



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Az úttestek felszínéről származó mikrogumi-szemcsék vizsgálata
és csökkentési lehetőségei a csapadékvíz-elvezető rendszerekben**

OTDK dolgozat

2023

Készítették:

Urbán Balázs Gyula

Környezetmérnök Bsc, III. évfolyam, BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar

Mészáros Nándor

Környezetmérnök Bsc, II. évfolyam, BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar

Konzulensek:

Dr. Szilágyi Imre Miklós

egyetemi docens, BME Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék

Gógh Zsolt

környezetvédelmi oktató, BMSZC Petrik Lajos Két Tanítási Nyelvű Technikum

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	2
ÁBRAJEGYZÉK	4
TÁBLÁZATJEGYZÉK	5
1. ABSZTRAKT	6
2. BEVEZETŐ	8
3. MŰANYAGOKTÓL A MIKROGUMI-SZEMCSÉKIG	9
3.1. Mikroműanyagok.....	9
3.2. Autógumik kopásából származó szemcsék mennyiségének becslése	10
4.2.1 Lakosság-, és úthossz arányú gumikopás értékek.....	14
3.3. Az abroncsok alkotói, tulajdonságai.....	14
3.4. TRWP-Tyre and Road Wear Particles.....	15
4. A KUTATÁSI HELYSZÍN MEGVÁLASZTÁSA ÉS JELLEMZÉSE	16
5. KORÁBBI TDK MUNKÁNK A TÉMÁBAN	18
5.1. Mintavételezési módszerek.....	18
5.1.1. PVC lefolyócső mintavételezése	18
5.1.2. Szűrőadapteres mintavételezés	19
5.2. A minták laboratóriumi vizsgálata	20
5.2.1. Üledékminták előkészítése, szeparálása	20
5.2.2. Mikroszkópi vizsgálatok.....	21
5.3. Térinformatikai elemzés	22
5.4. Az üledékminták eredményeinek értékelése	23
5.4.1. A lefolyók üledékeinek vizsgálata.....	23
5.4.2. Az Aranyhegyi-patak üledékmintáinak vizsgálata	25
6. JELENLEGI KUTATÁSUNK	28
6.1. Szűrőmodell vizsgálatok.....	28

6.1.1.	A modellezés szükségének indokai	28
6.1.2.	A modell felépítése, a működés részletei.....	29
6.1.3.	A modellvizsgálat eredményei, megfigyelései	31
6.2.	A 100 mikrométer alatti szemcsetartomány vizsgálata	32
6.2.1.	Mintavételezés	32
6.2.2.	Fénymikroszkópos vizsgálatok	33
6.2.3.	Analitikai vizsgálatok	34
6.2.4.	SEM-EDX vizsgálat eredményei	35
6.2.5.	Aggregátumok és a bennük felelhető elemek.....	37
6.3.	Ülepítő tervezés	38
6.3.1.	Méretezés.....	39
6.3.2.	Jelölésjegyzék:	40
6.3.3.	Kiindulási adatok:	40
6.3.4.	Számítások:.....	41
6.4.	Prototípusok.....	44
7.	MIKROGUMI-SZEMCSÉK KÖRNYEZETRE ÉS EMBERI EGÉSZSÉGRE GYAKOROLT HATÁSAI	47
8.	ÖSSZEFOGLALÓ.....	48
9.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	49
10.	IRODALOMJEGYZÉK	50

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Helyszín - M 1:7500 (Urbán B. et al., 2021).....	16
2. ábra Mintázható PVC lefolyócsővégek (Urbán B. et al., 2021).....	17
3. ábra Csővég mintázása átbukós feltétellel (Urbán B. et al., 2021)	19
4. ábra Szűrő telepítése (Urbán B. et al., 2021).....	19
5. ábra Üledékminták (Urbán B. et al., 2021)	20
6. ábra Gumidarabok sztereo-mikroszkóp alatt (Urbán B. et al., 2021).....	21
7. ábra A vizsgálati terület egységei (Urbán B. et al., 2021).....	22
8. ábra Felüljáró gumiszemcse-terhelése (Urbán B. et al., 2021)	24
9. ábra Az Aranyhegyi-patak mintavételi pontjain mért gumiszemcse terhelések (Urbán B. et al., 2021).....	26
10. ábra Transzport modell (K.M. Unice et al., 2019)	27
11. ábra Szűrőmodell.....	30
12. ábra Koaleszcens szűrőbetét a kísérlet után	31
13. ábra Koaleszcens szűrőbetét terepi mintázás után	33
14. ábra TRWP szemcsék elektronmikroszkóp alatt.....	34
15. ábra Elektronmikroszkóp - terepi minta.....	35
16. ábra Fénymikroszkóp - terepi minta.....	35
17. ábra Elektronmikroszkópi kép és atomszázalékos összetétel	36
18. ábra Azonos szemcse két különböző pontban végzett mérése (atomszázalék).....	36
19. ábra Ülepítő berendezések tervezett helye	39
20. ábra Ülepedési diagram (VEGYIPARI MŰVELETEK I. – SZÁMÍTÁSI GYAKORLATOK MELLÉKLETEK	41
21. ábra Első prototípus.....	44
22. ábra Második prototípus.....	45
23. ábra Harmadik prototípus.....	45

24. ábra Negyedik prototípus	46
25. ábra Ötödik prototípus.....	46

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat Kopási tényezők számításának táblázata (Urbán B. et al., 2021)	12
2. táblázat Éves gumiterhelés becslése (Urbán B. et al., 2021).....	13
3. táblázat Az 1. és 2. üledékminta-sor mérési eredményei (Urbán B. et al., 2021)	23
4. táblázat Gumimennyiség 1000g üledékben (Urbán B. et al., 2021)	24

1. ABSZTRAKT

A szakirodalmi adatok minimálisan 20%-ra teszik az autógumik közúti kopásából származó részecskék arányát a mikroműanyagok teljes környezeti terhelésében. A projekt eredeti célja ezen mikrogumi-szemcsék élővizekbe jutásának megakadályozása valamilyen innovatív technológiával. Hamar bebizonyosodott, hogy ehhez igen szerteágazó, komplex ismeretekre, egyre bővülő kutatásra lesz szükségünk.

Elsődleges feladatunk volt az útfelületeken képződő autógumiszemcsék mennyiségének becslése. Kiszámítottuk a Magyarországon 2017-ben termelődő gumiszemcsék tömegét (6680 tonna). Ehhez szakirodalmi mintára meg kellett alkotnunk az egyes gépjárművek gumikopási tényezőit is.

Egy modell értékű helyszínen, Óbudán (Pomázi úti felüljáró) mennyiségi értelemben feltérképeztük a gumiszemcsék szállítódásának útvonalát. A 0,1-2,0 mm-es mérettartományban végigkövettük útjukat a keletkezési helytől a csatornán át az élővízbe jutásig. A felüljárótól az Aranyhegyi-patak mentén egészen az első nagy befogadóig, a Dunáig üledékminták segítségével követtük nyomon a szennyezettség mértékét. Munkánk ezen része az első, terepi adatokon alapuló becslés az eddigi, pusztán matematikai módszereken alapuló meghatározás mellett.

Az üledékminták feldolgozásához saját szeparálási módszert dolgoztunk ki a mintáinkban található mikroszemcsék elkülönítésére, mivel erre nem állt, és jelenleg sem áll rendelkezésre protokoll eljárás. A szemcsék azonosítását eleinte fénymikroszkóp alatt, meghatározó tulajdonságaik (alak, szín, rugalmasság) alapján végeztük. Később analitikai SEM-EDX vizsgálattal egészítettük ki ezt.

Az elmúlt egy évben további kutatási témákat, irányokat fedeztünk fel. Fő célunk a kisebb szemcsetartomány (80 μm alatti) és ezek aggregátumainak vizsgálata volt. Továbbra is morfológiailag, illetve SEM-EDX analitika segítségével vizsgáltuk a szakirodalomban említett és általunk is azonosított gumialapú aggregálódott szemcséket. Jelenleg már mi is egyértelműen „útanyag” - (TRWP) szemcsékben gondolkodunk a korábbi megközelítéssel szemben.

Vizsgálataink során mintavételi okokból használtunk két olajszelektív szűrőt, amelyeket a kutatási helyszínen telepítettünk. Elkészítettük ezek modelljét is. A laboratóriumi tesztelés eredményeiből megállapítottuk, hogy az olajszelektív szűrő az olajszennyeződést képes

kiszűrni, de az olajfilmmel bevont gumiszemcséket is tartalmazó aggregátumok derítésében nem játszik „segítő” szerepet.

Jelenlegi, már a megoldás irányába mutató feladatunk egy általunk tervezett és méretezett ülepitő adapter prototípusainak megalkotása és tesztelése lesz.

2. BEVEZETŐ

Kutatásunk még középiskolában kezdődött, amelyet immáron negyedik éve folytatunk. Projektünk a mikroműanyagok problémáján belül az autógumik kopásából származó szemcsékre fókuszál. Többek között olyan kérdésekre keressük a választ, mint hogy a keletkező gumiszemcsék milyen tulajdonságokkal rendelkeznek, vagy éppen milyen mennyiségben termelődnek az utakon, milyen arányban szállítódnak tovább az első nagyobb befogadóig. A kutatás fő célja, egy olyan berendezés megalkotása, amely képes mérsekkelni az utakról a csapadékvíz által az élővizekbe bejutó gumiszemcse-terhelést.

A dolgozat három fő tartalmi részre oszlik. Első ízben a mikroműanyagok témáját, a gumiszemcsékhez tartozó mérőszámokat és a TRWP fogalmát vezetjük be. A második fő egységben a mostani kutatást megelőző eredményeinket taglaljuk, mivel ez alapozta meg jelenlegi munkánkat is. Végül szeretnénk részletesen bemutatni jelenlegi kutatómunkánk új fejezeteit, eredményeit.

3. MŰANYAGOKTÓL A MIKROGUMI-SZEMCSÉKIG

3.1. Mikroműanyagok

Immáron lassan több mint két évszázada lesz, hogy létrehozták az első műanyagok egyikét, a PVC-t. Ezalatt a 200 év alatt egyre több fajta új műanyagot hoztak létre, és egyre nagyobb mennyiségben kezdte gyártani az emberiség. Ennek az óriási műanyagmennyiségnek a túlnyomó többségét egyszer használatos tárgyakhoz, csomagolásokhoz készítették. Ezek vagy a hulladéklerakóban/égetőben, vagy a környezetben végezték.

A környezetbe kijutott műanyagok bizonyos környezeti hatásoknak vannak kitéve, ilyen az UV sugárzás, egyes mechanikai behatások és kémiai folyamatok. Az idő múlásával elkezdnek aprózódni, erről a folyamatról beszél számos, a témával foglalkozó kutatás (Hann S. et al., 2018a).

A mikroműanyagokat méretük alapján definiálták: olyan műanyag szemcsék, amelyek mérete kisebb, mint 5 mm. Ezt a méretkategóriát nevezi a szakirodalom mikroműanyagoknak (GKD WORLD WIDE WEAVE, 2016; CEDR Report, 2018; Hann S. et al., 2018a; Unice, K.M. et al., 2019; Jekel, M. et al., 2019)

A mikroműanyagok két csoportra bonthatóak, elsődleges és másodlagos mikroműanyagokra. A másodlagos mikroműanyagok a természetbe kikerült, felhalmozódott műanyagok feldarabolódásával keletkeznek. Az elsődleges mikroműanyagok pedig „gyárilag”, eredeti állapotukban is ilyen kis mérettel rendelkeznek. Egyes tisztító- és szépségápolási szerekben is megtalálhatóak (Hann S. et al., 2018a).

Számos szakirodalom foglalkozik azzal, hogy megbecsülje az emberiség hétköznapi tevékenységei által keletkező mikroméretű műanyagszemcsék mennyiségét, ezzel választ kapva arra, hogy milyen forrásokból és mennyi szemcse kerül ki a környezetbe.

Hann Simon és társai 2018-ban egy Európai Unió kutatás keretében becsléseket tettek ezen számok meghatározására. Az összefoglaló tanulmányból kiderül, hogy a környezet mikroműanyag terhelésének túlnyomó részét az autógumik abroncsának kopásából származó gumiszemcsék adják. Ezekből a szemcsékből az Európai Unióban évente átlagosan 503,586 tonna keletkezik (Hann S. et al., 2018).

3.2. Autógumik kopásából származó szemcsék mennyiségének becslése

Hann S. és társai által készített 2018-as jelentés az élővizekbe kerülő autógumiszemcsék becslését is tárgyalja, összefoglalja, és egységesíti az eddigi kutatási eredményeket.

Két fajta becslés lehetséges, az egyik egy régebbi módszer, ami az új és az újra használt gumiabroncsok kopásával számol. Másik módszer a kibocsátási megközelítés, itt egyes faktorok figyelembevételével számolják ki a gumik kopási tényezőit, majd ezeket összesítik az egyes országokra jellemző forgalmi adatokkal.

A mikrogumiszemcsék mennyiségi becslése a koptatott gumik alapján igen összetett, bonyolult, sok tényezős feladat. Figyelembe kell venni a gépjárművek típusát, súlyát; tudni kell az abroncsok paramétereit; számításba kell venni a sofőr vezetési stílusát; illetve az út-, közlekedési-, és időjárási viszonyokat. Minden ilyen tényezőt figyelembe véve lehetne csak pontos adatokat szolgáltatni a lekopott gumimennyiségre vonatkozóan.

A jelentés számos eddigi kutatás eredményét, munkáját ismerteti, illetve veti fel azt, hogy szükséges egy nemzetközi protokoll ezen részecskék mennyiségi becslésére, hiszen az egyes kutatások eredményei igen eltérőek. Készült egy nemzetközi EU-s becslés, amit az eddig ismertett kutatási eredményekből alkottak meg. Ezek szolgálnak most protokoll számokként, kopási tényezőkként az ilyen fajta emissziós becslésekhez Európában.

A jelentés az említett faktorokból hármat emel ki: gépjármű/abroncs típusa, vezetési stílus és dinamika, gépjármű súlya, mérete. Ezen 3 tulajdonság szinte minden ebben a témában folytatott nemzetközi kutatásban becslések részét képezi. A becsléshez szükséges **kopási tényezőt** ezek alapján lehet kiszámolni.

A számításokhoz az abroncsok egyes tulajdonságait is figyelembe kell venni. Ilyen az abroncsok szélessége, profilmélysége vagy éppen az, hogy hány kerék található az adott járművön. Ezeket figyelembe véve ki lehet számolni a gumik koptatható vastagságát és a kopási tényezőt.

A jelentésben említést tesznek arról is, hogy a kopási tényező jelentősen változhat az útfelület fajtájától. 3 fő útfajtát határoztak meg: a városit, a vidékit és az országútít. Ezeknél a kategóriáknál jól látszik, hogy összességében az országúti viszonyok körülbelül fele annyi gumianyagot koptat el egy abroncsról, mint a másik két útváltozat. Persze ez a gépjármű fajtájától is erősen függ.

Mi is Hann Simon és társai (2018) kutatási jelentésében megfogalmazott számítási módszert vettük alapul, amelyben egy adott jármű által lekoptatott gumitörmelék éves mennyiségét a gépjármű évi futásteljesítménye (km) és a rá speciálisan jellemző gumikopási tényező (mg/jármű km) szorzataként kaphatjuk meg.

$$\text{kopásmennyiség} = \text{futásteljesítmény} \cdot \text{kopási tényező}$$

Az éves futásteljesítmény rendelkezésre álló statisztikai adatai (EUROSTAT) négy járműcsoportra vonatkoznak: a személygépjármű, a busz, a tehergépjármű és a motorkerékpár kategóriára. Ezek az adatok forgalomszámlálási módszerekből adódnak, nem egy adott ország forgalmi engedélyeinek számához kötődnek, ekképpen a külföldi rendszámú járművek közutakon való jelenléte is hozzáadódik. Márpedig a kopásmennyiség megállapításához éppen erre van szükségünk.

A szakirodalmi adatokat előzetesen nem figyelembe véve mi a következő vezérelvek alapján határoztuk meg a fenti négy fő járműkategória kopási tényezőit:

- *főkategóriákon belül több alkategóriát vizsgáltunk*
- *minél több adat az üzemeltetőktől származzon (szervizek, lízing cégek)*
- *tudatosan alábecsült kopásmértékkel számoltunk (a minimális profilmélység tekintetében nem a 6/1990.(IV.19) számú KÖHÉM rendelet alapján gondolkodtunk, mivel az üzemeltetők egyes biztonsági jogszabályok alapján szigorúbb kopáshatárokat adnak meg)*

Úgy gondoljuk, saját becslésünk pontosabb, mivel a lokális helyzetet sokkal inkább megközelíti. A gumicserek gyakorlati adatai magukban hordoznak plusz adatokat, a vezetési stílus, a sebességhatárok az útfelület típusok helyi jellemzőit is. Ezért lehet pontosabb, helyspecifikusabb a mi megközelítésünk!

A tanulmány alapján az Európai Unióban évente 554 314 tonna gumiszemcse törmelék keletkezik, Magyarországon ez a mennyiség évente 7729 tonnát jelent (Hann S. et al., 2018). Saját becsléseink alapján Magyarország útfelületein 2017-ben 6680 tonna gumiszemcse képződött. Eredményünk jó közelítést mutat a szakirodalomban protokoll értékekkel számolt becsléshez. A fentiek alapján feltehetőleg pontosabb értéket is kaptunk. (Urbán B. et al, 2021)

Gumiabroncsok kopási tényezőinek számítási táblázata												
Fő gépjármű kategóriák	Alkategóriák	Átlagos gumiméret	Teljes átlagos futófelület (cm²)	A futófelület elkoptatott vastagsága (cm)	Teljes elkoptatott gumimennyiség egy keréken (cm³*1,15g/cm³)	A kerekek száma (db)	Az abroncsok kifizetési ideje (km)	Forgalmi mennyiség (km/év)	Alkategóriák kopási tényezői (mg/jármű km)	Főkategórián belüli arányszámok (%)	A főkategóriák súlyozott kopási tényezői (mg/járműkm)	
Személygépkocsik	természetes személy tulajdonában	205/55R16	4070	0,5	2340	4	75000	15000	125	90,9	135	
	jogi személy tulajdonában	205/55R16	4070	0,5	2340	4	40000	30000	234	9,1		
Buszok	10-25 fő	205/75R16	4596	0,8	4228	6	55000	40000	461	24,6	582	
	25-40 fő	295/80R22.5	9666	1	11116	6	150000	60000	445	4,4		
	40 fő fölött	275/70R22.5	8259	1	9498	10	150000	53000	633	71		
Tehergépjárművek	3,5 tonnáig	215/65R16	4543	0,5	2612	4	80000	110000	131	92,4	802	182
	3,5-5 tonna	205/75R16	4596	0,8	4228	6	55000	40000	461	1,1		
	5-7,5 tonna	265/70R19.5	7208	0,9	6487	6	80000	40000	487	2,4		
	7,5-10 tonna	315/70 R22.5	10010	0,95	10936	6 és 10 (8)	80000	40000	1094	1,7		
	10 tonna fölött	315/70 R22.5 385/65R22.5	10010 12899	0,95 0,7	10936 10384	10-12-...	120000	240000	1066	2,4		
Motorkerékpárok		120/70R17	2261	0,35	911	2	12000	6000	152	100	152	

1. táblázat Kopási tényezők számításának táblázata (Urbán B. et al., 2021)

Gépjármű kategóriák	A kategóriák kopási tényezői (mg/jármű km)	Futásteljesítmény (millió km) Eurostat adatbázis	Lekopott gumimennyiség (t)	Források
Személygépkocsik	135	30245	4083	KIA lízing, marso.hu, autószerelő
Buszok	582	719	418	hankooktire.com; intertanker kft. Szerelő, kisvállalkozó
Tehergépjárművek	182	11596	2110	hankooktire.com, kamionsofőr, ford.hu, mercedes.hu, Tűzoltóság
Motorok	152	456	69	marso.hu, motorrevu.hu, gumiteszt.com vaslovasok.hu
	A magyarországi közutakon termelődött gumiszemcsék mennyisége 2017-ben		6680 tonna	

2. táblázat Éves gumiterhelés becslése (Urbán B. et al., 2021)

4.2.1 Lakosság-, és úthossz arányú gumikopás értékek

Saját és a szakirodalmak által becsült adatokat össze lehet vetni lakosság, illetve úthossz arányosan is. Számításaink alapján 2017-ben **6680 tonna** gumiszemcse keletkezett magyarországi közutakon. Ezen év végén a nyilvántartott adatok szerint az ország kiépített közútjainak teljes hossza 31729 km volt (KSH). Egy km úthosszra így *210 kg*, száz méterenként *21 kg* gumiőrlemény jut országosan egyenletes eloszlásban. Ez az érték teljes egyezésben van az Európai Gumigyártók Szövetsége által megjelentetett kutatási összefoglaló erre vonatkozó adatával (Jekel M. et al, 2019). Magyarország lakosság száma pedig 9,789 millió fő volt a 2017-es évben. Ez alapján *0,68 kg/fő/év* a lakosság alapú gumiszemcseterhelés értéke.

Ez az érték a CEDR 2018-as jelentése alapján *0,23 – 4,7 kg/fő/év* között változhat, a globális átlag *0,81 kg/fő/év* (CEDR-Report, 2018). Martin Jekel jelentésében is *0,81 kg/fő/év* globális átlag van megjelölve a CEDR 2018-as jelentése alapján (Jekel M. et al., 2019). Egy szintén 2018-as kutatás alapján pedig ez az érték *1,8 kg/fő/év*; a kutatásban a Szajna mikrogumiszemcse terhelését modellezték (K. M. Unice et al., 2019, Part 1-2).

3.3. Az abroncsok alkotói, tulajdonságai

Projektünk során a gumiszemcsék elkülönítése, mintáinkból való szeparálása egy fontos lépés. Az összes gumiszemcsét ki kell nyernünk mintáinkból, azonban a többi szennyezőt valahogy ki kell zárunk. A TRWP vizsgálatoknál arra is szükségünk van, hogy tudjuk milyen alkotókból áll az általunk vizsgált gumianyag, részben azért, hogy be tudjuk azonosítani jelenlétét, vagy a többi szennyezőt vizsgálva a gumit ki tudjuk zárni.

A gumiabroncsok önmagukban is összetett anyagok, ugyanis a gyártásuk során oda kell figyelni arra, hogy kellően ellenálló legyen, illetve megfelelő tapadást nyújtson a biztonságos közlekedés érdekében. Egy autógumi 40-50 m/m %-át teszi ki az alap összetevő, a (kaucsuk) gumi polimer, amely izoprén (C₅H₈) egységekből áll. Töltőanyagként szolgál a korom, a szén (C), a szilícium-dioxid (SiO₂), valamint a kalcium-karbonát (CaCO₃), amely 30-35 m/m %-ot alkot. Az abroncs lágyítása érdekében gyantát és olajat kevernek hozzá kb. 15 m/m % arányban. Ezen felül, a vulkanizációhoz szükséges anyagként kerül bele még 2-5 m/m %-nyi kén (S) és cink-oxid (ZnO). A további 5-10% változó adalékanyag, ami függ a gyártótól és a gumiabroncs típusától. (F. Sommer et al., 2018)

3.4. TRWP-Tyre and Road Wear Particles

„TWP (Tyre Wear Particles): a gumiabroncsok kopásából származó, gépjárművezetés közben termelődő szemcsék.

TRWP (Tyre and Road Wear Particles): gumiabroncs kopásából származó gumidarabok tartalmaznak részecskéket az útfelületről vagy közúti porból, ezek együttesen alkotják a TRWP-t” (Jekel M. et al., 2019).

Vagyis, az abroncsokról, amelyek autóvezetés közben kopnak, kisebb-nagyobb szemcsék szakadnak le, ezek neve TWP. Amint ezek a gumiszemcsék az útfelülettel érintkeznek, mechanikai, kémia és környezeti hatásoknak köszönhetően összetapadnak az úton található egyéb szennyezőkkel. Az így keletkezett szemcsék, aggregátumok neve a TRWP.

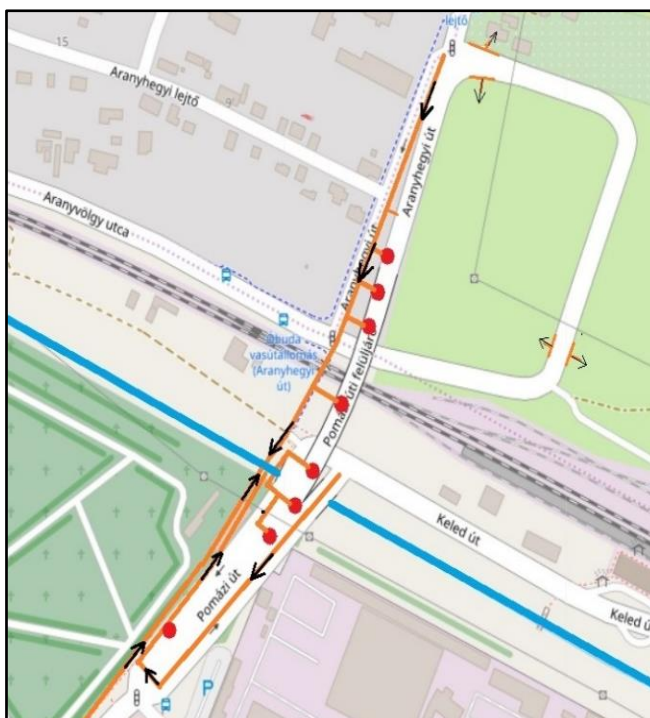
A TRWP szemcsék mérete széles skálán mozog. A gumiszemcsék lehetnek makro-, mezo-, mikro-, nano plastik kategóriájúak. Az aggregátumok (TRWP) kisebb mérettartományban jellemzőek, általában 0.5 és 1000 mikrométer közé tehetőek. Alakjuk változatos, gömbök, szabálytalan részecskék, szálak, filmek jellemzik. Bármilyen színben megjelenhetnek (Jekel M. et al., 2019).

Sűrűségük megítélése nehéz dolog, hiszen nem mindig ugyanolyan arányban tapadnak meg az egyes szennyezők a gumiszemcséken. K. M. Unice és társai kutatása 2019-ben megállapította modellezésük keretein belül a TRWP szemcsék sűrűségét, amely jelentésük szerint 1,002 – 1,8 g/cm³ (K.M. Unice et al., 2019).

4. A KUTATÁSI HELYSZÍN MEGVÁLASZTÁSA ÉS JELLEMZÉSE

„A mérési helyszín kiválasztásánál több szempontot vettünk figyelembe. Elsődleges kritérium volt, hogy az adott útfelületekről a csapadékvíz elvezetése döntően élővízbe történjen. Így mindenképpen patakok vagy a Duna fölött átívelő, illetve azzal párhuzamosan futó útszakaszokra kellett gondolnunk. Ugyanilyen fontos volt, hogy a vízvezetés elkülönített és egyben átlátható rendszerű legyen, továbbá, hogy az egyes lefolyási szakaszok a víz és a szállított üledék szempontjából mintázhatók legyenek.”

(Urbán B. et al, 2021)



1. ábra Helyszín - M 1:7500 (Urbán B. et al., 2021)

„Mivel a forgalom mértéke és a forgalom dinamikája szerint is mérhető különbségeket kívántunk kimutatni, lényeges volt a helyszín ilyen típusú differenciáltsága is. Ezen elvek alapján választásunk a Budapest III. kerületében, Óbudán található Pomázi úti felüljáróra és közvetlen környezetére esett. A felüljáró megépítése és a környező utak, valamint a vízvezetések kialakítása a Budapest-Esztergom vasútvonal teljes felújításának keretében történt. Átadására 2016 tavaszán került sor. A híd teljes szerkezete 176 m hosszú, 9 pilléren ível át az Aranyhegyi-patak és a vasútvonal felett. A forgalom kétszer egy sávon zajlik. A híd mindkét végén a haladás zökkenőmentességét egy-egy forgalmi jelzőlámpa akadályozza. Ezen utóbbi helyzet miatt a gumik feltehetőleg itt nagyobb terhelésnek vannak kitéve.” (Urbán B. et al, 2021)

„A felüljáró pilléreken fekvő szakaszáról az alátámasztások mentén PVC (Ø 160mm) idomok vezetnek le az esővizet a talajszinten lévő rácsos elnyelőig. Kifutásuk szabad végű, így ez által ezeken a pontokon lehetséges a mintavételezés. A végeken lévő rézsús szakaszokról az út közepén futó mélyszinti gyűjtőbe áramlik a széleken elhelyezkedő víznyelők vize és hordaléka. A mellékutak vízgyűjtése hasonlóképpen működik. Az egyesülések után a csapadékvíz öt főhelyen ömlik be kommunális szennyvíz keveredése nélkül az Aranyhegyi-

patakba. Ez alól kivétel a felvezető köríves út felülete, ahonnan oldalsó kivezetők juttatják a csapadékvizet a környező alacsonyabban lévő területekre. A felszín alatt futó csatornarendszer egy-két helyen az aknákon keresztül hozzáférhető, így a mintázás itt is lehetséges. Ezeken túl már csak a patak árok részűjében kibukkanó csővégeken tudjuk ezt megtenni.” (Urbán B. et al, 2021)



2. ábra Mintázható PVC lefolyócsővégek (Urbán B. et al., 2021)

5. KORÁBBI TDK MUNKÁNK A TÉMÁBAN

Projektünk első szakaszában alapkutatásunk jelentős eredményeket mutatott fel az útfelületekről a felszíni élővizekbe bemosódó autógumi-szemcsékkel kapcsolatban. Gyakorlati módszereket dolgoztunk ki és alkalmaztuk azokat a mintavételezés, az üledékszeparálás és a szemcsék beazonosítása terén. Igazolni tudtuk azt a szakirodalomban eddig csak matematikai modellezéssel meghatározott százalékos arányszámsort, amely az útfelületi lemosódástól a kiülepedésen át az első nagy befogadóiig követi az élővizek üledékeibe kerülő mikroszemcsék sorsát a 0,1-2mm közötti mérettartományban. A közutakon termelődő gumiszemcsék mennyiségi becslését is (korábban már bemutattuk) a kutatás első fázisában végeztük el. Ebben a fejezetben az alapkutatás fontos eredményeit szeretnénk részletezni.

5.1. Mintavételezési módszerek

„A mikroműanyagokkal, így a gumiszemcsékkel kapcsolatos mintavételi megoldások tökéletesítése, a minták laboratóriumi feldolgozása, a szemcsék mennyiségi és minőségi meghatározásához leginkább megfelelő eljárások kidolgozása mind-mind megannyi tudományos kérdést vet fel. Jelenleg még nem alakultak ki a folyamat minden részletére kiterjedő protokoll eljárások.” (Urbán B. et al, 2021)

Kutatásunkban az üledékek mintavételezésével foglalkoztunk behatóan. Mintákat vettünk a felüljáró középső tartományán a hídpillérek mentén lefutó, szabad végződésű PVC csatornaelemekből; az általunk telepített koaleszcens szűrőadapterekkel; illetve a felüljáró alatt húzódó Aranyhegyi-patakából is.

5.1.1. PVC lefolyócső mintavételezése

„Az útfelületekről a csapadékvízzel lemosódó szilárd szemcsék, így a gumiszemcsék mintavételezése két féle mátrixban, két eltérő közegben történhet. Egyrészt a leáramló vízből, másrészt a több ponton lerakódó üledékből. Mi a kisebb esőkkel lemosódó üledékmintákat elemeztük. A kevés eső miatt a csővégeket átbukós rendszerrel zártuk le, amely meggátolja az üledék kiáramlását szemben a kis mennyiségű vízzel. A felgyülemlett üledéket a legtöbb csővégből csaknem teljesen mennyiségben be tudtuk gyűjteni. Két esetben a hosszabb vízszintes csővégből csak részlegesen tudtunk mintázni.” (Urbán B. et al, 2021)



3. ábra Csővég mintázása átbukós feltétellel (Urbán B. et al., 2021)

5.1.2. Szűrőadapteres mintavételezés

Szűrőadapterként a PURECO Kft. által kifejlesztett ENVIA CRC5 szűrőt alkalmaztuk. Ez egy víznyelőkbe telepíthető, csapadékvíz tisztítására alkalmazott hordalék- és könnyűfolyadék leválasztó berendezés, amely beépítésének legfontosabb célja, hogy az útfelületekről lemosódó szénhidrogén-származékok mennyiségét a tisztítás után 5 mg/l SZOE értékig csökkentse le.

„Közös terepbejárás után a cég szakemberei vállalták a meglévő helyszíni víznyelő típusba beépíthető szűrő elkészítését. A tervezés és a prototípus elkészítése után a termék már sorozatgyártásba került. A forgalmi helyzetet figyelembe véve két szűrő került behelyezésre. A gumikopásnak leginkább kitett helyeken, a felüljáró lejtőjének két végén, egy közlekedési lámpa előtt, valamint egy kanyarodósávnál tudunk ezekkel mintát venni.” (Urbán B. et al, 2021)



4. ábra Szűrő telepítése (Urbán B. et al., 2021)

5.2. A minták laboratóriumi vizsgálata

„A munka komplexitásából adódóan két területre kellett bontani feladatainkat. Foglalkoznunk kellett azzal, hogy a begyűjtött üledékmintákban lévő frakciókat hogyan tudjuk egymástól elkülöníteni. Másrészt megoldást kellett találnunk arra, miként tudjuk azonosítani a leválasztott mikrogumi darabokat.” (Urbán B. et al, 2021)

5.2.1. Üledékminták előkészítése, szeparálása

Feladatunk a nagyobb, milliméteres gumiszemcsék szeparálása az üledékmintákból, ami rendkívül idő és munkaigényes feladatnak bizonyult. Az eljárás a fizikai sűrűségkülönbség elvén alapszik. (Urbán et al., 2019)



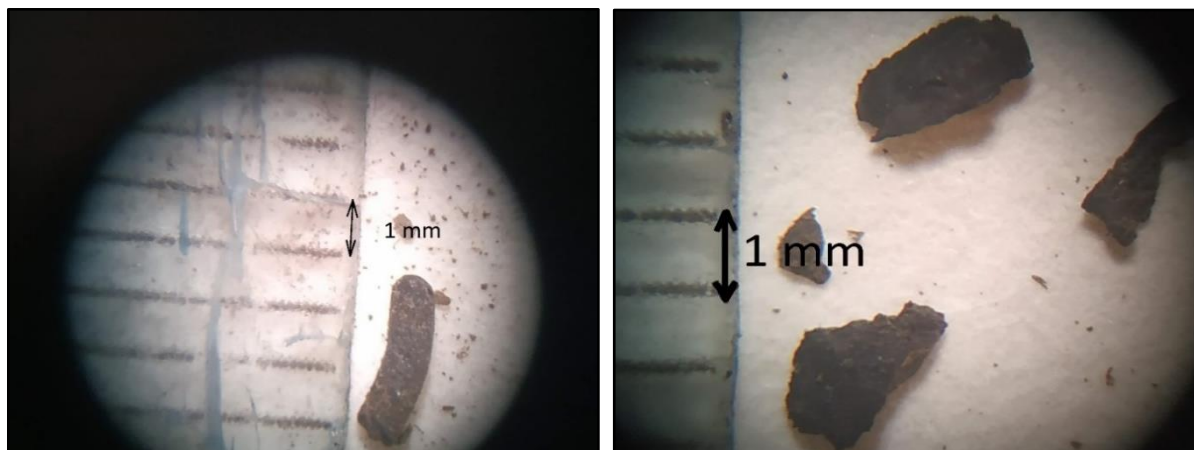
5. ábra Üledékminták (Urbán B. et al., 2021)

„Első lépésként előkészítettük az üledékmintákat, amelyeket a célterületről vettünk. Következő lépésként 105 °C -on való szárítás után meg kellett határoznunk a minták tömegét grammban, táramérleg segítségével. Az így kapott mintánkat egy nagy 1l-es főzőpohárba tettük és felöntöttük vízzel, hogy a növényi részek és az egyéb víznél könnyebb anyagok felússzanak a felszínre. A megmaradt üledékmintákhoz tömény sósavat adtunk, hogy a benne lévő karbonátos közetszemcsék (mész, dolomit) jelentős részével reakcióba lépjen és ez által eltüntesse azokat. Az így kapott sósavval kezelt mintát $1,3\text{g/cm}^3$ sűrűségű Fe(III)-kloridos oldattal szeparáltuk, ami azt eredményezte, hogy az üledékből a gumiszemcsék felúsztak a felszínre, mivel a sűrűségük megközelítőleg $1,2\text{g/cm}^3$. A felúsztatott és az ülepedő anyagok között jól látható a különbség, ezért jól lehet őket szeparálni. A felső és alsó „réteget” elkülönítettük és szűrőpapírok segítségével megszűrtük ugyanúgy, mint ahogy a vízben felúsztatott részeknél tettük. Ezeket a felúszott részeket szűrőpapíron átmostuk, szárítószekrénybe tettük, ideális

(105°C) hőmérsékleten szárítottuk. Kiemelendő, hogy a gumidarabokat nem roncsolják a folyamat során említett anyagok. Tömény sósavval és vas-klorid oldattal is kezeltük a gumidarabokat több napon keresztül. Az áztatás után semmilyen felszíni, vagy anyagbeli roncsolódást nem tapasztaltunk.” (Urbán B. et al, 2021)

5.2.2. Mikroszkópi vizsgálatok

„Miután mintáinkat előkészítettük, vagyis csökkentettük azok szervesanyag-tartalmát, eltávolítottuk a nehezebb frakciókba tartozó aszfaltdarabokat, illetve sósavval reagáltattuk a karbonátos szemcséket, megkezdődhet a gumiszemcsék keresése. Ezt mások spektroszkópos technikával (WESSLING, 2018) végezték a mikroműanyagok keresésénél, azonban mi az autógumidarabok esetében találtunk egy egyszerűbb, ámde biztos módszert. Az előkészített mintákban sztereo-mikroszkóp segítségével kerestük a gumiszemcséket. Ugyanis a műmintánk vizsgálata során észrevettük, hogy fizikai és morfológiai módszerekkel is ki lehet mutatni a gumidarabokat a többi részecske közül.” (Urbán B. et al, 2021)

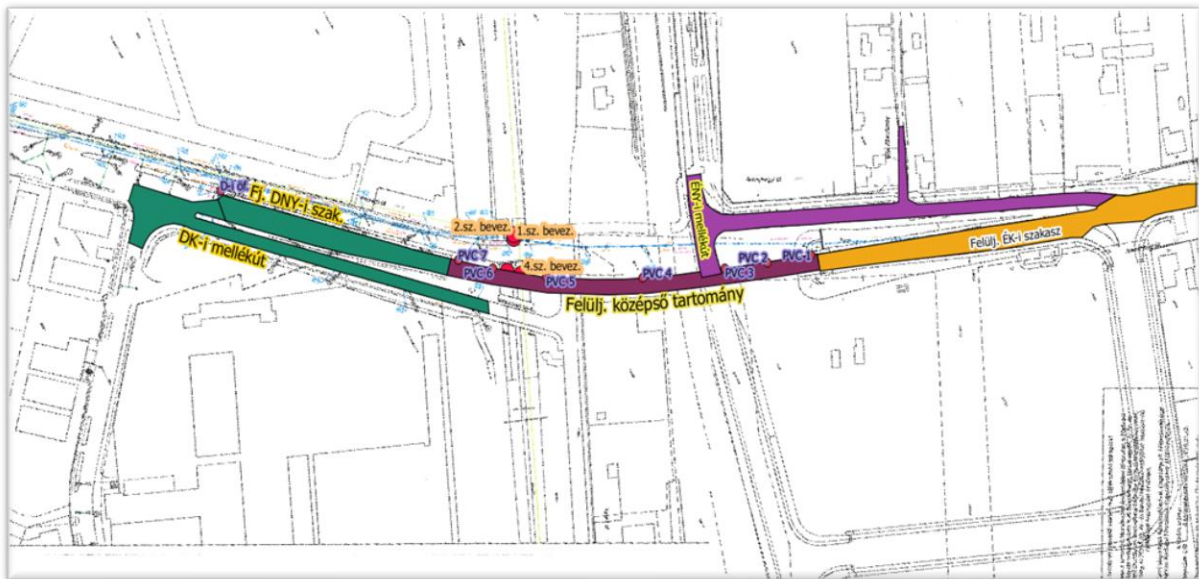


6. ábra Gumidarabok sztereo-mikroszkóp alatt (Urbán B. et al., 2021)

„Az autógumi fizikai adottságai igencsak egyedülállóak, különböznek a többi természetben megtalálható anyagtól. Ilyen a rugalmassága is. Először mindig morfológiailag azonosítjuk őket, ezt a műminták elemzéséből adódóan tudjuk megtenni, majd ezután jön rugalmasságának vizsgálata. Ezt egy tű segítségével, nagyon egyszerűen el tudjuk végezni. A gumi a sötétebb kvarcsezemcsék, a bitumendarabok, a rovarpáncélok viszonylatában eltéveszthetetlen, a rugalmassága alapján a leginkább megkülönböztethető a többi részecskétől. Vannak olyan esetek, amikor már ezek nélkül is szinte biztosak lehetünk, hogy gumit találtunk a mintánkban. Például ilyen, amikor az új autógumikon lévő kis hengeres darabkával találjuk szembe magunkat a mikroszkóp okulárjában, vagy amikor centiméteres, jól azonosítható gumidarabot találunk mintánkban.” (Urbán B. et al, 2021)

5.3. Térinformatikai elemzés

„Projektünk fontos tétele volt, hogy mennyiségi adatokkal szolgáljunk az útfelületekről közvetlenül lemosódó, a szállítódó és kiüledő gumiszemcsékkel kapcsolatban. Ebben jelentős tényező az egyes útfelületek mérete. A részterületek lehatárolásában, a méretek megállapításában nyújtanak segítséget a különböző térinformatikai szoftverek. A méretadatok természetesen nem geodéziai pontosságúak, az arányszámok megállapításában azonban tökéletesen megfelelő értékeket kaphatunk a használatukkal.” (Urbán B. et al, 2021)



7. ábra A vizsgálati terület egységei (Urbán B. et al., 2021)

„Munkánkban a nyílt forráskódú **QGIS** program 2.18-as változatát használtuk. A tereppontok felvétele a fenti szoftverrel kompatibilis Garmin e-trex 10-es GPS-vevővel, valamint poláris koordináta beméréssel történt egy **LEICA Sprinter 50** digitális szintező segítségével. Az 1:1000-es méretarányú alaptérkép Fővárosi Csatornázási Művek adattárából származik.” (Urbán B. et al, 2021)

„A Pomázi úti felüljárót és a hozzá tartozó kiszolgáló utak felületét a forgalomban betöltött szerepük és a mintavételi lehetőségek szerint tagoltuk részegységekre. A víznyelők és aknák lefolyási kapcsolatai a terület D-i részén az alaptérkép adatai alapján teljesen tisztázottak, az általunk D-i öf. aknának nevezett ponton a felület víz és üledék szempontjából is mintázható. A csapadékvíz az 1-es és 2-es számú bevezető csöveken keresztül jut el az Aranyhegyi-patakba. A 3-as és 4-es bevezető pontokon a felüljáró közepső tartományára hulló csapadék jut el az élővízbe. A vizsgált terület közel **7000 m²**-es, az átlagban 1500 m² nagyságú részfelületekkel kapcsolatban itt is megjegyzendő, hogy az ezekről leáramló csapadékvíz mintázásához (1.5-2

m³ alkalmanként) legalább 3 mm egyszeri csapadékmennyiség szükséges.” (Urbán B. et al, 2021)

5.4. Az üledékminták eredményeinek értékelése

5.4.1. A lefolyók üledékeinek vizsgálata

„Összesen 2 sor mintát tudtunk venni a lefolyókból. Az egyiket 2019.04.06.-án, a másikat 3 napra rá 2019.04.09.-én. Ezeket mind a két estben eső után vettük. Az első mintavétel előtt 24 nappal megelőzően volt eső, amely bemosta a gumidarabokat a csatornába. Ennél a mintánál a csapadék mennyisége 3 mm volt. A második mintázásnál csak 3 napot kellett várni az esőre, amely 5 mm-nyi vizet hozott. Ezek a szempontok az elemzés során nyernekel értelmet, mert ezek alapján tudjuk az összefüggéseket felfedezni mérési eredményeinkben. Nem csak az időjárási tényezőket vettük figyelembe, hanem a területi eloszlást, lejtést és a csatornázást is.” (Urbán B. et al, 2021)

Mintavételezésünk a felüljáró középső szakaszának nyolc mintavételi pontján (7+1) történt. A mérési eredményeket az alábbi táblázatban összegeztük. Ebben jelöltük a minta helyét, idejét, a csapadékmennyiséget és a laboratóriumi mérés eredményeit is.

A lefolyó sorszáma	A mintavétel időpontja	A mintázott hordalék tömege (g)	Bemosási esőmennyiség (mm)	Utolsó esős nap óta eltelt idő (NAP)	Gumiszemcsék száma
1	2019.04.06	70,00 (teljes minta)	3	24	N-2 K-0
2	2019.04.06	8,90 (teljes minta)	3	24	N-3 K-2
3	2019.04.06	1,22 (teljes minta)	0	24	N-0 K-0
4	2019.04.06	0 (teljes minta)	3	24	N-0 K-0
5	2019.04.06	12,50 (teljes minta)	3	24	N-1 K-0
6	2019.04.06	144,20 (teljes minta)	3	24	N-2 K-4
7	2019.04.06	57,50 (részleges minta)	3	24	N-0 K-0
Déli összefolyás	2019.04.06	42,40+44,5 (részleges minta)	3	24	N-1 K-0
1	2019.04.09	31,04g	5	3	0
2	2019.04.09	200,00g	5	3	15
3	2019.04.09	96,52g	5	3	16
4	2019.04.09	0,50g	5	3	0
5	2019.04.09	8,20g	5	3	8
6	2019.04.09	129,13g	5	3	12
7	2019.04.09	30,50g	5	3	7
Déli összefolyás	2019.04.09	100,00g	5	3	2

3. táblázat Az 1. és 2. üledékminta-sor mérési eredményei (Urbán B. et al., 2021)

„Ezt követően átszámoltuk, hogy 1 kg üledékre nézve ez hány darab gumiszemcsét jelent. Egészen meglepő eredmények is születtek, volt olyan lefolyó, amiben 976 db is lehet akár 1000 grammonként.” (Urbán B. et al, 2021)

2019.04.06		alap	/db	1 kg	/ db
1		70,00	2	1000,00	29
2		8,90	5	1000,00	562
3		1,22	0	1000,00	0
4		0,00	0	1000,00	0
5		12,50	1	1000,00	80
6		144,20	6	1000,00	42
7		57,50	0	1000,00	0
8		86,45	1	1000,00	12
2019.04.09					
1		31,04	0	1000,00	0
2		200,00	15	1000,00	75
3		96,52	16	1000,00	166
4		0,50	0	1000,00	0
5		8,20	8	1000,00	976
6		129,13	12	1000,00	93
7		30,50	7	1000,00	230
8		100,00	2	1000,00	20

4. táblázat Gumimennyiség 1000g üledékben (Urbán B. et al., 2021)

„Az egységre vonatkoztatott értékek ismeretében belekezdhattünk a konklúziók levonásába. A 4.-es számú lefolyó egyetlen mintájában sem volt gumiszemcse. Ez a pont a híd közepén van, ennek a legkisebb a területe, ahonnan esőt kap, illetve mindkét irányban lejt. Ennek a részen a legkisebb az abroncsokat érő fizikai terhelés, illetve az itt lerakódó gumidarabok lemosódnak a lentebb lévő lefolyókhoz. Olyan minta amelyikben mind a kétszer jelentős gumimennyiséget találtunk kettő is volt. A 2. és az 5. számú lefolyóban az előzőek alapján valószínűleg a 4. rész lefolyásából adódóan halmozódnak fel. Ide áramlik le eső idején az ott is felgyülemelő szennyeződés, ezért jóval több ezekben a mintákban a gumidarabok aránya. A legtöbb szemcsét az 5. számú lefolyó tartalmazta. Ez a híd egyik legnagyobb dőlésszögű része, ahova nagy arányban folyik a csapadékvíz, illetve ehhez tartozik a legnagyobb felület, 252 m². Eddigi méréseink alapján ez tekinthető a legterheltebb résznek a felgyülemelő autógumi szempontjából a maga **976** darabjával.” (Urbán B. et al, 2021)



8. ábra Felüljáró gumiszemcse-terhelése (Urbán B. et al., 2021)

„A két mérés eredményssora között igen nagy eltérés figyelhető meg. Ennek is megvan a magyarázata, amely az időjárásban keresendő. Az első mintavétel előtt 24 napig nem esett csapadék, vagyis nagyon sok szennyeződés gyülemlt fel. Ugyanakkor viszonylag kis mennyiségű csapadék esett, ami kevésnek bizonyult az összes szennyeződést lemosni és átvinni ezt a csatornarendszeren. Ezután 3 napra rá jött egy kicsit nagyobb intenzitású eső, amely már képes volt ezt a megkezdett munkát befejezni. Ennek vízhozama volt képes átöblíteni a csatornarendszert, ezért volt az utóbbi mintasorozatban sokkal több a gumiszemcsék mennyisége.” (Urbán B. et al, 2021)

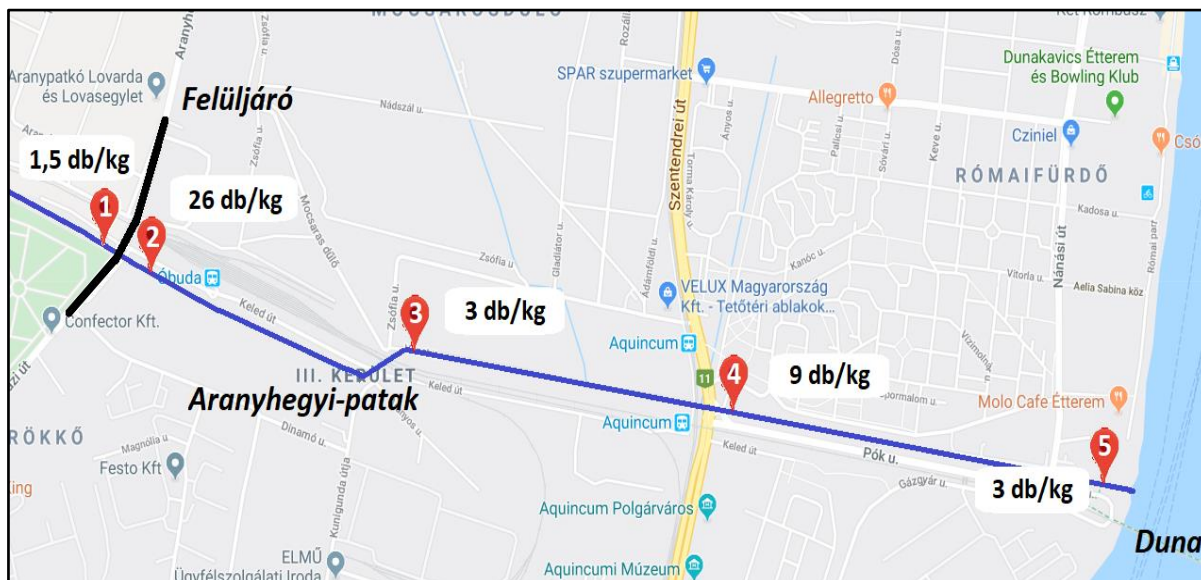
A felüljáróról közvetlenül lemosódó gumiszemcsék darabszáma a 0,1 mm fölötti frakcióban természetesen jelentősen függ az útfelületeket lemosó csapadék mennyiségétől. Méréseink alapján 3 mm eső átlagosan **25db/1kg** üledék, míg 5 mm folyamatos csapadék **184 db/1kg** üledék értéket produkált 1000 m² útfelületről (Mészáros et al., 2019).

5.4.2. Az Aranyhegyi-patak üledékmintáinak vizsgálata

„A Pomázi úti felüljáróról a lemosódó csapadékvíz a kiépített csatornarendszerbe, majd onnan az Aranyhegyi-patakba folyik. Ezt, helyszíni megfigyeléseink és az FCSM által biztosított csatornázási térkép támasztja alá. Vizsgálatunk szerint az útfelületekről közvetlenül lemosódó üledék tartalmaz gumiszemcséket. Joggal feltételeztük, hogy a patakrézsűben elhelyezkedő kifolyókon keresztül ezek a patakba jutnak. Ezen vizsgálatunkkal arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a földalatti csatornaszakaszok ülepítői milyen mértékben működnek, illetőleg a patak Dunáig terjedő mintegy 2,5 km hosszú szakaszának egyes pontjain milyen mértékben van még jelen a gumitörmelék. Összesen 5 mintavételi pontot jelöltünk ki a patak mentén, átlagosan 500 méterenként.” (Urbán B. et al., 2021)

„Az első mintavételi pontunk a patak felüljárót megelőző szakaszán található, a befolyási pontoktól mintegy 10 méterre. A második közvetlenül a felüljáró után. Ennek kijelölésénél fontosnak tartottuk, hogy ne közvetlenül a bevezető pont alól vegyünk mintát, ugyanis az esőzés által megnövekedett és turbulensé vált vízben a gumiszemcsék lassabban ülepednek ki. Végül a bevezető csőtől körülbelül 25 méterre történt az iszap mintavétele. A harmadik mintavételi pontot a patak lassúbb, nyugodtabb részén jelöltük ki. Itt nincs utánpótlási lehetőség, ahonnan autógumi szemcsék kerülhetnének a patak vizébe. A negyedik mintavételi helyet közvetlenül a Szentendrei út után találtuk. A csatornázási térkép alapján a főútról az esővíz a patakmeder alatti főgyűjtőbe folyik, nem közvetlenül a patakba. Terepbejárásunk során, viszont találtunk két esővíz elvezető csövet, amelyek az ott lévő vasútállomás környezetéből juttatják a vizet a

patakba. Az utolsó mintavételi helyszínünk a patak torkolatában volt, esetleges gumi utánpótlás csak a Pók utca - Nánási út sarkán lévő útátvezetésnél lehetséges.” (Urbán B. et al, 2021)



9. ábra Az Aranyhegyi-patak mintavételi pontjain mért gumiszemcse terhelések (Urbán B. et al., 2021)

„A mintákat az előzőekben taglalt módszerekkel dolgoztuk fel, az üledékek gumiszemcse tartalmát 1 kilogrammra vetítve számoltuk ki. A befolyás előtti első pontnál 1 kg iszapban átlagosan 1,5 darab autógumi szemcse található. Ez alapján a patak szennyeződik a felüljáró előtti szakaszon is (ürömi körforgalomnál). A második ponton, az esővíz bevezetés után az iszap 1 kilogrammonként 26 db szemcsét tartalmaz. Ez a legmagasabb mért eredményünk. Jól látszik, hogy ez forrása a szennyezésnek, ugyanakkor az eredmény elmarad a lefolyóvégeknél tapasztalt értékektől. A felszín alatti ülepítő medencék ezek szerint részlegesen töltik be funkciójukat.” (Urbán B. et al, 2021)

„Harmadik mérési pontunkon 3 db gumiszemcsét találtunk 1 kg iszapban. Ez a csökkent érték a gumiszemcsék kiülepedésének lehetőségét mutatja, mintegy 500 méterrel a szennyezőforrás után. A negyedik mintavételi pontunkon kilogrammonként 9 db szemcsét találtunk, ami növekedést mutat az előző ponthoz képest. Mivel a Szentendrei út felületéről nem érkezik utánpótlás csak a vasúti megálló környezetét okolhatjuk a némileg nagyobb mért értékért. Itt érdemes megemlíteni, hogy a Szentendrei út több sávós, jóval nagyobb forgalma ellenére a patak közvetlenül nem szennyeződik, mivel innen az esővíz az általa szállított üledékkel a főgyűjtőbe kerül. Az utolsó, Duna előtti mintavételi ponton 1 kilogramm iszap 3 db

gumiszemcsét tartalmazott. Ezen utolsó pár száz méteres szakaszon újabb kiülepedési lehetőség mutatkozott.” (Urbán B. et al, 2021)

Eredményeink alátámasztották feltételezéseinket (Urbán B. et al, 2021):

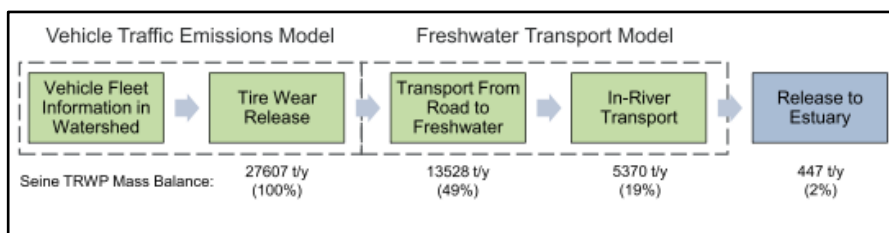
- *Az autógumi szemcsék a felüljáróról bejutnak az Aranyhegyi-patakba*
- *A gumiszemcsék folyamatosan ülepednek, ezért jelen vannak a patak üledékében*
- *A 2,5 km-es patakszakasz nem tudja teljes mértékben kiülepíteni a gumiszemcséket, tehát a Duna innen is kap mikroműanyag utánpótlást*

„Egy 2019-ben kiadott tanulmány (K. M. Unice et al., 2019) matematikai modellezés segítségével számszerűleg vizsgálta a közúti mikrogumi-szemcsék további sorsát. A Szajna vízgyűjtő területére vonatkoztatott százalékos arányok feltehetőleg nem ültethetők át más területekre a helyi sajátosságok figyelembevétele nélkül, mégis jó támpontot nyújthatnak. Ezek alapján az útfelületen képződött szemcsék 49%-a mosódik le a csapadékvizekkel, 19%-a kerül folyóvízi környezetbe és 2-5%-a érkezik meg a helyi fő üledékgyűjtőbe, a Szajna esetében az óceánba, a mi esetünkben nagyobb tavainkba, ill. ebben az értelemben „végállomásnak” tekinthető Dunába és Tiszába. Az arányok az üledékben szállítódó, és abban időlegesen, vagy véglegesen kiülepedő szemcsefrakció eloszlását mutatják, de utalást tesz a lebegőállományban maradókra is (0,2-0,5%), (Urbán B. et al, 2021) amelyekre dolgozatunkban később mi is kitérünk.

„A tanulmány az útfelületen termelődő mennyiségből kiindulva (100%) az élővizekbe való eljutás arányát 18%-ra, míg a torkolati gumimennyiséget 2%-ra teszik. Saját mérési eredményeink alapján ezen meghatározott értékeink

(184 db: 26db: 3db → 100%: 14%:1.6%)

meglepően jó egyezést mutatnak az eddig csak elméletben meglévő arányszámokkal!” (Urbán B. et al, 2021)



10. ábra Transzport modell (K.M. Unice et al., 2019)

6. JELENLEGI KUTATÁSUNK

Az élővizekbe kerülő gumidarabok sűrűségük miatt döntően kiülednek és az aljzaton lévő hordalékkal sodródnak tovább. A 100 μm alatti szemcsék azonban másként viselkednek. A bemosódó szénhidrogén származékokkal, valamint egyéb szemcsékkel aggregátumokat alkotva, a víz tetejére felúszva haladhatnak tovább a táplálékláncot tekintve jóval nagyobb veszélyeket magukba rejtve.

Jelenlegi kutatásunk ezen kisebb mikrométeres mérettartományú szemcsékkel foglalkozik.

A korábbiakhoz hasonlóan ebben a mérettartományban is a **mintavétel**, valamint a mikrogumi-szemcsék morfológiai **beazonosítása** volt az elsőrendű feladatunk. Célunk volt, hogy mi is beazonosítsuk a szakirodalmak által említett útanyag és gumiszemcse aggregátumokat (TRWP) A szemcsék keresését fénymikroszkóppal morfológiai úton végeztük, a TRWP aggregátumokat pedig műszeres analitikai módszerrel vizsgáltuk.

A mintavételezésre rendelkezésünkre álló szűrővel kapcsolatban a minták biztosításán túl a **CRC szűrő modell vizsgálat** gondolata vetődött fel. Ezzel egyrészt a gumiszemcsék viselkedését kívántuk elemezni egy „olaj a vízben” típusú közegben, másrészt pedig ezen speciális leválasztó rendszer hatékonyságáról szeretnénk volna meggyőződni a mikroszemcsék szempontjából.

A kutatás legújabb és legfontosabb célja, egy olyan **ülepítőberendezés** megalkotása volt, amely alkalmas a mikrométerű gumiszemcsék részleges ülepítésére, illetve városi környezetben is könnyen tudjuk adaptálni a már meglévő vízelvezető rendszerekbe.

6.1. Szűrőmodell vizsgálatok

6.1.1. A modellezés szükségének indokai

A korábbiakban említett módon lehetőségünk volt a PURECO Kft. által kifejlesztett ENVIA CRC5 szűrőt mintavételi eszközként alkalmazni. Ez egy víznyelőbe telepíthető, csapadékvíz tisztítására alkalmazott hordalék- és könnyűfolyadék leválasztó berendezés, amely beépítésének legfontosabb célja, hogy az útfelületekről lemosódó szénhidrogén-származékok mennyiségét a tisztítás után 5 mg/l SZOE értékig csökkentse le. A Budapest környéki négyéves visszatérési idejű 2741/s/ha maximális intenzitású záporral számolva 200-250 m^2 –nyi felületről 5 l/s teljesítménnyel képes ezt a kibocsájtási értéket biztosítani.

Ezen leválasztó modelljének megépítésével a 80 μm alatti gumiszemcsék „viselkedését” kívántuk tanulmányozni egy olyan ülepítő térben, amelyben az olajcseppeket egyesítő és felúsztató koaleszcencia mechanizmusa is működik, lévén a berendezés fő alkotórésze egy koaleszcens betét. Arra voltunk kíváncsiak, hogy az 1, 15-1,2 g/cm^3 sűrűségű, néhányszor tíz mikrométeres gumiszemcsék miként ülepednek, esetleg úsznak fel egy „olaj a vízben” típusú közegben, ahol az ülepítő térben esőzéskor turbulens áramlás uralkodik, az olajra nézve pedig egy felúsztató hatás is működik.

Ismert vizsgálati tény (Búzás K., 2019), hogy a szénhidrogén származékok kapcsán a lemosódó csapadékvízben már nem olaj emulzióval, hanem a hordalékszemcsék, pontosabban aggregátumok felületén adszorbeálódó hártaként kell számolnunk, ezt együttesen „olajpelyhek” is nevezi a szakirodalom. A koaleszcencia tekintetében ez a jelenség hátráltató tényezőnek minősül, rontja a parányi olajcseppek egyesülésének lehetőségét, de joggal merülhetett fel az, hogy ez az olajfilm nem segíti-e az egyéb szemcsék felúszását, az ülepítőtér tetején képződő olajrétegben való felhalmozódását, így végső soron esetlegesen meggátolja-e például a mikrogumi-szemcsék nagy mennyiségű, rendszerből való távozását. A koaleszcens betét egy 5 cm vastagságú, maximálisan 300 μm nagyságú pórusokkal ellátott „járatrendszer” (Energis), a 80 μm alatti gumiszemcsék ezen keresztül történő részbeni távozását természetesen feltételeztük, a képződő vastag olajréteg és olajsár azonban esetlegesen nagy arányban csapdázhatja a távozni kívánó szemcséket.

6.1.2. A modell felépítése, a működés részletei

A négyzetes hasáb alakú, 25x25x50 cm méretű, plexi-lemezből épített ülepítő egyik oldalára helyeztük az 5cm vastagságú koaleszcens szűrőbetétet, kiemelhető módon. A tényleges ülepítő térfogat mélységében tért el a valós mérettől, a betét alatti, „tisztán” ülepítő edényrész térfogata fele az eredetinek (20 cm helyett csak 10 cm magas). Ez nyilván a beömlő esővíz által keltett turbulens hatás miatt lehet kérdéses szempont. A koaleszcens betét mögötti lemezt a szűrőanyag felső és alsó zónájában megnyitottuk a két szintben történő mintavétel lehetősége miatt.



11. ábra Szűrőmodell

A felül 1"-os, alul 1/2"-os kivezetésen kiáramló tisztított víz mintázását kezdetben részlegesen gondoltuk megvalósítani, a fölösleget elvezető elágazások, a Büchner-tölcsérbe épített minibukó segítségével, ám ez nem bizonyult sikeres gondolatnak. A továbbiakban teljes mintavételezést alkalmaztunk egy-egy 20 μm -es, cellulóz anyagú üledékszűrő segítségével.

A vizsgálati anyagokra térve, legfontosabb elemként a gumilapok előállításához használt őrölt gumilisztet használtunk, amelyet egy szitasor 80 μm -es szitáján még szelektáltunk. A szénhidrogén származék kérdésért kerti kisgépek motorjához használt olajjal oldottuk meg, amelybe Detect sárga olajnyomjelzőt kevertünk az olajos fázis könnyebb követhetősége miatt. Az útfelületen leginkább jelenlévő egyéb anyagok tekintetében porított aszfaltot és löszport alkalmaztunk.

A beáramló víz mennyiségére gondolva a rendelkezésre álló vezetékes hálózat maximum 9,5 l/perc -es vízhozamát a modellünkre tudtuk bocsájtani, a felhasznált mennyiséget beépített kerti vízhozam-mérővel mértük. Az egyszeri működési időtartammal kapcsolatban legalább 30 percben gondolkodtunk, amit sikerült is megvalósítani.

A cellulóz szűrőbetétén és a szűrőház vizében felgyülemelő szemcséket szűrőpapíron fogtuk fel, ezeket pedig biológiai mikroszkóp segítségével áteső fényben, illetve pótlólag kialakítva ráeső fényben is vizsgáltuk.

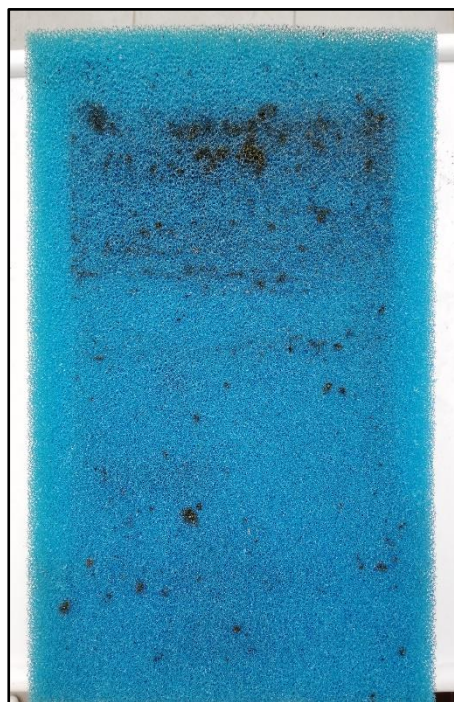
6.1.3. A modellvizsgálat eredményei, megfigyelései

Eredményként tekintünk arra, hogy a mintavétel kialakításával együtt a bemeneti vízhozam tekintetében kvázi valós körülményeket tudtunk biztosítani. A fent említett maximális értékkel és időkerettel 2 mm/h „esőtempót” tudtunk kialakítani, ami egy közepesen lendületes esőnek tekinthető. A 35 és 45 perces vizsgálati időtartammal pedig azt is elértük, hogy a koaleszcencia folyamata érdemben beinduljon. Ez idő alatt a szűrőellenállás sem alakult ki, a működés, a mintavétel folyamatos volt.

Makroszkópos megfigyelésünk alapján a beadagolt, megfestett olajsár jóval nagyobb mértékben az alsó mintavételi nyíláson távozott, erről a cellulóz szűrőbetétek színezettsége, és a szűrőpapírokon felfogott anyagmennyiségek különbsége egyértelműen

tanúskodik. Az időszakosan beadagolt olajsár viszont, az „elvárt” módon az éppen aktuális vízszintnek megfelelően a koaleszcens betét belső, felső zónájában festette meg a kék anyagot.

A mikroszkópos vizsgálatoknál kiderült, hogy az előzőleg dörzsmozsárban összetömrített, vagy helyesebben annak vélt komponensek csak nagyon kis százalékban maradtak egy összeragadt halmazban, leginkább elkülönülve voltak láthatók. A lösz nagyon jól osztályozott kvarcsemcséi, az aszfaltból származó dolomit, és/vagy kalcit romboéderes formái uralkodtak. A fekete színű gumi- és bitumen darabkák elkülönítésében a bitumen kissé élesebb törése, a törési felület nagyobb részen becsillanó zsírfénye volt a vezető vonal. A gumi szálasabb, elnyúltabb, bizarrabb formákat vesz fel, ha fénye van, az is tompább. Az elkülönítés ráeső fényben sikeresebb, egy ilyen megvilágítással rendelkező, nagyobb fényerejű mikroszkóppal ez feltehetőleg még biztosabban működne. A gumi- és bitumen szemcsék nagyjából egyforma arányban, de viszonylag nagyon kis mennyiségben „érkeztek meg” a szűrőpapírra.



12. ábra Koaleszcens szűrőbetét a kísérlet után

Eredményeinket összegezve:

- *Az olajsár a szűrőbetét felső részén tapadt meg, viszont túlnyomó része az alsó nyíláson távozott*
- *Beadagolt szemcsés komponensek csak kis százalékban ragadtak össze, nagyrészüket elkülönült*
- *Gumi, illetve egyéb szemcsék a mintákban jól azonosíthatóak*
- *A bitumen és gumiszemcsék nagyjából egyforma arányban, viszonylag kis mennyiségben érkeztek meg a szűrőpapírra*

Méréseink hasonló eredményeket mutattak, Búzás Kálmán (Búzás K., 2009) méréseihez hasonlóan. A CRC szűrőbetét csak részben alkalmas a 100 mikrométer alatti méretű részecskékhez kötött szénhidrogének leválasztására!

6.2. A 100 mikrométer alatti szemcsetartomány vizsgálata

A nagyobb, milliméteres szemcsetartomány után, a kisebb, 100 mikrométer alatti szemcsék, illetve az aggregálódott szemcsefrakciók (TRWP) mintavételezése, műszeres analitikai vizsgálata és morfológiai azonosítása volt a feladatunk.

6.2.1. Mintavételezés

Mérési helyszínünkön a felüljáró két végpontjánál a már előzetesen bemutatott ENVIA-CRC 5 koaleszcens szűrőket helyzetük ki. Az szűrőkkel két alkalommal mintáztuk, ennek megfelelően 2-2 minta állt rendelkezésre mindkét mérési oldalon.

A szűrőbetéteket szobahőmérsékleten kiszárítottuk, a 60 cm-es szűrőbetét egy 10 cm-es darabját levágtuk, majd ebből mechanikailag nyertük ki a benne lévő szennyeződések. A hidegvizes mosás után, a kivágott darabot pótoltuk, az berendezést ezután szállítottuk vissza a mintázás helyszínére.

A szűrőbetétből kinyert szennyeződést ezután frakcionálni kellett. Ezt egy ipari szitaberendezéssel valósítottuk meg. Célunk a 100 mikron alatti szemcsék kinyerése volt, amihez egy 80 mikronos rostát használtunk.



13. ábra Koaleszcens szűrőbetét terepi mintázás után

6.2.2. Fénymikroszkópos vizsgálatok

A nagyobb milliméteres gumiszemcsék fénymikroszkópban való sikeres azonosítása után, a kisebb méretű szemcsék morfológiai azonosítását is elvégeztük.

A vizsgálathoz egy Bresser LCD típusú fénymikroszkópot használtunk. Minden vizsgált szemcsénél 2 féle megvilágítást használtunk a biztos beazonosítás érdekében. Sima háttérmegvilágítást, illetve felső megvilágítást alkalmaztunk. Utóbbinál a gyári fényerő gyengesége miatt külső, erősebb fényforrással kellett kompenzálnunk a szükséges fényerőt.

A gumiszemcséknek sajátos morfológiai megjelenésük van. Ezt már saját műmintáinkon és egyéb szakirodalmi művekben is megtapasztalhattuk, ugyanakkor a szacikkek egytől-egyig sajátos módon definiálják a gumiszemcsék morfológiáját.

Az általunk azonosított szemcsék morfológiáját mi is definiáltuk saját tapasztalataink alapján. A gumiszemcsék színe matt fekete, nincsenek fényes felületeik. Ez a tulajdonság a szennyezett, valós mintákon nehezebben azonosítható a felületre tapadt szemcsék miatt. A szemcsék alakja változatos, sokszor rojtos, kusza fonalak alkotják a határfelületeket. Ugyanakkor jellemző a lesimult, alak, de ez a nagyobb szemcseméretekre (1-2mm) jellemzőbb. Fontos tulajdonság a szemcsék térbeli kiterjedése. A legtöbb esetben nem is lehet ráfókuszálni az egész szemcsére, csak egy térbeli részére.

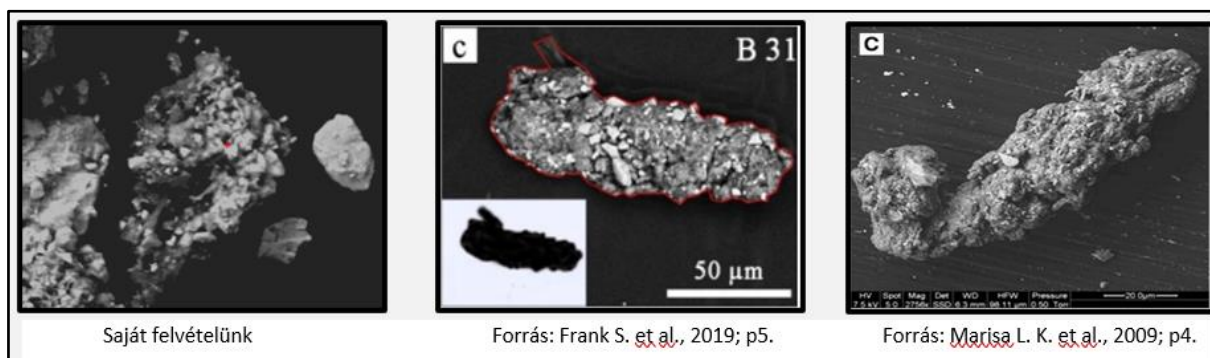
Ezen változatos és egyedi morfológiai jellemvonások alapján azonosítottuk a gumiszemcséket.

6.2.3. Analitikai vizsgálatok

Több szakirodalom is foglalkozik a TRWP szemcsék azonosításával, vizsgálatával. A kutatások többsége a szemcsék morfológiájával, színével, kémiai összetételével, illetve a környezetre és az emberi egészségre gyakorolt esetleges káros hatásokkal foglalkozik. A gumiszemcsék jelenlétének és mennyiségnek megállapítására több analitikai módszert is bevetettek a kutatók az elmúlt évek alatt. J. M. Panko és társai 2012-es projektjük során a TRWP szemcséket Pyrolysis-GC/MS (Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectroscopy) technikával vizsgálták be (J.M. Panko et al., 2012). Azonban a leggyakrabban használt mérési módszer a SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray analysis) vizsgálat.

Frank Sommer és társainak kutatása az útfelületekről a levegőbe jutó 10 mikrométernél nagyobb, finom szemcsékét vizsgálja. Kíváncsiak alakjukra, színükre, méretükre és kémiai összetételükre. A vizsgálatokhoz SEM-EDX analitikai vizsgálatot alkalmaznak. Megállapítják az útfelületeken képződő szemcsekategóriák tulajdonságainak táblázatát (szín, alak, méret, kémiai összetétel). A tanulmány rengeteg képet tartalmaz az elektronmikroszkópos mérésekből is, amelyen kifejezetten jól látszanak a TRWP képződmények (Frank S, et al., 2018).

Egy másik tanulmány 2009-ből, szintén a SEM analitika vizsgálatot használja az autógumiszemcsék morfológiai azonosítására. A szakirodalomban kiderül szinte ugyan azokat a paramétereket vizsgálják, mint Frank Sommer és társai. Az elektronmikroszkópos vizsgálatok képei itt még szembetűnőbbek, jól láthatóak a gumiszemcsékre tapadt kisebb, fékberendezésből és kőzetekből származó szemcsék (Marisa L. Kreider et al., 2009). A két tanulmány egyik fontos megállapítása, hogy az autógumiban található cink lehet az egyik legjobb nyomjelző a gumiszemcsék jelenlétének megállapítására.



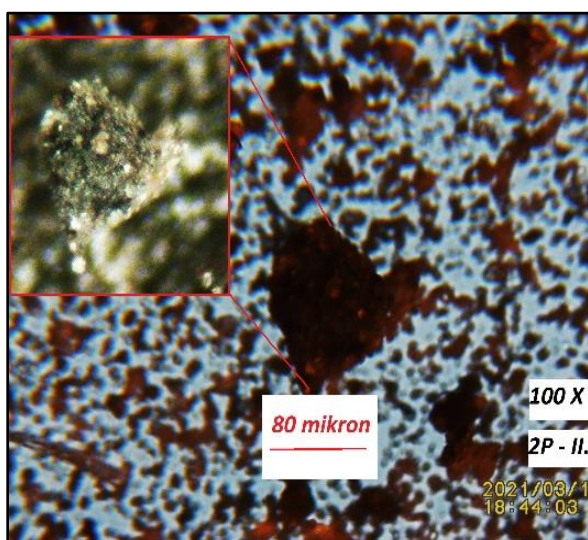
14. ábra TRWP szemcsék elektronmikroszkóp alatt

6.2.4. SEM-EDX vizsgálat eredményei

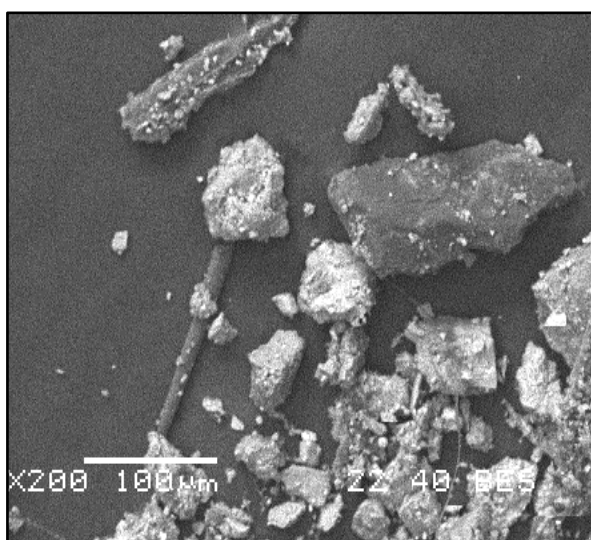
A vizsgálat célja az általunk morfológiailag felismert gumiszemcsék felületén lévő apró szemcsés szennyezők azonosítása, illetve az aggregátumok összetételének vizsgálata hasonlóan Frank Sommer és társai (Frank S. et al, 2018) által használt vizsgálati módszerekkel.

A mérések SEM-EDX módszerrel készültek. A SEM (Scanning Electron Microscopy) és az EDX (Energy Dispersive X-ray) felvételeket egy JEOL JSM-5500LV típusú pásztázó elektronmikroszkóppal készítettük. A mintákat módosítás, kezelés nélkül vizsgáltuk kis vákuum (LV – Low Vacuum) üzemmódban 50 Pa nyomáson. A mintákról visszaszórt elektron detektort (BSE – Back-Scattered Electron) használva készítettünk felvételeket. A BSE detektornál a jelintenzitás arányos a vizsgált terület átlagos rendszámával – minél világosabb a kép, annál nagyobb az átlagos rendszám. A SEM képeken több, meghatározott kisebb ponton végeztünk EDX elemzést. Az EDX spektrumokban a karakterisztikus röntgensugárzásuk segítségével azonosíthatóak az elemek, majd kiszámíthatóak a vizsgált területen az észlelt elemek atom- és tömegszázalékos koncentrációja.

Az előzetes fénymikroszkópos morfológiai jellemzés alapján próbáltunk azonosítani mintáinkban a 80 mikron alatti gumi anyagú szemcséket. A mérések atom- és tömegszázalékos összetételt is mutatnak az egyes bemért pontokban.



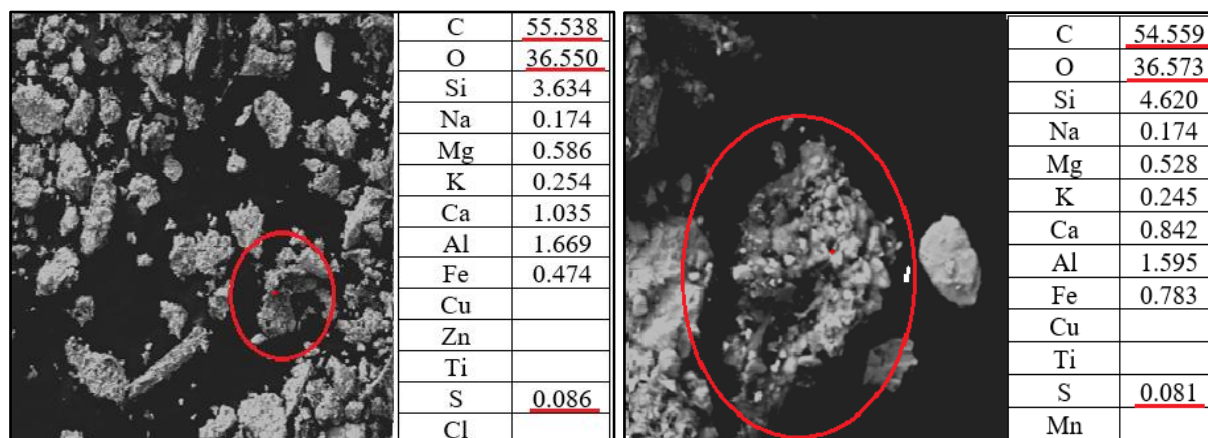
16. ábra Fénymikroszkóp - terepi minta



15. ábra Elektronmikroszkóp - terepi minta

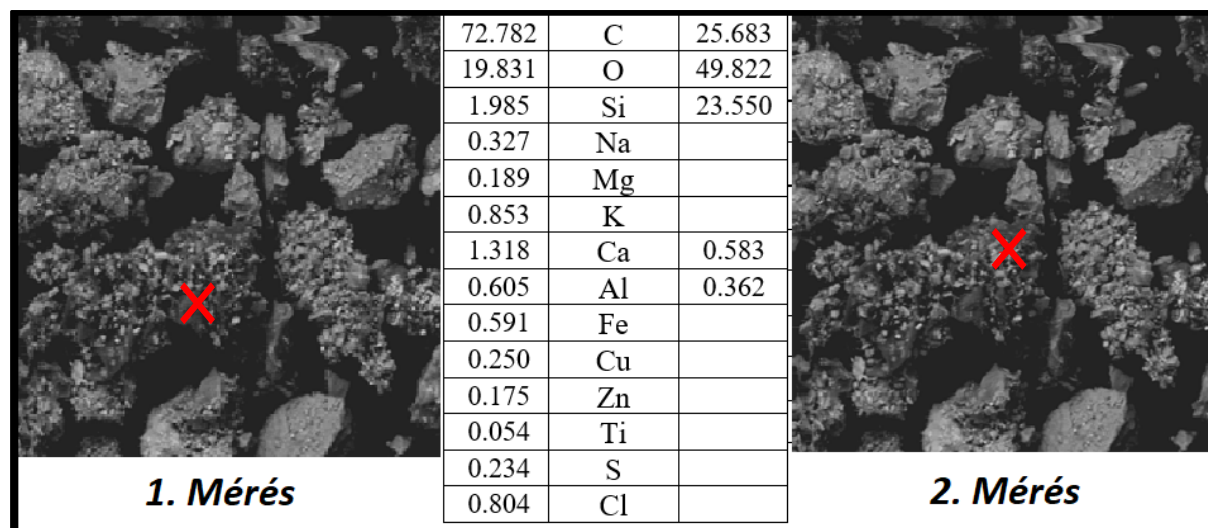
A bemért 37 szemcséből morfológia karakterizálás alapján 11 darab származhat autógumiból. Ezeket az atomösszetétel alapján is be tudtuk azonosítani. Itt a gumira jellemző anyagok jelenlétét is vizsgáltuk.

Ha sok a mintában a C (szén) tartalom, ehhez képest kevesebb az O (oxigén) és mellettük jóval kevesebb a S (kén) tartalom, akkor nagy eséllyel feltételezhető, hogy ténylegesen gumianyagú a morfológiailag is azonosított szemcse. Ezen két faktor, a morfológia és az atomszázalék alapján jól beazonosíthatók a gumiszemcsék.



17. ábra Elektronmikroszkópi kép és atomszázalékos összetétel

A mérés fő célja az volt, hogy gumiszemcsékre tapadt, illetve az azzal aggregálódott szemcséket azonosítani, elkülöníteni tudjuk a gumianyagtól, ezzel mi is igazolni tudjuk a TRWP-k létezését. Ezt egy ún. egyszemcsés mérési módszerrel vizsgáltuk.



18. ábra Azonos szemcse két különböző pontban végzett mérése (atomszázalék)

Az fenti ábrán egy TRWP-én végzett egyszemcsés mérés eredményét mutatja. Látható, hogy a gumiszemcse felületére egyéb, sok másik kisebb szemcse tapadt. Az *első mérés* a gumi anyagára irányult, ez mutatja is a gumi jellegzetes C – O – S arányait. A mérés kimutatott egyéb, a gumi anyagán lévő nem szemcsés szennyeződés jelenlétére utaló atomokat is. Ilyen a Ti, Cl, Cu, Fe, illetve a Zn, ez utóbbi a gumiabroncsok anyagában is megtalálható. A *második mérés* egy ásványszemcsére irányult, amit az atomszázalékos összetétel megerősít, feltehetőleg valamilyen földpát lehet a bemért szemcse.

Az egyszemcsés méréssel sikerült igazolni a TRWP jelenlétét a csapadék által az útfelületekről lemosódó víz üledékmintájában. A SEM felvételeken jól kivehető az aggregálódott kisebb szemcsék jelenléte a nagyobb gumi anyagú szemcsén, illetve sikerült a gumiszemcsén lévő, de eltérő atomi összetételű anyagot (ásványcsoportot) egyértelműen azonosítani.

6.2.5. Aggregátumok és a bennük fellelhető elemek

A mintákban mért különböző elemek fellelhetőségét tekintve egy részük mind köthető a közlekedéshez, illetve az autóiparhoz. Másik részük a természetben is fellelhető elemek sokasága, ilyenek az agyagásványokat alkotó atomok (O, Si, Al, Mg, K, Al) vagy a szerves anyagok fő alkotóeleme a C, illetve a Fe, ami a természetben is szennyezőként bárhol szórható. Ezek az anyagok aggregálódva, adszorbeálódva találhatók meg a gumiszemcséken.

Mérések által kimutatott közlekedéshez köthető elemek:

- **Cu (Réz):** galvanizált felületek
- **Zn (Cink):** autógumi adalék-aktivátor, kenőolajok, motorolaj adalék
- **Ti (Titán):** vékonyréteg bevonat, szelep- és fogaskerék bevonatok, ötvözetek, fékbetétek
- **S (Kén):** autógumi vulkanizálási adalékanyag, motorolaj adalékanyag
- **Cl (Klór):** utak sózása, egyes autógumikban is megtalálható

Ezeket a kémiai elemeket, amelyeket méréseink során sikerült azonosítanunk, több szakirodalom is megemlíti (CEDR-Report, 2018; Frank S. et al., 2018; Marisa L.K. et al., 2009), mint a mintáikban fellelhető szennyezők összetevőit.

6.3. Ülepítő tervezés

A projekt kezdetén csapatunk azt a feladatot tűzte ki célul, hogy megalkossunk egy olyan berendezést, amely képes lesz eltávolítani az útfelületekről a csapadékvízzel lemosódó mikrogumi-szemcséket. Ehhez rengeteg előzetes kutatómunkára volt szükségünk. Meg kellett ismernünk a keletkezett mennyiségek megoszlását az emissziós-transzmissziós-imissziós folyamatokban. Elemezni kellett a szemcsék viselkedését, tulajdonságait a lemosódó mátrixban. Mintaterületünkön fel kellett mérni, hol és hogyan tudnánk a leghatékonyabban fellépni a mikrogumi szennyezés mérséklése érdekében.

Az alapkutatás befejezése után, el kellett döntenünk milyen műszaki megoldást válasszunk a lemosódó gumiszemcsék számának mérséklésére. A döntést több tényezőt figyelembe véve kellett meghoznunk.

Az első szempontot a gumiszemcsék tulajdonságai adták. Viszonylag kis sűrűségük, kis átmérőjük miatt a legcélszerűbb megoldás valamilyen szemcsés anyagszűrőberendezés használata lenne. Ugyanis a kis sűrűség és szemcseátmérő miatt az ülepítés nehezzé válik.

Második tényező a lefolyó víz mennyisége, illetve annak összetétele. Megfigyeléseink alapján a vízhozamok viszonylag kicsik (15-20 l/perc), a mátrix inhomogenitása pedig nagy. A töltetes szűrők használata nem célszerű, ha az átfolyó víz sok nagyobb méretű lebegőrészeket, lebegőanyagot tartalmaz, mert a dugulásveszélyt növeli, illetve a tisztítási ciklusok idejét rövidíti. Ülepítő berendezéseknél, ha megfelelő ülepedési teret hagyunk az ülepedő anyagoknak, akkor a jelentős plusz lebegőanyagterhelés sem jelent gondot, nem okoz dugulást, se vízviisszatartást. Az ülepítőzsomp megfelelő méretezésével a tisztítási periódusok ideje is növelhető.

Harmadik, talán leginkább limitáló tényező a beépíthetőség, megvalósíthatóság szempontja. A mikrogumi terhelés legnagyobb mértékben a városi útszakaszokon jelentkezik (Hann S. et al., 2018). A városi közeg nagyban befolyásolja a megvalósíthatóságot. Általában kevés a hely, az útszakaszokat egyéb már kész létesítmények, infrastruktúra elemek veszik körül. A legtöbb városi helyszínen már kész, zárt csapadékvíz elvezetőrendszerek vannak megépítve. Ezen szempontok miatt, egy olyan berendezésre van szükségünk, ami kis helyen elfér, kompatibilis és utólag beépíthető a már kész vízelvezető rendszerekbe.

A felsorolt szempontokat figyelembe véve, egy kisebb ülepítő berendezés megtervezése mellett döntöttünk.



19. ábra Ülepítő berendezések tervezett helye

6.3.1. Méretezés

Az ülepítőnk méretezését meglévő bementi, anyagi tulajdonságokból kiindulva kellett kiszámítanunk. Először egy univerzális, kizárólag anyagi tulajdonságokat tartalmazó B értéket kellett kiszámítanunk. A kapott B értékből és a szemcseátmérő szorzatából meghatározható az $F(d)$ érték. Ezután egy *általános ülepedési diagram* segítségével leolvasható az $F(d)$ érték függvényében az $F(v)$ érték, ha átmeneti tartományba esik az ülepedési Re szám. Ha a Newton-i vagy Stokes tartományba esik, akkor adott képletekkel lehet az $F(v)$ értéket számolni. Az $F(v)$, a B , illetve közeg sűrűsége és dinamika viszkozitása alapján ki tudjuk számítani az ülepedési sebességet ($v_{ü}$). A vízhozam (Q) és az ülepedési sebesség hányadosaként pedig megkapjuk az ülepítéshez szükséges felületet. (Vegyipari műveleti számítások I., 2003)

6.3.2. Jelölésjegyzék:

d_p	[m] részecske átmérő
η	[Pa*s] dinamikai viszkozitás
ρ_p	[kg/m ³] részecske sűrűsége
ρ_k	[kg/m ³] közeg sűrűsége
g	[m/s ²] gravitációs gyorsulás
$v_{\ddot{u}}$	[m/s] ülepedési sebesség
Q	[m ³ /s] vízhozam
A	[m ²] felület
B	[-] ülepítési B érték
d	[m] átmérő

6.3.3. Kiindulási adatok:

d_p : 80 μm : $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

η : $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

ρ_p : 1200 kg/m³

ρ_k : 1000 kg/m³

Q : 15 l/perc: 0,00025 m³/s

A szemcseátmérőt mi választottuk meg 80 mikrométerre, a célunk az volt, hogy az ülepítő az ennél nagyobb gumiszemcséket képes legyen kiülepíteni. A víz dinamikai viszkozitásánál és sűrűségénél standard értékeket használtunk. A részecske sűrűségét saját magunk mértük le, amelyet később szakirodalmi adatokkal is összevetve használtunk fel. A vízhozamot a mintavételi helyszínünkön, az egyik PVC lefolyócsőn mértük meg köbözéssel.

6.3.4. Számítások:

A B érték számítása gumiszemcsék és a lemosódó víz anyagi jellemzői alapján:

$$B = \left[\frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{(\rho_p - \rho_k) \cdot \rho_k}{\eta^2} \right]^{1/3}$$

$$= \left[\frac{4}{3} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{\left(1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{10^{-32} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \right]^{1/3}$$

$$= 13779$$

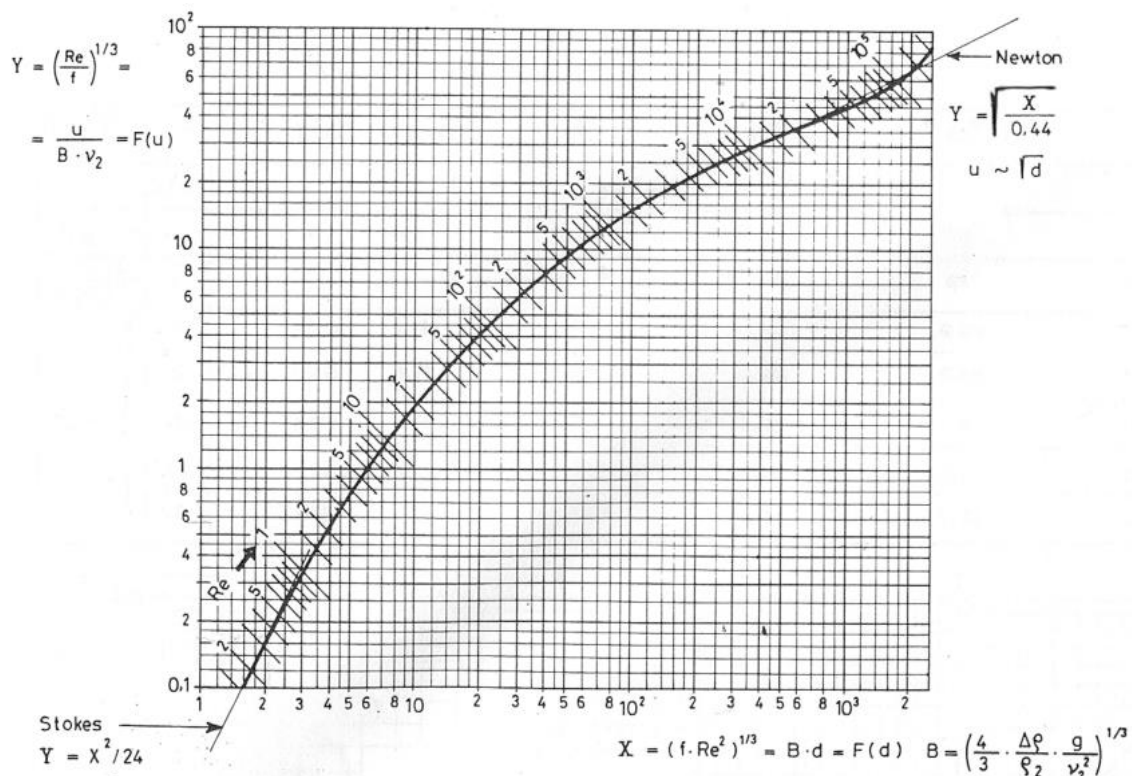
Az F(d) érték meghatározása:

$$F(d) = B \cdot d_p$$

$$= 13779 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$1,102$$

Az F(v) érték meghatározása az általános ülepedési diagram segítségével:



20. ábra Ülepedési diagram (VEGYIPARI MŰVELETEK I. – SZÁMÍTÁSI GYAKORLATOK MELLÉKLETEK)

Az $F(d)$ érték leolvasása után megkapjuk, hogy az ülepités Stokes tartományban megy végbe, ekkor az $F(v)$ értékét az alábbi képlettel számíthatjuk ki:

$$\begin{aligned} F(v) &= \frac{F(d)^2}{24} \\ &= \frac{1,102^2}{24} \\ &= \mathbf{0,0506} \end{aligned}$$

Az ülepedési sebességet pedig az alábbi képlettel kifejezhető:

$$\begin{aligned} v_{\ddot{u}} &= \frac{F(v) \cdot B \cdot \mu}{\rho k} \\ &= \frac{0,0506 \cdot 13779 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s}{1000 kg/m^3} \\ &\equiv \mathbf{\underline{\underline{6,976 \cdot 10^{-4} m/s}}} \end{aligned}$$

A szükséges ülepitési felület ismert vízhozam és ülepedési sebesség hányadosaként számítható:

$$\begin{aligned} A &= \frac{Q}{v_{\ddot{u}}} \\ &= \frac{0,00025 m^3/s}{6,976 \cdot 10^{-4} m/s} \\ &= \mathbf{0,3583 m^2} \end{aligned}$$

Az ülepítőnket kör alaprajzúra szeretnénk volna tervezni, a jobb szilárdsági adottságok, a beépíthetőség és könnyebb legyárthatóság szempontjából. A tervezéshez az ülepítő átmérőjére volt szükségünk, amelyet a kiszámolt szükséges ülepítési felületből könnyedén ki tudunk számolni.

$$d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,3538 \text{ m}^2 \cdot 4}{3,14}}$$

$$\underline{\underline{= 0,675 \text{ m} = 67,5 \text{ cm}}}$$

Tehát számításaink alapján, egy ~ 70 cm átmérőjű kör alaprajzú ülepítőre lesz szükségünk. Ezen bemeneti adatok teljesülésénél, a $80 \mu\text{m}$ feletti gumiszemcsék ki fognak ülepedni. Fontos megjegyezni, hogy ez csak egy hozzávetőleges számítás, amely nem feltétlenül fogja tükrözni a valóságban lejátszódó folyamatokat. Azonban bizonyos fenntartásokkal használni tudjuk az ülepítő prototípusok megtervezéséhez, amelyeket aztán később helyszíni és laboratóriumi mérésekkel tudunk tesztelni.

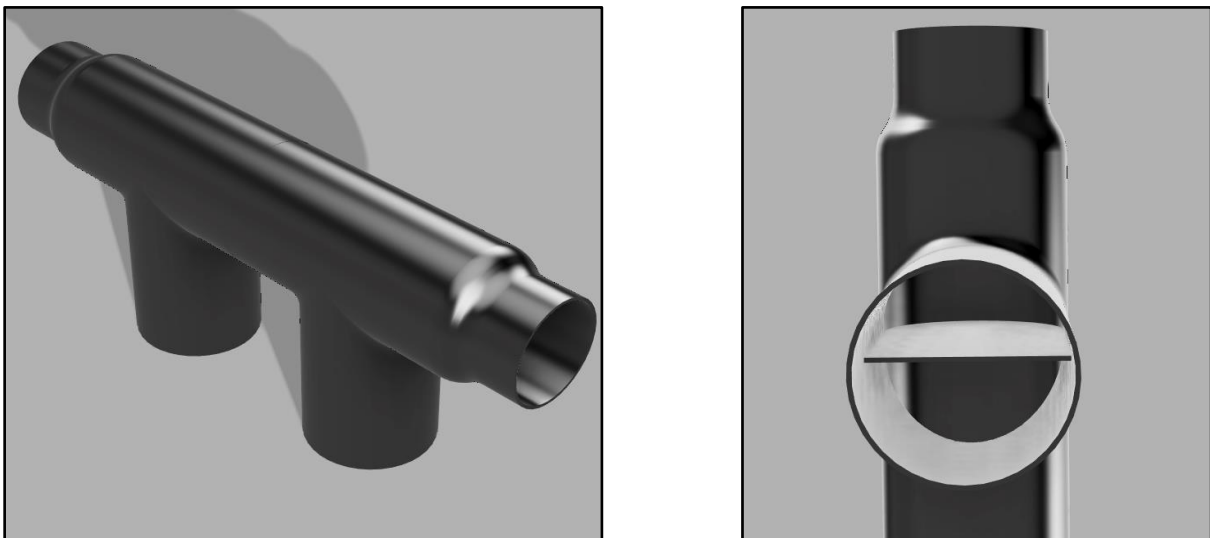
A számításhoz tartozó fenntartások. Feltételezzük, hogy:

- *a részecskék gömb alakúak*
- *a részecskék sűrűsége állandó*
- *a közeg sűrűsége és viszkozitása állandó*
- *a vízhozam értéke állandó*

6.4. Prototípusok

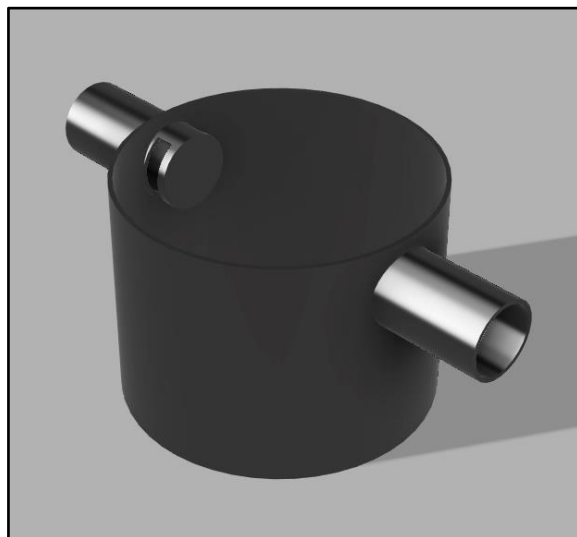
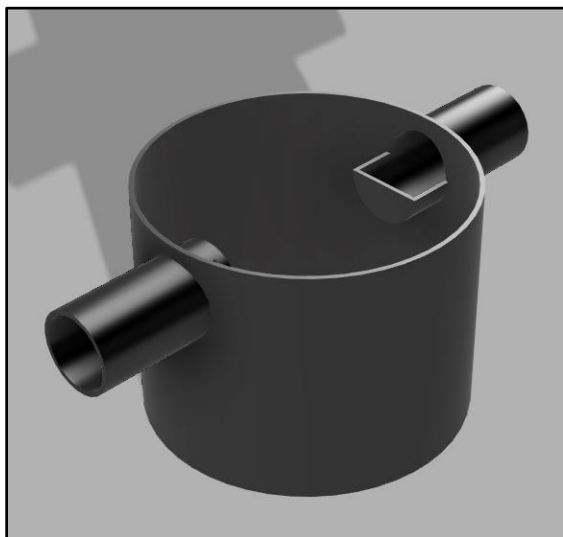
A számítási eredmények alapján több prototípust is terveztünk, különböző kialakítással. Figyelembe vettünk az ülepítéshez szükséges paramétereket, ügyeltünk arra, hogy sehol ne történjen vízviisszatartás, valamint más-más technológiai szempontok szerint alkottunk meg a berendezéseket a lehető legnagyobb hatékonyság elérése érdekében, a legminimálisabb méret mellett. Így létrejött 5 modell, amelyek más tulajdonságokkal rendelkeznek, előnyökkel és hátrányokkal egyaránt. Mivel a berendezések terveink szerint felüljárók esővíz elvezető PVC cső rendszerbe illeszthetőek, így ehhez megfelelő kialakításokban kellett gondolkodnunk.

Az **első modell** vízszintes, hosszanti átfolyású és két iszapgyűjtő rekeszrel rendelkezik. A cső mérete a bevezetésnél kibővül, ezáltal lassul az áramlás a berendezésben. Emellett a rekeszekbe van építve egy-egy terelőfal, amely megakadályozza a víz egyenes átfolyását és segíti az ülepedést. Hátránya, hogy az ülepedési felület viszonylag kisebb.



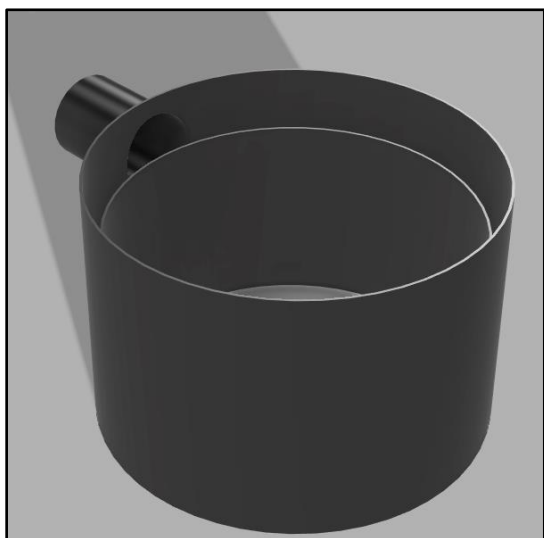
21. ábra Első prototípus

A **második modell** egy, a számítások alapján megfelelő ülepedési felülettel rendelkező álló henger alakú berendezés. Az átfolyás vízszintes, hosszanti irányú. Előnye, hogy a beérkező víz sebessége a megnövekedett térfogat miatt erőteljesen lecsökken, ezzel növelve a tartózkodási időt. A készülék ~70 cm-es átmérővel rendelkezik és ~50 cm magas. További előnye, hogy nem rendelkezik olyan elemmel, amely csökkentené a kiülepedő iszap maximális térfogatát, így ezt kell a leghosszabb időközönként üríteni.



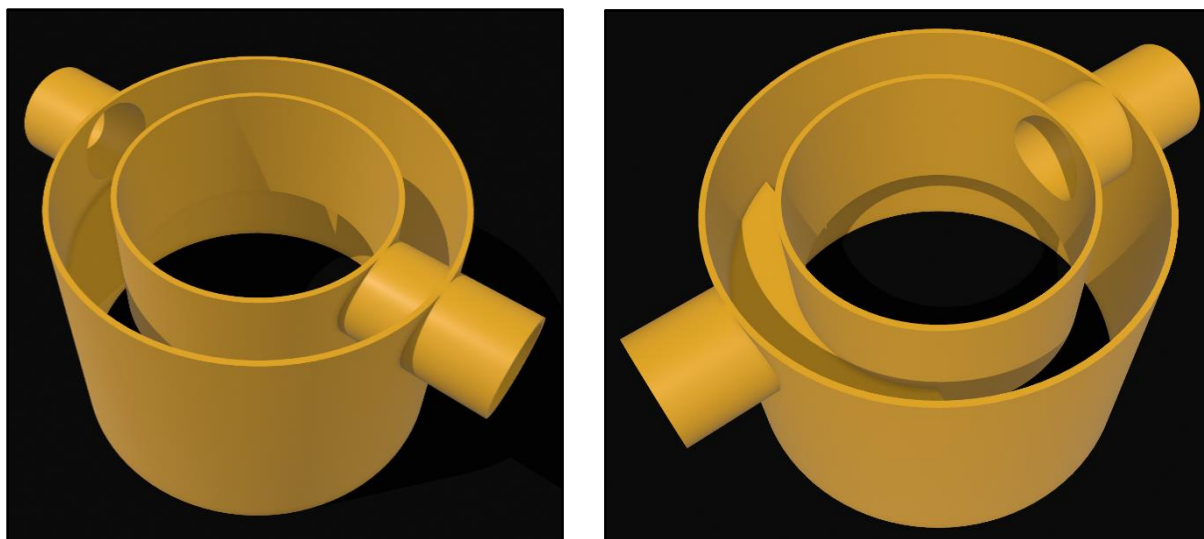
22. ábra Második prototípus

A **harmadik modell**be is álló henger alakú, melybe felülről érkezik az ülepítendő víz és sugárirányban az oldalán körbevezetett bukóélen átfolyva távozik. Hátránya, hogy az ülepítő térben lévő maximális iszap magasság csökken, ugyanis a bevezető cső mélyebben a vízszint alá süllyed. Előnye viszont a felülről történő bevezetés, amivel olyan helyekre is be tudjuk építeni, ahova egy hosszanti átfolyású nem lenne megoldható. A berendezés átmérője ~70 cm, a magassága pedig ~50 cm.



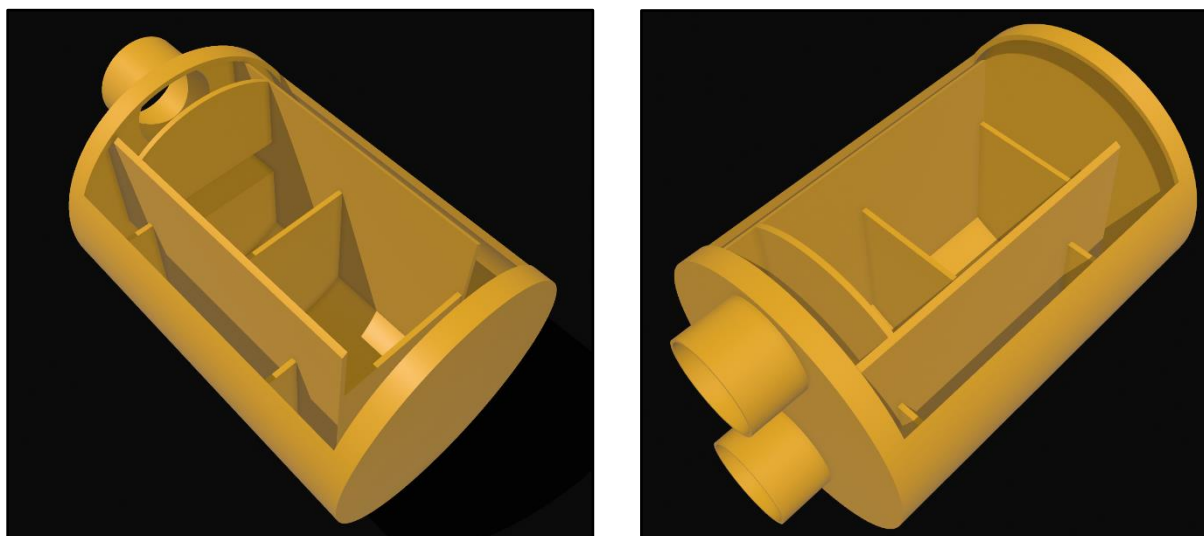
23. ábra Harmadik prototípus

A **negyedik modell**ben a henger teljes felületét kihasználva ülepedik ki az iszap hosszanti átfolyással. Ennél a berendezésnél a bevezetett víz kívülről a henger közepe felé alulról bukik át a belső hengernek köszönhetően. Hátránya hasonlóan a harmadik modellhez, a maximálisan kiülepíthető iszap mennyisége, mivel az alsó átbukás egy bizonyos mennyiség után elzáródhat, így azt gyakrabban kell üríteni. A berendezés átmérője ~70 cm, magassága ~50 cm.



24. ábra Negyedik prototípus

Az **ötödik modell** egy vízszintes átfolyású berendezés melynek egy oldalon van a be- és kivezetése, egymás felett. Ennék a készüléknél több egymást követő kamra helyezkedik el egy fektetett hengerben, amely ~70 cm hosszú és ~50 cm átmérőjű. A víz bevezetése a felső csövön történik és a henger közepén folyik a víz egészen a végéig, majd ott kettéválik és oldalt visszafolyik az alsó csőig. Előnye, hogy a több kamra nagyban elősegíti az ülepedést, hátránya viszont, hogy ebben a legkevesebb a rendelkezésre álló ülepítő tér.



25. ábra Ötödik prototípus

7. MIKROGUMI-SZEMCSÉK KÖRNYEZETRE ÉS EMBERI EGÉSZSÉGRE GYAKOROLT HATÁSAI

Számos kutatás és szakirodalom foglalkozott és foglalkozik jelenleg is a közlekedésből származó részecskék környezetre és emberi egészségre gyakorolt hatásával. Egy 2005-ös kutatásban (Maurizio G. et al., 2005) megemlíti az autógumik kopásából származó részecskéket is. Itt kiderül, hogy a gumiban található Zn az utak mellett nagy mennyiségben akkumulálódik, illetve a vízi élővilágot is károsítja (Evans J., 1997). Egy másik kutatás (Fauser P., 1999) a gumirészecskék koncentrációjával foglalkozik, ami megállapította, hogy egy normál városi út mentén $1-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tartományban mozog a levegőben a gumiszemcsék koncentrációja. Ez az 5%-át teszi ki a teljes levegőben lévő részecskéknek, illetve (Ntziachristos L., 2003; Tappe M., 2002) kiszámították, hogy a belélegezhető PM10 részecskéknek pedig az 5-7%-át alkotják.

Maguk a gumiszemcsék is egyes adalékanyagaik miatt (PAH, oldószerek, cink) önmagukban problémát jelentenek a környezetbe jutva, akár a kioldódott anyagok miatt (vízi élővilág), akár szemcsék formájában. Emellett a szakirodalomban említett PM10 és PM2,5 részecskék belélegezve szív- és érrendszeri problémákat, asztmát és egyéb légúti megbetegedéseket idézhetnek elő. Ezen felül a szemcsék felületén egyéb égéstermékek, toxikus anyagok adszorbeálhatnak, amelyek újabb mérgező hatást fejtenek ki az élő szervezetekre.

8. ÖSSZEFOGLALÓ

Az alapkutatás befejezése után projektünk új fejezethez érkezett. Immáron egyetemi képzésünk alatt folytattuk tovább bővülő kutatásunkat. Két fontos célunk volt, azonosítani a kisebb mérettartományba eső gumiszemcséket és TRWP aggregátumokat, illetve létrehozni egy gumiszemcse terhelést csökkentő eszközt.

Ezúttal a 100 mikrométer alatti szemcsefrakcióval foglalkoztunk. Teszteltük a koaleszcens szűrőbetéteket, hogy milyen hatással vannak ezen kisebb gumiszemcsék olajsárral összetapadt aggregátumaira. A teszt során világossá vált, hogy ezen szűrési módszerrel nem tudjuk csökkenteni a mikrogumi darabok bejutását az élővizekbe.

A kisebb szemcsék azonosítását sikeresen elvégeztük. Elsődlegesen morfológiailag próbáltuk azonosítani a mikrogumi darabokat korábbi tapasztalataink alapján. Az eredmények helyességét analitikai módszerrel támasztottunk alá. A mérések során a szakirodalmak által említett TRWP aggregátumokat is sikeresen identifikáltuk.

A mérési helyszínünkhöz igazodva, illetve számításokkal megalapozva sikerült megalkotnunk 5 féle ülepítő berendezést. Az egyes prototípusok eltérő megoldásokat tartalmaznak a minél jobb ülepítési hatásfok elérése érdekében.

Projektünk továbbra is folytatódik, jelenleg azon dolgozunk, hogy a megtervezett prototípusokat ipari minőségben elkészítsük. Jövőbeni terveink közt szerepel a legyártott ülepítő berendezések laboratóriumi és terepi tesztelése, illetve hatékonysági vizsgálata. Emellett a hatékonysági vizsgálatokhoz szükséges lesz a szemcsék mennyiségének mérése, amelyhez termogravimetriás analízist szeretnénk majd alkalmazni.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk megköszönni mentorunknak, Gögh Zsoltnak, a több éve tartó kifogyhatatlan lendületét és szakmai segítségét a projekt egésze során.

Köszönettel tartozunk témavezetőnknek, Dr. Szilágyi Imrének az analitikai vizsgálatok elvégzéséért és a dolgozat elkészítésében való segítségéért, illetve Karajz Dávidnak, a SEM-EDX vizsgálatok lebonyolításáért.

Köszönjük Kullai-Papp Andreának a szakmai segítségét és a projekt sikeres lebonyolításában való részvételét.

Köszönjük az Euro-Purátor Kft. jelenlegi és jövőbeli támogató szakmai segítségét az ülepítőmodellek tervezése során.

Köszönjük a Pureco Kft.-nek, hogy a teszteléshez és a mintagyűjtéshez felajánlották az ENVIA CRC szűrőadaptereket.

Köszönjük Kovács Benedeknek a 3D-s modellek megalkotásában nyújtott segítségét.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-1-I-BME-176 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-6-II-BME-333 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



10. IRODALOMJEGYZÉK

Buzás, K. (2009): *A közúti közlekedés hatása a felszíni csapadékvíz-lefolyás szénhidrogén szennyezettségére. PhD értekezés, BME, pp. 37, 48-49*

CEDR-Report (2018): *MICROPROOF - Micropollutants in Road Run Off - Review of available measurements of organic micropollutants, microplastics and associated substances in road run-off. Deliverable 1.3, p2*

Dr. Deák András, Dr. Farkas Tivadar: *VEGYIPARI MŰVELETEK I. – SZÁMÍTÁSI GYAKORLATOK MELLÉKLETEK*

E. P. Rhodes¹, Z. Ren, and D. C. Mays (2012): *Zinc Leaching from Tire Crumb Rubber*

EUROSTAT - <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

Enregis.com: https://www.enregis.de/pdf/downloads/ENVIA_13_GB.pdf

Evans JJ (1997): *Rubber Tire Leachates in the Aquatic Environment. Environm Contamin Toxicol, 151:67-115.*

Fausser P (1999): *Particulate air pollution with emphasis on traffic generated aerosols. PhD thesis. Riso National Laboratory and Technical University of Denmark*

Frank Sommer, Volker Dietze, Anja Baum, Jan Sauer, Stefan Gilge, Christoph Maschowski, Reto Gieré (2018): *Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. Aerosol and Air Quality Research, 18: 2014–2028*

GKD WORLD WIDE WEAVE Mikroplastik Brochure (2016): *MICROPLASTICS - A GLOBAL CHALLENGE*

Hann S. et al. (2018): *Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products. Report for DG Environment of the EU. EUNOMIA, UK. 146-162*

Hann S., Chiarina Darrah, Chris Sherrington, Katherine Blacklaws, Iona Horton, Alice Thompson (2018a): *Reducing Household Contributions to Marine Plastic Pollution, Report for Friends of the Earth, EUNOMIA, UK, 14-19*

Jekel, M. et al. (2019): *Scientific Report on Tyre and Road Wear Particles, TRWP, in the aquatic environment. TU Berlin, prepared for ETRMA, Brussels, 9-13.*

J. M. Panko, J. A. Chu, M. L. Kreider, B. L. McAtee & K. M. Unice ChemRisk, LLC, USA (2012): *Quantification of tire and road wear particles in the environment. WIT Transactions on The Built Environment, Vol 128, 2012, Urban Transport XVIII, 59-70.*

KSH - <http://statinfo.ksh.hu/Statinfo/themeSelector.jsp?lang=hu>

K.M. Unice a, M.P. Weeber b, M.M. Abramson a, R.C.D. Reid a, J.A.G. van Gils b, A.A. Markus b, A.D. Vethaak b,c, J.M. Panko (2019): *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, Elsevier, 1640-1647.

K.M. Unice a, M.P. Weeber b, M.M. Abramson a, R.C.D. Reid a, J.A.G. van Gils b, A.A. Markus b, A.D. Vethaak b,c, J.M. Panko (2019): *Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part II: Sensitivity analysis of an integrated geospatial microplastic transport modeling assessment of tire and road wear particles, Elsevier, 1651-1658.*

Marisa L. Kreider a, *, Julie M. Panko a, Britt L. McAtee a, Leonard I. Sweet a, Brent L. Finley b (2009): *Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. Science of the Total Environment 408 (2010) 652–659.*

Maurizio Gualtieri, Manuela Andrioletti, Paride Mantecca, Claudio Vismara and Marina Camatini (2005) - *Impact of tire debris on in vitro and in vivo systems. Particle and Fibre Toxicology, 2:1,*

Mészáros N., Urbán B. Gy., Kassai Cs. (2019): *Elmosódó guminyomok (Mennyiségi adatok az útfelületekről a felszíni élővizekbe kerülő autógumi szemcsékkal kapcsolatban). In: Pápay Gergely (szerk.) "IV. Fenntartható fejlődés a Kárpát-medencében"; konferencia. "Gyepék biodiverzitása a Kárpát-medencében"; Kiadványkötet, Hódmezővásárhely, 2019. december 4. pp. 28-31.*

Ntziachristos L. (2003): *Road vehicle tyre, break wear & road surface wear. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook, 3rd edition, index to methodology chapters ordered by SNAP97 Activity, Group 7 Road transport, Copenhagen, Denmark*

Tappe M., Null V (2002): *Requirements for tires from the environmental view point. Tire Technology Expo Conference, 20–22 February, Hamburg*

Urbán B. Gy., Kassai Cs. (2019): *Elmosódó guminyomok (Mennyiségi adatok az útfelületekről a felszíni élővizekbe kerülő autógumi szemcsékkal kapcsolatban). „Hazai és külföldi modellek a projektoktatásban” nemzetközi tudományos konferencia. Kiadványkötet, Óbudai Egyetem, 2019. május 21. pp 484-502.*

Urbán, B. Gy., Kassai,Cs., Mészáros, N. (2019): *Blurred tire tracks, Quantitative data on microparticles from tire wear on road surface washing into surface water. International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies. 21-22 November 2019 Budapest, Óbuda University, 276-285*

Urbán B. Gy., Mészáros N., Kassai Cs. (2021): *ELMOSÓDÓ GUMINYOMOK, Mennyiségi adatok az útfelületekről a felszíni élővizekbe kerülő autógumi szemcsékkal kapcsolatban, 35. Országos Tudományos Diákköri Konferencia*

Vegyipari műveleti számítások I., Műegyetem Kiadó, 2003

WESSLING Hungary Kft - <http://mikromuanyag.hu/>