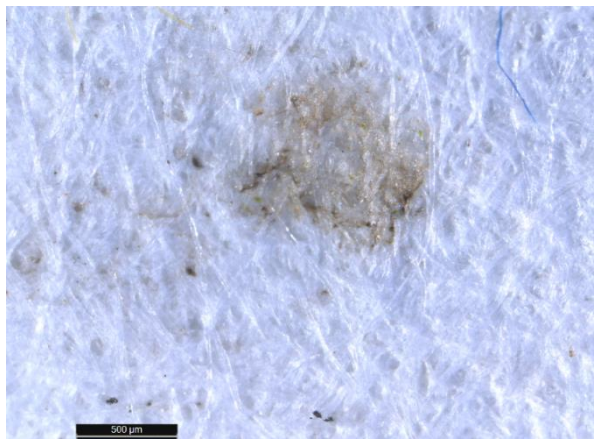
*Slika 53: vzorec 5 pod mikroskopom*



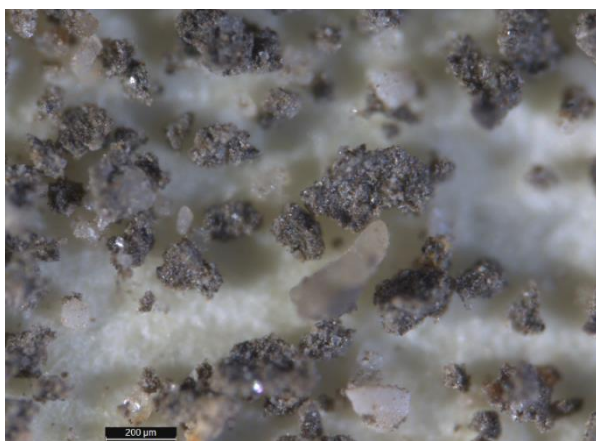
*Slika 54: vzorec 5 pod mikroskopom*



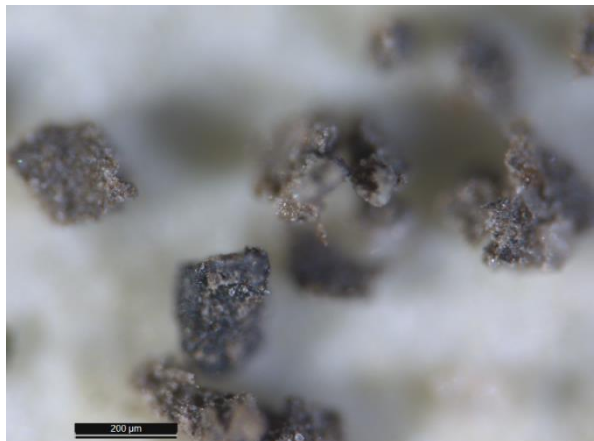
*Slika 55: vzorec 6 pod mikroskopom*



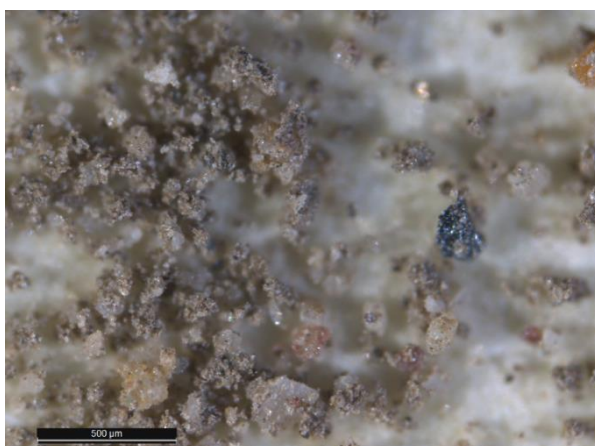
*Slika 56: vzorec 8 pod mikroskopom*



*Slika 57: vzorec 9 pod mikroskopom*



*Slika 58: vzorec 12 pod mikroskopom*



*Slika 59: vzorec 7 pod mikroskopom*

## 4. REZULTATI Z DISKUSIJO

Za spoznavanje tematike raziskovalne naloge smo najprej pregledali nekaj novejših člankov iz strokovne literature. To nam je vzelo kar nekaj časa, saj je bil pregled zahteven že samo iz vidika, da je bil v strokovni angleščini in da smo se s tako literaturo srečali prvič.

Informacij nismo iskali samo v strokovni literaturi, pač pa smo pisali in prosili za pomoč tudi različne državne institucije, kot so Geološki zavod Slovenije, Aerosol, AMZS, Inštitut za vode RS, revija Transit, servis kamionov West transport, avtomehanik in vulkanizer Dolinar. Na Geološkem zavodu Slovenije so analizirali cestni prah in nam posredovali podatke. Uporabne podatke so nam posredovali tudi iz AMZS-ja, ki so nam poslali testne rezultate pnevmatik, narejene za Motorevijo. Sami pa smo nato preračunavali različne možnosti in jih primerjali s podatki iz strokovne literature.

Za začetek smo izračunali razliko med težo nove in obrabljene pnevmatike. Zanimalo nas je namreč, koliko materiala se z obrabo sprosti v okolje. Na osnovi informacij Aerosol,d.o.o. in podatkov iz literature smo naredili približno oceno obrabljene gume in prišli do rezultata več kot 1,1 kg na človeka letno (**Kole in drugi, 2017**). Kot vidimo, pridemo do podobnega rezultata, saj rezultat 1,2 kg predstavlja obrabljeno gumo v 4-ih letih, medtem ko 1,1 kg predstavlja obrabljene gume v enem letu za enega človeka – torej 4 gume. Če iz teh dveh rezultatov naredimo povprečje dobimo:

0,29 kg / človeka (1 guma) 1 leto.

Za nadaljnji izračun smo uporabili podatek, ki smo ga določili s tehtanjem pnevmatik: 1,2 kg v 4 letih oz. 0,3 kg v enem letu. Ugotavljamo, da sta rezultata primerljiva in zadoščata za okvirno informacijo o MR iz ene pnevmatike.

Izračunali smo še dolžino, ki bi jo zavzele gume, če bi jih zložili drugo zraven druge tako, da se stikajo ob največji površini. Dolžina bi bila okrog 34 km, kar lahko primerjamo z dolžino Poti spominov in tovarništva okrog Ljubljane, ki meri 32,5 km. Skozi Slovenijo pa vodijo različni tranzitni koridorji; od vzhoda na zahod in iz pristanišč v Tržaškem zalivu na sever. Če iz avtomobilske gume z maso 9 kg izločimo v okolje 0,3 kg mikroplastike letno, se lahko vprašamo, koliko delcev izloči v okolje pnevmatika tovornjaka in koliko navsezadnje je samo tovornjakov, ki dnevno prečkajo Slovenijo. Odgovor nas je zanimal, zato smo se odločili in

prišli do rezultata, da v Sloveniji tekom enega leta vsi tovornjakarji obrabijo približno 36 000 000 kg.

Podatek je v primerjavi z avtomobilskimi gumami precej visok – govorimo lahko skoraj o 30-kratniku, saj je rezultat pri avtomobilskih gumah prišel 1 398 175 kg, kar lahko zaokrožimo na 1 000 t, letno za vse avtomobile v Sloveniji. Do take razlike v rezultatih je prišlo ravno zato, ker imamo veliko več tovornih kot osebnih vozil, tovorna vozila so mnogo težja, kar vsekakor prispeva k hitrejši obrabi gum in vredno je upoštevati tudi dejstvo, da tovorna vozila prevozijo mnogo več kilometrov kot pa osebni avtomobili.

Tako tovorna kot potniška vozila v Sloveniji navsezdanje k koncentraciji MR v okolje prispevajo presenetljivih 37 398 175 kg, kar lahko zaokrožimo na 37 000 t. Zavedamo se, da končni rezultat ni točen, saj k njemu nismo prišteli še vseh avtobusov, motorjev itd., ampak je podatek kljub temu že zastrašujoče velik. Zdaj se vprašajmo koliko bi bil velik točen izračun obrabe MR.

Naloga je nastajala v času epidemije Covid - 19 in posledično strogih ukrepov in zapor. Zaradi tega smo imeli omejen dostop do različnih odvzemnih mest, ki so nas zanimala, kot bi jih imeli sicer. Čas, v katerem smo raziskovali, je vplival tudi na promet na cestah in tako se je na cestišču odlagalo manj delcev iz pnevmatik. Zanimivo bi bilo vzorce jemati poleti, ko se bodo ukrepi sprostili in bo veliko več prometa na cestah, kot ga je sedaj.

Za raziskavo vzorcev smo poskusili uporabiti več različnih metod, ki smo jih zasledili v strokovni literaturi:

- filtracija,
- ločevanje z heksanom, detergentom, destilirano vodo, NaI,
- ločevanje z magnetom,
- sejanje.

Nobena od preizkušenih metod se ni izkazala za optimalno, saj z nobeno nismo mogli kvantitativno določiti količine delcev mikroplastike v vzorcih. Nobena ni bila povsem uspešna in sigurna tako, da bi izločila vse delce, ki jih želimo ločiti. Žal za te pristope nismo našli razdelane metodologije, kar smo opazili že ob prebiranju strokovne literature: (**Parker, 2020; Klöckner, 2020; Beate, 2020**).



Ker smo želeli slediti mikroplastičnim delcem iz pnevmatik, smo jih iskali na različnih prometnicah, v snegu in v deževnici. Na število delcev v določenem vzorcu so vplivali različni dejavniki, kot na primer vreme, gostota prometa in drugo. V tabeli (tabela 5) predstavljamo podatke števila delcev v vzorcih, ki smo jih uspeli kvantificirati. Število delcev smo kvantificirali s termini: nič, praktično nič, malo, veliko in zelo veliko. V tabeli navajamo tudi magnetnost vzorcev, ki smo jo opisali kar z termini DA in NE:

VZOREC	ODVZEMNO MESTO	ŠTEVILO DELCEV	MAGNETNOST
1	neprometna cesta	praktično nič	nismo testirali
2	prometna cesta	veliko	DA
3	prometna cesta nad avtocesto	zelo veliko	DA
4	avtomehanična delavnica	zelo veliko	DA
5	prometna cesta v predoru	zelo veliko	DA
6	balkon	nič	nismo testirali
7	prometna cesta	veliko	nismo testirali
8	balkon	nič	nismo testirali
9	manj prometna cesta	malo	nismo testirali
10	manj prometna cesta	malo	nismo testirali
11	neprometna cesta	praktično nič	malo
12	manj prometna cesta	malo	nismo testirali
13	manj prometna cesta	malo	malo
14	manj prometna cesta	malo	NE
15	terasa nad prometno cesto	veliko	DA
16	terasa nad prometno cesto	malo	DA
17	terasa	malo	DA
18	terasa nad prometno cesto	malo	nismo testirali

*Tabela 5: pregled poskusa kvantificiranja in magnetnosti mikroplastičnih delcev v 18 vzorcih odvzetih na različnih lokacijah, sredi decembra 2020*

Pri kvantificiranju vzorcev smo vzorec gledali pod mikroskopom, kjer smo skušali določiti gostoto delcev v danem vzorcu. Določanje in kvantificiranje vzorcev je bilo zelo zahtevno, kar lahko potrdimo tudi z viri: (Parker, 2020; Klöckner, 2020; Beate, 2020). Kljub zahtevnosti

---

smo poskušali delce v **vzorcu 4** določiti in nato enake iskati in kvantificirati v preostalih vzorcih.

Z metodo ločevanja z magnetom smo določili, da so nekateri delci magnetni in da verjetno vsebujejo kovino. Zaenkrat te magnetnosti še ne znamo razložiti, saj smo lastnost odkrili proti koncu raziskovalne naloge in se tako nismo mogli spustiti v podrobnejše raziskave. Zaenkrat samo sklepamo, da gre lahko za obrabljene delce zavor, ki se obrabljajo enako kot pnevmatika. Na šolsko teraso pa jih je verjetno prenesel veter.

Pri **vzorcu 4** smo poskušali najti uspešno metodo ločevanja delcev od ostalih snovi. Preizkusili smo pet metod, vendar sta bili delno uspešni samo zadnji dve metodi, pri katerih smo uporabili heksan. Tudi mikroskopiranje nam ni omogočilo kvantificiranja delcev. V obeh vzorcih je bilo opazno manj mikroplastičnih delcev kot v osnovnem. Žal nismo mogli uspešno identificirati in ločiti delcev z eno samo učinkovito, nam znano metodo.

V **vzorcih 1 in 11**, ki smo ju odvzeli iz neprometne ceste, praktično nismo našli mikoplastike, saj je bilo odvzemno mesto manj izpostavljeno prometu.

Pri **vzorcih 10, 13 in 14**, ki smo jih odvzeli iz manj prometne ceste, prav tako ni zaslediti večje prisotnosti mikoplastike. Tu ne govorimo o veliki številki, saj smo kot manj prometne ceste označili tiste, ki so glavne ceste skozi primestne kraje in jim ne moremo pripisati pridevnika prometne. **Vzorca 13** zaradi prevelikih kamenčkov nismo mogli presejati in ga zato nismo pogledali pod mikroskopom, a sklepamo, da bi bil rezultat podoben kot pri drugih dveh vzorcih. Vsekakor pa trdimo, da bi bilo zanimivo analizirati vzorce čez celo leto.

Najlažje smo mikroplastične delce opazili v vzorcih iz najbolj prometnih cest. Take vzorce smo imeli tri: 2 – prometna cesta, 3 – prometna cesta nad avtocesto (nadvoz) in 5 – avtocestni predor. Tukaj je bilo opazno več mikroplastičnih delcev, predvsem v **vzorcih 3 in 5**. **Vzorec 2 in 3** sta vzeta iz iste ceste, le da je **vzorec 3** vzet iz dela ceste, ko cesta prečka avtocesto – nadvoz. V **vzorcu 3** je opazno več mikoplastičnih delcev, iz česar ugotavljamo, da ti delci pridejo tudi na višje lege s pomočjo naravnih pojavov gibanja skozi ozračje. Veliko mikroplastičnih delcev je bilo opaznih tudi v **vzorcu 5**, ki je vzet iz avtocestnega predora. Predvidevali smo, da bo v tem vzorcu veliko mikroplastičnih delcev in imeli smo prav.

Na enak način smo pregledali tudi vzorce snega po sušenju. Vzorci snega, ki smo jih pridobili iz padavin, niso vsebovali nič mikoplastike, za razliko vzorcev umazanega snega iz ceste.

Vzorca s snegom iz padavin sta bila dva: **6 in 8**. Pri teh dveh vzorcih sploh nismo našli nobenega mikroplastičnega delca iz pnevmatik, kar nas je presenetilo. Preko tega smo sklepali, da se mikroplastični delci iz pnevmatik ne nahajajo v zraku, saj je bil zbrani sneg letošnji prvi in je padal iz neba direktno v kozarec.

Iz prometnih cest smo imeli tri vzorce, med njimi enega, odvzetega iz bolj prometne ceste kot druga dva. To je bil **vzorec 7**, druga dva pa **9 in 12**. V **vzorcu 7** je bilo veliko mikroplastičnih delcev, za razliko od ostalih dveh, kjer jih je bilo manj. **Vzorec 7** je bil podoben kot vzorec 2. Razlika v vzorcih je zgolj ta, da je bil vzorec 2 pesek iz ceste, vzorec 7 pa sneg iz ceste – oba vzorca sta bila odvzeta iz iste lokacije. Iz tega smo ugotovili, da je snežni vzorec podoben peščenemu. Seveda je bilo opazno malo manj mikroplastičnih delcev, a tudi tu ne govorimo o veliki količini. Sklepamo, da je do razlike prišlo zato, ker je v snežnih dneh manj prometa, saj več ljudi ostane doma zaradi spolzkih cest. Druga dva vzorca – **9 in 12** sta bila odvzeta iz manj prometne ceste. Pogledali smo ju pod mikroskopom in določili manj mikroplastičnih delcev kot v vzorcu 7.

Večino rezultatov, ki smo jih navedli in opisali zgoraj, smo tudi pričakovali. Presenetil nas je edino rezultat pri **vzorcih 6 in 8**, kjer je bil zbran čisti sneg. Res, da v vzorcu snega nismo pričakovali velikega števila delcev, vendar vsekakor nismo pričakovali nič opaženih delcev. Iz tega sklepamo, da se mikroplastični delci iz pnevmatik, sredi največje karantene v decembru 2020, ne nahajajo in ne zadržujejo v zraku.

Težave smo imeli tudi pri določevanju delcev iz vzorcev, vzetih iz terase Gimnazije Jožeta Plečnika – **vzorci 15, 16, 17, 18**. Tukaj so bili problem delci kamenčkov iz terase, ki so temne barve in tako smo težje določili, kateri delci pripadajo mikroplastiki, saj so delci precej enaki.

Med pisanjem raziskovalne naloge se nam je odprlo veliko novih vprašanj o vzorčenju, identifikaciji in kvantificiranju delcev mikroplastike iz pnevmatik.

## 5. ZAKLJUČEK IN MOŽNE REŠITVE

### 5.1. Zaključek na osnovi rezultatov eksperimentov

Pred začetkom naloge smo si postavili tri hipoteze, in sicer:

- Mikroplastiko iz cestišča bomo prepoznali kot majhne, črne delce, opazne zgolj z mikroskopom.
- Mikroplastiko najdemo skorajda povsod, največ pa tam, kjer je promet najgostejši.
- Mikroplastike je več ob prometnicah kot v okolici.

Vse tri postavljene hipoteze nam je uspelo potrditi. Prvo hipotezo smo potrdili z rezultatom na osnovi kontrolnega **vzorca 4**, kjer so bili praktično vsi prepoznani in določeni delci mikroplastika iz pnevmatik. Poleg tega, da so delci črne barve, smo dokazali tudi to, da so delci nehomogena zmes, aglomerati gume, kar se sklada s strokovno literaturo (**Klößner in drugi, 2019**).

Drugo hipotezo smo nato potrdili pri mikroskopiranju vzorcev, v katerih smo iskali delce mikroplastike iz pnevmatik. Količino teh smo opisali z besedami nič, praktično nič, malo, veliko, zelo veliko, saj delcev natančneje nismo mogli določiti. Ugotovili smo, da je **vzorec 5**, odvzet iz avtoceste, po količini delcev mikroplastike iz pnevmatik takoj za kontrolnim vzorcem 4, ki je bil odvzet iz avtomehanične delavnice.

Tretjo hipotezo smo potrdili, ko smo primerjali prometne in neprometne ceste. Na prometnih cestah je bilo opaznih veliko več mikroplastičnih delcev iz pnevmatik kot pa na neprometnih cestah, kjer smo jih težje našli.

Kljub zahtevnosti naloge nam je uspelo vse zastavljene hipoteze potrditi, na kar smo zelo ponosni. Menimo, da bi bilo to temo zelo zanimivo širiti še naprej v podrobnejše raziskovanje, saj bo v prihodnosti postal to en ključnih problemov onesnaževanja okolja, s katerim se bomo morali soočiti. V nadaljnje raziskovanje bi se nam zdelo zanimivo vključiti magnetnost delcev in to lastnost poskusiti uporabiti pri ločevanju od ostalih vzorcev. Usmerili bi se lahko tudi v določevanje drugih lastnosti, ki bi nam pomagale pri ločevanju in določevanju delcev, ter pri iskanju možne rešitve. Čeprav so delci majhni in se težko zavedamo, da so prisotni v okolici, smo se v tej nalogi naučili, da imajo vsekakor negativen vpliv na okolje, nas in ostala živa bitja.

Vsi vemo, da smo ljudje največji onesnaževalci okolja in potrebujemo veliko časa, da se zavemo, kakšne posledice lahko to pusti naravi. Zavedamo se, da moramo ukrepati z

Zmanjšanjem izpušnih plinov in mikroplastičnih delcev, ampak redko kdo ve, da ogromno škode naredi že samo z vožnjo po cesti. Pri vožnji po cesti niso problem samo izpušni plini, temveč so težava tudi mikroplastični delci iz pnevmatik, ki v okolje pridejo z obrabljanjem avtomobilskih pnevmatik med vožnjo. Vozniki vedo, da je treba avtomobilske pnevmatike po določenem času zamenjati, ker se obrabijo, ne zavedajo pa se, kam gredo obrabljeni delci pnevmatik in kakšno škodo delajo okolju.

S to raziskovalno nalogo smo želeli pridobiti čim več novih podatkov o delcih, opaznih zgolj z mikroskopom, ki pa v okolju delajo veliko škodo. Z raziskovalno nalogo je vsak od nas spoznal, kakšno škodo delajo samo obrabljene pnevmatike. Preden smo se spustili v to temo, se nam ni niti sanjalo, da letno vsak človek odvrže več kot 1,1 kg mikroplastičnih delcev v okolje že samo z vožnjo po cesti. Ko pa smo začele z raziskovanjem, smo se vedno bolj zavedale tega problema in kako ključen lahko postane v naslednjih desetletjih. Po našem mnenju bi morali v ta problem vložiti več raziskav, ki bi iskale uspešno rešitev. V poročilu OECD za leto 2020 je navedeno, kako se bo z zamenjavo avtomobilov na fosilna goriva z električnimi zmanjševal delež izpustov PM 2,5 in PM 10 iz izpušnih plinov in kako se bo zaradi večje teže električnih vozil povečeval delež emisij teh delcev zaradi večje obrabe gume iz pnevmatik. Poročilo priporoča povečanje raziskav in ukrepanje na tem področju.

## 5.2. Možne rešitve

Menimo, da bo v prihodnosti zagotovo postalo izjemno pomembno vprašanje o vzorčenju, identifikaciji in kvantifikaciji mikroplastičnih delcev, ravno zaradi velikega vpliva na okolje in na zdravje tako človeka, kot ostalih živih bitij. Predvsem pa nas skrbi izjemna gostota vsakodnevnega tranzitnega prometa vozil skozi Slovenijo. Najboljša in najučinkovitejša rešitev se nam zdi, da po zgledu Švice ves ali vsaj večino tranzitnega prometa iz cest premaknemo na železnico.

Avtomobilska pnevmatika že desetletja ni bila deležna večje prenove, v zadnjem času pa je prišlo do večjega spodbujanja k razvoju bolj trajnostnih materialov za izdelavo pnevmatik. Leta 2017 so na primer raziskovalci Univerze v Minnesoti našli način, kako iz naravnih virov, kot so trava, drevesa in koruza, namesto fosilnih goriv proizvesti izopren - ključno sestavino sintetičnega kavčuka (**film Tom Watt-Smith, 2019**).

Tudi ceste bi lahko bile manj abrazivne ali bolj porozne, da bi s tem zmanjšali ali pomagali zbrati delce obrabe pnevmatik.

Na splošno pa se nam zdijo najbolj nujne nadaljnje raziskave in večja znanstvena in javna ozaveščenost. **(Winstein, 2019)**

Ekipa študentskih oblikovalcev Tire collective je zasnovala preprosto napravo, ki zbira mikroplastiko, ko odleti z avtomobilske pnevmatike. Kot pojasnjuje skupina oblikovalcev, njihova naprava pomaga na poti k ničelnim emisijam z uporabo elektrostatičnega in zračnega toka okoli pnevmatike, da zajame mikroplastiko in druge majhne delce, ki se izločijo v celotni življenjski dobi pnevmatike. **(Davidson, 2020)**

### 5.2.1. Biorazgradljiva plastika

V Indoneziji so iznašli snov, narejeno iz morskih alg, ki bi se lahko uporabljala kot alternativni material za bioplastiko. Potrebne so dodatne raziskave za zagotovitev, da bi se plastika na osnovi morskih alg lahko uporabljala za druge izdelke iz plastičnih mas. V prihodnje upajo, da bo plastika na osnovi morskih alg primerljiva z običajno plastiko, s katero bi se jo dalo tudi nadomestiti. **(film Tom Watt-Smith, 2019)** Žal pa seveda to lahko povzroči iztrebljanje morskih alg, ki so največji proizvajalec kisika na Zemlji.

### 5.2.2. Lovilec mikrodelcev

Ko se svet premika k bolj obnovljivi energiji in se tehnologija električnih vozil izboljšuje, se onesnaževanje kljub temu ne zmanjšuje. Električna vozila namreč ne rešujejo problema onesnaženja s pnevmatikami, temveč jih lahko poslabšajo, saj so električna vozila običajno težja od avtomobilov z motorji z notranjim izgorevanjem. **(Stamač, 2020)** Za dokaz smo na spletni strani Volkswagen našli primerjavo med bencinskim in električnim avtomobilom. Za primerjavo smo vzeli bencinski Golf in električni e – Golf. Ker je imel e – Golf moč 100 kW, smo za bencinski Golf našli avto z čim podobnejšo močjo motorja (96 kW). Teža e – Golfa je 1615 kg, teža bencinskega pa 1306 kg, torej skoraj 300 kg manj. Teža je pomembna ravno zato, ker se pri težjih vozilih pnevmatike obrabljajo hitreje in tako z električnimi avtomobili nič ne pripomoremo k izboljšanju.

Eno od možnih rešitev pa lahko predstavljajo posebne ploščice, ki s statistično elektriko privlačijo delce mikroplastike. Postavili so jih tako, da izkoristijo tudi naravne zračne tokove okoli pnevmatik. Skupina raziskovalcev pravi, da je sistem sposoben preprečiti pobeg okoli 60 % delcev, ki bi sicer končali v okolju. Rešili so tudi vprašanje, kam bi odlagali te delce.

---

Delci so po analizi primerni za ponovno uporabo. Uporabili bi jih sicer lahko za različne produkte, med drugim tudi za izdelavo črnila.

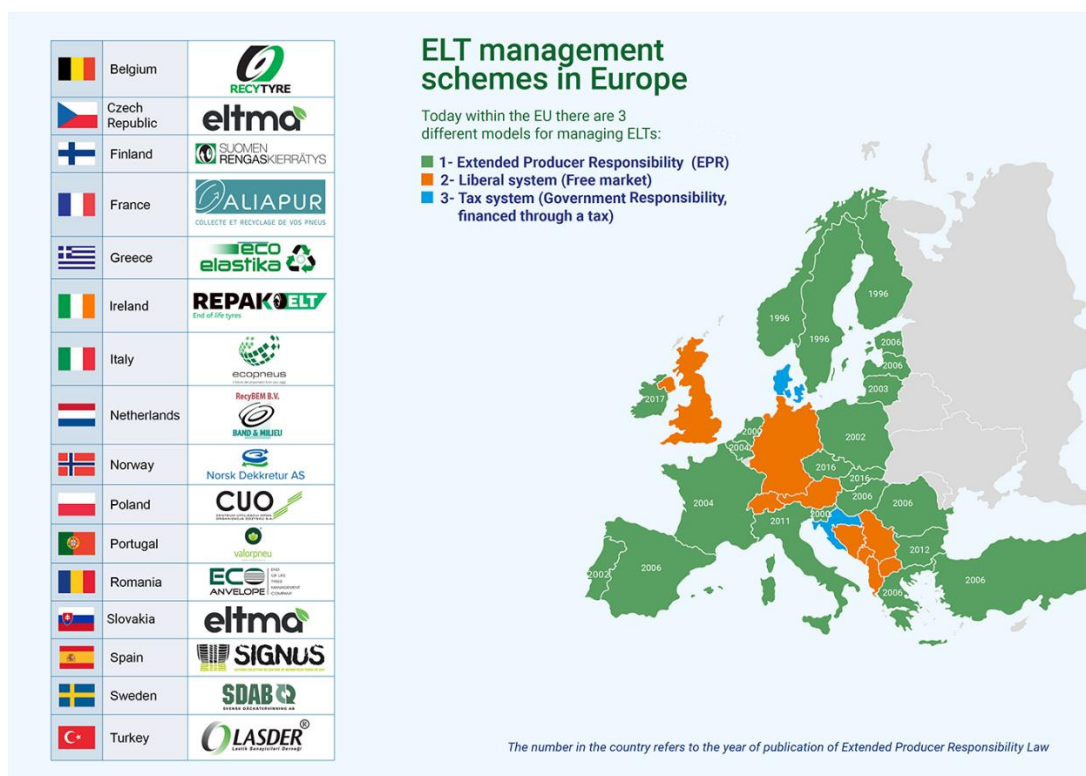
Torej lovilci mikrodelcev so nastavki, ki bi bili lahko nameščeni na praktično vsakem avtomobilu (**Stamač, 2021**), kar bi bila lahko uspešna rešitev za ta problem.

### 5.2.3. Rešitve Evropske unije

Rešitve različnih problemov, povezanih z mikroplastiko v okolju, išče tudi Evropska unija. Septembra 2018 je sicer Evropski parlament potrdil Strategijo EU za zmanjšanje količine plastičnih odpadkov. Strategija predvideva najrazličnejše ukrepe, med drugim tudi ukrep s povečanjem reciklaže in prepovedjo nekaterih izdelkov za enkratno uporabo. S to strategijo bi želeli do leta 2030 zagotoviti, da bo vso plastično embalažo mogoče ponovno uporabiti ali reciklirati. (**Novice Evropski parlament, 2018**)

V Evropski uniji obstajajo trije različni sistemi za upravljanje izrabljenih gum (slika 60):

- Extended Producer Responsibility pomeni razširjeno odgovornost proizvajalca. V skladu s tem sistemom je prvotni proizvajalec dolžan skrbeti, da se odpadki iz izdelkov, ki jih je ustvaril, odlagajo odgovorno, na okolju prijazen način. To je privedlo do ustanovitve neprofitnih podjetij, ki jih financirajo proizvajalci pnevmatik, da bi z najbolj ekonomičnimi rešitvami upravljali zbiranje in predelavo izrabljenih pnevmatik.
- V skladu s sistemom prostega trga ali Free market zakonodaja določa cilje, ki jih je treba doseči, vendar ne določa odgovornih. Na ta način vsi izvajalci v pogodbi o verigi predelave pod pogoji prostega trga delujejo v skladu z zakonodajo. (**ETRMA, 2019**)
- Zadnji sistem upravljanja je davčni sistem, ki je v uporabi na Danskem in Hrvaškem. V skladu z davčnim sistemom je vsaka država odgovorna za upravljanje izrabljenih pnevmatik. (**ETRMA, 2019**)



Slika 60: trije različni sistemi za upravljanje izrabljenih gum v EU



## 6. VIRI IN LITERATURA

- <https://www.youtube.com/watch?v=49OJoTsZY00>
- [Zmanjšanje količine odpadkov: več recikliranja, prepoved mikroplastike | Novice | Evropski parlament \(europa.eu\)](#)
- Wagner Stephan, Hüffer Thorsten, Klöckner Philipp ...: Tire wear particles in the aquatic environment - A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects; Water research, Elsevier, 2018
- [RUL - Vpliv okoljsko relevantne mikroplastike na malo vodno lečo Lemna minor \(uni-lj.si\)](#)
- [Mikroplastika onesnažuje tudi slovensko morje \(delo.si\)](#)
- [Mikroplastika: »nevidni« sovražnik okolja | Bodi eko](#)
- Dolar Andraž: VPLIV MIKROPLASTIKE NA PREHRANJEVANJE TER RAST KOPENSKIH RAKOV ENAKONOŽCEV PO DOLGOTRAJNI IZPOSTAVITVI, magistrsko delo, Ljubljana, 2018
- [Mikroplastika v živilih | www.nijz.si](#)
- Film: Utopljanje v plastiki - britanska dokumentarna serija, Tom Watt-Smith, Velika Britanija, 2019
- [Pri mikroplastiki še veliko neznank - Delo](#)
- Gašper Stamač: Lovilec mikrodolcev, revija Avtofokus, avtofokus, 2021
- [Mikroplastika – izvor, vpliv in rešitve | Novice | Evropski parlament \(europa.eu\)](#)
- Parker W. Brittney, Beckingham A. Barbara, Ingrem C. Brianna...: Microplastic and tire wear particle occurrence in fishes from an urban estuary: Influence of feeding characteristics on exposure risk; Marine Pollution, Bulletin, Elsevier, 2020
- Klöckner Philipp, Reemtsma Thorsten, Eisentraut Paul, Braun Ulrike ...: Tire and road wear particles in road environment e Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation; Chemosphere, Elsevier, 2019
- Halle L. Louise, Palmqvist Annemette, Kampmann Kristoffer ...: Ecotoxicology of micronized tire rubber: Past, present and future considerations; Science of the Total Environment, Elsevier, 2020
- Klöckner Philipp, Seiwert Bettine, Eisentraut Paul ...: Characterization of tire and road wear particles from road runoff indicates highly dynamic particle properties; Water Research, Elsevier, 2020

- Unice M.K., Weeber P.M., Abramson M.M. ...: Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed; Science of the Total Environment, Elsevier, 2019
- Baltruschat-Baensch Beate, Kocher Birgit, Stock Friederike ...: Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment, Science of the Total Environment, Elsevier, 2020
- Järllskog Ida, Strömvall Ann-Marget, Magnusson Kerstin ...: Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater; Science of the Total Environment, Elsevier, 2020
- Baltruschat-Baensch Beate, Kocher Birgit, Kochleus Christian ...: Tyre and road wear particles - A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads; Science of the Total Environment, Elsevier, 2020
- Sieber Ramona, Kawecki Delphine, Nowack Bernd: Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment; Environmental Pollution, Elsevier, 2019
- Alves A.C., Vicente I.A., Baumgardner D. ...: Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres; Atmospheric Environment, Elsevier, 2020
- <https://www.ecowatch.com/microplastics-car-tires-james-dyson-award--2647697441.html?rebelltitem=1#rebelltitem1>
- <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/09/tires-unseen-plastic-polluter/>
- [Circular Economy - ETRMA](#)
- [Home - Tyre and Roadwear](#)
- Tire story – brošura
- <https://www.zelenaslovenija.si/n3261/mikroplastika-iz-tekstila-in-gum-glavni-vir-onesnazevanja-morij>
- CHEMISTRY-Principles and Applications, P.W. Atkins, 1988
- Kovač Viršek manca: končna ČN Celje Problemska Konferenca, 2017
- Blair s sod.: končno poročilo mikroplastika, 2019

- <https://www.stat.si/StatWeb/Field/Index/17/104>
- Tik Root, v reviji National Geographic, september 2019
- M. Graunar in drugi: Kemija za gimnazije 3. Učbenik za organsko kemijo, 2019
- P. W. Atkins, CHEMISTRY-Principles and Applications, 1988 · Klander, 2015: <http://klander.si/index.php/site/references/zmesi>
- [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)
- [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)
- Amato Fulvio, Dimitropoulos Alexandros, Farrow Katherine, Oueslati Walid: Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport : An Ignored Environmental Policy Challenge, OECD, 2020
- [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj5v4m81pTvAhXJ0qQKHUxvAuUQFjABegQIBxAD&url=http%3A%2F%2Fwww.cek.ef.uni-lj.si%2Fu\\_diplome%2Fnovljan3245.pdf&usg=AOvVaw3Vi4Z1vh3-b7bx18Ki8Ed8](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj5v4m81pTvAhXJ0qQKHUxvAuUQFjABegQIBxAD&url=http%3A%2F%2Fwww.cek.ef.uni-lj.si%2Fu_diplome%2Fnovljan3245.pdf&usg=AOvVaw3Vi4Z1vh3-b7bx18Ki8Ed8)
- <https://www.volkswagen.si/id3/predstavitevno-gradivo>