



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**MIKROMŰANYAGOK KÖRNYEZETI ELŐFORDULÁSÁNAK
VIZSGÁLATA**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bordós Gábor

Gödöllő

2021

A doktori iskola

megnevezése: Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Környezettudomány

vezetője: Csákiné Dr. Michéli Erika
egyetemi tanár, intézetigazgató
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Környezettudományi Intézet

Témavezető: Dr. Szoboszlay Sándor
egyetemi docens, tanszékvezető
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Akvakultúra és Környezetbiztonsági Intézet
Környezetbiztonsági Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK.....	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. Környezeti mintavételek.....	6
2.1.1. Mintavételi pontok kijelölése.....	6
2.1.2. Mintavételi módszerek.....	6
2.1.2.1. Felszíni víz mintavétel.....	6
2.1.2.2. Üledék mintavétel.....	7
2.1.3. Mintaelőkészítési és vizsgálati módszerek	7
2.2. Mintavételi módszerfejlesztés és hatékonyság vizsgálat.....	9
2.2.1. A szűrt mintamennyiség és a szűrő pórusméret, mint hatékonysági jellemzők vizsgálata terepi körülmények között	9
2.2.2. A mikroműanyagok visszanyerési hatásfokának vizsgálata üzemi méretű modellrendszerben végzett mintavétel során.....	10
2.2.2.1. Referencia mikroműanyagok és előállításuk	10
2.2.2.2. A mikroműanyagok visszanyerési hatásfokának megállapítására vonatkozó mintavételi kísérletek	11
2.3. Mintaelőkészítési módszerfejlesztés és hatékonysági vizsgálat.....	12
2.3.1. A saját fejlesztésű „Small Volume Glass Separator (SVGS)” felépítése és működése	12
2.3.2. A mintaelőkészítés hatékonyságának vizsgálata laboratóriumi modellrendszerben.....	13
2.3.2.1. Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása	13
2.3.2.2. SVGS módszer hatékonyságának vizsgálata	14
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	15
3.1. Környezeti minták mikroműanyag tartalma	15
3.1.1. Vízminták.....	15
3.1.2. Üledékminták.....	16
3.2. Vízmintavételi módszerfejlesztés és hatékonyságvizsgálat	18
3.2.1. Szűrőbetétek alkalmazhatóságának vizsgálata terepi körülmények között	18
3.2.2. Mikroműanyagok visszanyerési hatásfoka üzemi méretű modellrendszerben.....	20
3.3. A mintaelőkészítés hatékonyságának vizsgálata laboratóriumi modellrendszerben.....	23
3.3.1. Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása	23
3.3.2. A mintaelőkészítés hatásfokának vizsgálata az SVGS módszerrel	24
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	27
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK	32
6. IRODALOMJEGYZÉK.....	34
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK	36

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

Az emberiség műanyagfelhasználása az elmúlt évtizedekben folyamatosan növekszik, hiszen ezek az anyagok az életünk összes területén jelen vannak. Alkalmazásuk nélkül a jóléti társadalomban megszokott életszínvonal és kényelem, azaz az egyén szintjén értelmezett mindennapi idő- és energiamegtakarítás elképzelhetetlen. A műanyagok számos területen valóban hozzájárulnak életünk minőségének növeléséhez (pl. egyszerhasználatos orvosi eszközök, infrastruktúra vezeték rendszerek), sok esetben viszont szükségességüket, felhasználásuk körülményeit és fogyasztási szokásainkat célszerű lenne mérlegelni és újra tervezni (pl. eldobható csomagolóanyagok).

A nem megfelelő gyártói és fogyasztói magatartás, illetve a kiforrott hulladékkezelési technológiák hiánya miatt a műanyag hulladékok környezeti megjelenése sajnos mindennapos látvánnyá vált világszerte. A szemmel érzékelhető műanyag hulladékokon túl további problémát jelent az 5 mm-nél kisebb műanyagdarabok, az ún. mikroműanyagok megjelenése a környezetben. Ezen apró részecskék előfordulásának és esetleges káros hatásainak kutatása az utóbbi években a környezettudományok egyik fontos területévé vált, de a (mikro)műanyagok problémaköre egyre inkább a társadalmat is foglalkoztató témává vált.

A kockázatok részletes megértéséhez elengedhetetlen a műanyag terhelés mértékének megismerése a különböző környezeti elemekben. A mikroműanyagok esetében ez különösen összetett feladat, hiszen nem egy konkrét anyagról, hanem eltérő paraméterekkel (méret, alak, anyagtípus és sűrűség) tág határok között változó anyagcsoportról van szó. Világszerte számos helyről kimutatták előfordulásukat felszíni vizekben, üledékekben és élőlények szervezetében is, azonban édesvízi megjelenésükről rendelkezésre álló információink limitáltak.

Az adatok komplex értékelhetőségét hátráltatja továbbá az is, hogy a mintavételi technikák, a mintaelőkészítési és vizsgálati módszerek eltérőek, így az eredmények sok esetben nem összehasonlíthatóak. Hozzájárul ehhez az egymástól eltérő mérettartományba eső részecskék vizsgálata, illetve az eredmények különböző

dimenzióban való feltüntetése (pl. részecskék számának vagy tömegének megadása adott térfogatú víztestben vagy adott felületű vízfelületen).

Az édesvízi mikroműanyag kutatások fentebb leírt hiányosságai miatt kutatásom során célul tűztem ki, hogy Kelet-Közép-Európában elsőként, Magyarországon felszíni vizekből és üledékeiből mintát gyűjtsék és a minták mikroműanyag tartalmát meghatározzam. Munkám során az egységesítés érdekében a vízmintavételi módszer fejlesztése, a mintavételi módszer hatékonyságára vonatkozó információk gyűjtése is céljaim között szerepelt. A mintavétel után a minták több mintaelőkészítési lépésen esnek át, amelyek szintén nem egységesek, illetve jelentős hibát okozhatnak az eredményekben. A minél pontosabb mikroműanyag koncentrációk megadása érdekében céltom volt újszerű víz minta előkészítő eszköz fejlesztése, valamint az eszköz hatékonyságának értékelése.

Doktori kutatásom során az alábbi konkrét célokat határoztam meg:

- felszíni víz és üledék minták gyűjtése és a minták mikroműanyag tartalmának vizsgálata természetes vizekben és halastavakban,
- minél nagyobb térfogatú mintát minél kisebb pórusú szűrőn gyűjtő mintavételi módszer fejlesztése és hatékonyságának értékelése a mikroműanyagok visszanyerhetőségének kvalitatív és kvantitatív meghatározása érdekében,
- kis térfogatú, költséghatékony és vegyszertakarékos mintaelőkészítési eszköz és módszer fejlesztése, hatékonyságuk értékelése a mikroműanyagok visszanyerésének kvalitatív és kvantitatív meghatározása érdekében.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Környezeti mintavételek

2.1.1. Mintavételi pontok kijelölése

Kelet-Közép-Európa felszíni vizeiből mikroműanyag mérési eredmények nem állnak rendelkezésre és a halastavak ilyen jellegű terhelését világszinten sem kutatták, ezért céloom volt magyarországi halastavi minták mikroműanyag tartalmának a vizsgálata. A mintavételi helyszíneket az **1. ábra** mutatja be.

2.1.2. Mintavételi módszerek

2.1.2.1. Felszíni víz mintavétel

A felszíni víz mintavételekhez a szakirodalom áttekintése után szűrőkből és szivattyúból álló frakcionált szűrésre alkalmas rendszert állítottam össze. A mintavételi pontokon benzines áramfejlesztőt (Honda EU 20i) használva önfelszívó szivattyút (Pedrollo JCRm 2A) üzemeltetünk. A víz az 1” átmérőjű PVC cső végén elhelyezett, 2 mm pórusú előszűrővel ellátott réz lábszelepen keresztül jut a rendszerbe. A lábszelepet a mintavétel során 10-20 cm-el a vízfelszín alatt helyezük el. Az előszűrő alkalmazásával a 2-5 mm közötti mikroműanyagokat és egyéb anyagokat ugyan kizárjuk a vizsgálatból, azonban a szűrők eltömődése, telítődése így jóval később következik be, így nagyobb térfogatú minta szűrhető. A szívócsonk elé 10” műanyag szűrőházakba illeszkedő rozsdamentes szűrőbetéteket (Infiltec GmbH, Speyer am Rhein, Németország) helyezünk, hasonlóan Mintenig és munkatársai vizsgálataihoz (MINTENIG ET AL., 2014; MINTENIG ET AL., 2017).

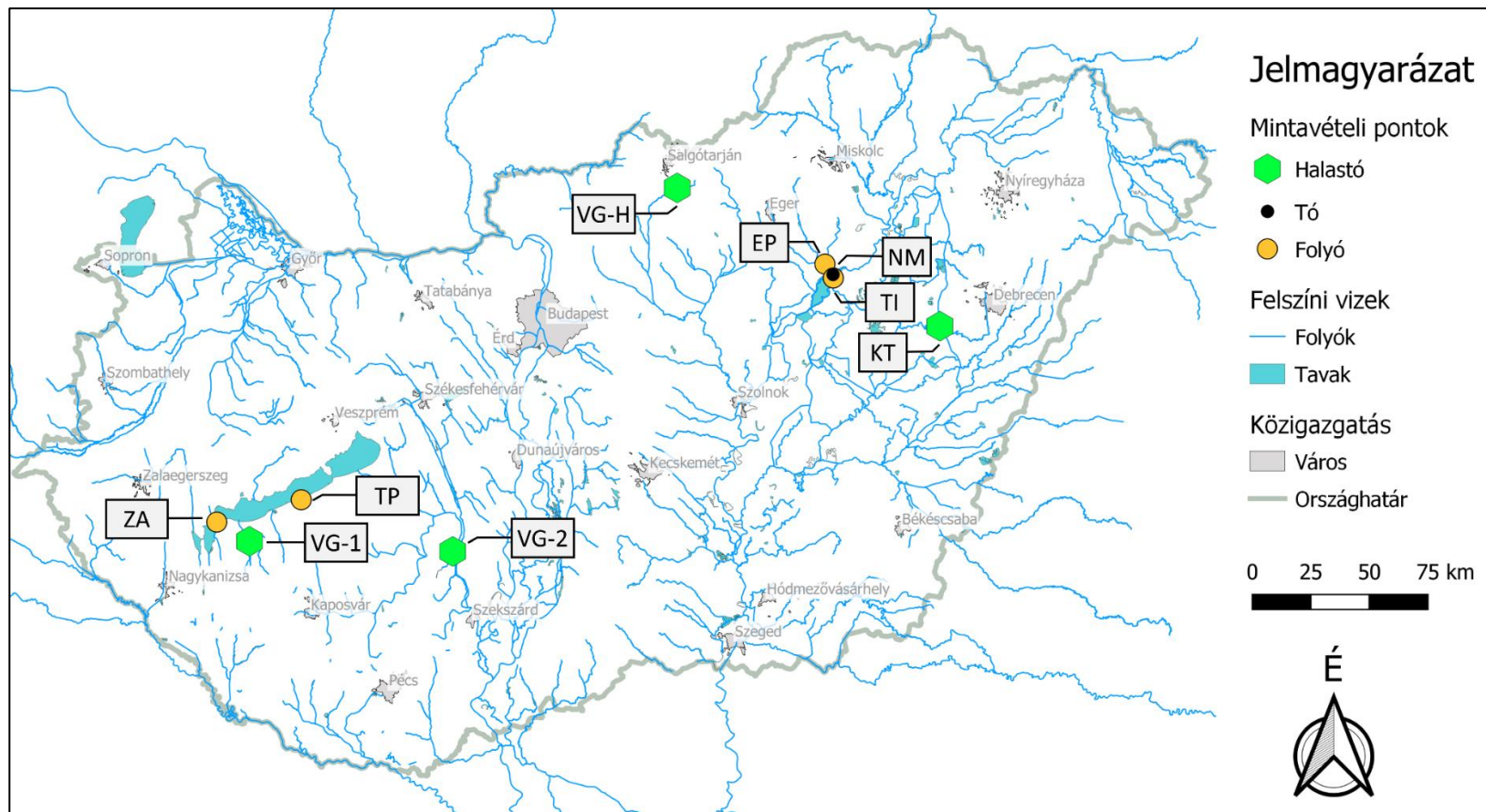
A minta a víz áramlási irányának megfelelően először 300 μm , majd 100 μm pórusátmérőjű szűrőn halad át. A szűrők után a szivattyúból vízmérő órán (GMB MID R100-H) keresztül távozik a szűrt víz. A mintavételek során átlagosan 1,5 m^3 , de legalább 1 m^3 mintát szűrtem a reprezentatív mintavétel érdekében. Egy minta szűrése átlagosan 30-40 percet vesz igénybe.

2.1.2.2. Üledék mintavétel

A halastavak laza mederüledékét Van Veen mintavevővel mintáztam. Minden mintavételi ponton 2-3 kg üledéket gyűjtöttem fém tárolóedényekbe. Az edényeket közvetlen a használatuk előtt Milli-Q vízzel öblítettem az esetlegesen kiülepedő szennyeződés eltávolítása érdekében.

2.1.3. Mintaelőkészítési és vizsgálati módszerek

A víz és üledék minták előkészítéséhez a szakirodalomban is széles körben alkalmazott Microplastic Sediment Separator (MPSS) elválasztót (Hydrobios GmbH, Németország) használtam. Vízminták esetében a szűrőket és a szűrőházakat alaposan kimosva a mintákat az elválasztóeszközbe öntöttem, majd $1,2 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű NaCl oldattal töltöttem fel. A minták kevertetését két órán át végeztem, majd a mintákat egy éjszakán át üleptettem. Üledék minták esetében az eszközbe mért üledék pontos tömegét rögzítettem, a kevertetést négy órán át végeztem, a többi lépés a vízmintáknál írtakkal megegyezik. Az egész éjszakás üleptetés után az eszköz felső elemében koncentrált kb. 200 cm^3 mintát főzőpohárba öntöttem, majd 200 cm^3 30% H_2O_2 -vel fűthető mágneseskeverőn 80°C -on és 450 RPM-en egy órán át inkubáltam. A szervesanyagok oxidációját a minta elszíneződése jelezte. Ezt követően a mintát $0,2 \mu\text{m}$ pórusú, 25 mm átmérőjű alumínium-oxid anyagú, Whatman Anodisc (Merck KGaA, Darmstadt, Németország) szűrőn szűrtem. A szűrőt Bruker Lumos FTIR mikroszkóppal (Bruker Corporation, Billerica, MA, USA) ATR módban vizsgáltam. A mintáról felvett spektrumokat a Nicodom FTIR adatbázissal korreláltattam. A 70%-nál nagyobb egyezést mutató részecskéket tekintettük azonosított műanyagoknak. Az azonosított részecskék darabszámát az eredeti vízminta egységnyi térfogatára (részecske/ m^3), üledékminták esetében az eredeti minta egységnyi tömegére (részecske/kg) vonatkoztatva állapítottam meg.



1. ábra: Víz és üledék mintavételi helyszínek elhelyezkedése. (VG: völgyzárógátas halastó; KT: körtöltéses halastó; VG-H: völgyzárógátas horgásztó; TP: Tetves-patak, Balaton befolyó; Z: Zala, Balaton befolyó; TI: Tisza folyó; NM: Nagy-morotva, Tisza-tó; EP: Eger-patak, Tisza-tó befolyó)

2.2. Mintavételi módszerfejlesztés és hatékonyság vizsgálat

2.2.1. A szűrt mintamennyiség és a szűrő pórusméret, mint hatékonysági jellemzők vizsgálata terepi körülmények között

A halastavak vizsgálata során alkalmazott szűrők közül a 300 µm-es betét pórusátmérője megfelel a leggyakrabban használt planktonhálós mintavételi technikának, de az általam alkalmazott 100 µm-es szűrőbetét pórusméretéhez közelítő planktonháló (manta-háló) applikációjára is lehet példát találni. A szűrési hatékonyság tesztelésénél céлом volt azonban, hogy a 100 µm-nél is kisebb részecskék szűrésére alkalmas rendszert állítsak össze. Ennek érdekében megvizsgáltam, hogy kisebb pórusú szűrők önmagukban vagy sorba kapcsolt elrendezésben alkalmasak-e nagy térfogatú (1-2 m³) vízminta szűrésére. A szűrési hatékonyság teszteléséhez különböző jellegű álló- és folyóvizeket jelöltem ki, a mintázásokat három ismétlésben végeztem. A mintavételt akkor tekintettem elfogadhatónak, ha az egyedi mérésekben legalább 1 m³, míg a három ismétlés átlagaként legalább 1,5 m³ víz mintázható volt. A vizsgált szűrőkapcsolási beállítások a következőképpen alakultak:

- 15 µm
- 50-15 µm
- 50-25 µm
- 100-50-15 µm.

A pórusátmérő csökkentésén túl a rendszer fejlesztése során általános műanyagmentességre törekedtem. Ez a kisebb méretű részecskék begyűjtése, vizsgálata esetén különösen fontos, mert ebben a mérettartományban a műanyag alkatrészokról, szerelvényekről esetlegesen leváló apró fragmentek jelentős torzulásokat okozhatnak a mérési eredményekben. Ennek minimalizálása érdekében a PVC csöveket gumitömlőkre cseréltem, a PP szűrőházakat rozsdamentes acélból készültre. A fejlesztett szűrőrendszer sémáját a **2. ábrán** mutatom be.



2. ábra: Szűrőhatékonyság terepi tesztelése és mintavételi hatékonyság üzemi tesztelése során használt, fejlesztett mintavevő rendszer.

2.2.2. A mikroműanyagok visszanyerési hatásfokának vizsgálata üzemi méretű modellrendszerben végzett mintavétel során

A mintavevő berendezés egyik fontos tulajdonsága, hogy nagy mennyiségű mintát gyűjtsön minél kisebb pórusú szűrőfelületen. Ez azonban még nem szolgáltat információt arra vonatkozóan, hogy a környezetben ténylegesen jelenlévő mikroműanyag koncentrációt a minta megfelelően reprezentálja-e, csak az adott rendszerrel, módszerrel begyűjthető mikroműanyagokról nyújt információt. A mikroműanyagok visszanyerési hatásfokára irányuló vizsgálatokat a nemzetközi szakirodalomban ez idáig mindössze néhány alkalommal végeztek (ZIAJAHROMI ET AL., 2017; BANNICK ET AL., 2018; FUNCK ET AL., 2020).

2.2.2.1. Referencia mikroműanyagok és előállításuk

Kereskedelmi forgalomban jellemzően csak porok vagy mikrogyöngyök érhetők el, így a használni kívánt egyéb jellegű mikroműanyagokat saját magamnak kellett előállítani. A műanyag részecskéket kriogén körülmények között végzett

örléssel, majd azt követő frakcionálással állítottam elő. Alapanyagul a leggyakrabban használt csomagolások közül választottam fóliákat: PE, PP, valamint PVC anyagú fóliákat és PET palack oldalfalából vágott lemezeket is alkalmaztam. A fóliák mellett különböző típusú szintetikus szálakat is használtam. Ezek csak hosszabb szálak formájában érhetők el kereskedelmileg (Kaposplast Kft., Magyarország), így a szükséges mérettartományba eső filamenteket ezek 1-1,5 mm hosszú darabokra vágásával állítottam elő. A fent bemutatott anyagokon túl kereskedelmi forgalomban kapható, UV fluoreszcensen jelölt PE mikrogyöngyöket (Cospheric Llc., USA) is használtam a kísérletek során.

2.2.2.2. A mikroműanyagok visszanyerési határfokának megállapítására vonatkozó mintavételi kísérletek

A műanyag szennyeződés kiküszöbölése miatt a méréseket rozsdamentes acélból készült, 1 x 1 x 3 méteres tartályban végeztem. Amikor a feltöltés során a vízmennyiség a tartályban elérte az 1,5 m³, a 0,1%-os Tween oldatban szuszpendált részecskéket (mindegyik típusból 30 darab, összesen 240 darab) a tartályba adagoltam, majd a kevertetés elindítása után a tartályt 2,4 m³-ig töltöttem. A végső mikroműanyag koncentráció a tesztrendszerben 100 db/m³ volt, ami környezetileg relevánsnak tekinthető (ZHAO ET AL., 2014; MANI ET AL., 2015; WANG ET AL., 2017). A kísérlet során öt különböző beállítással vettem mintát a tartályból, mindegyik beállítás és a műanyagrészecskék nélkül végzett kontroll mérés esetében három ismétlést végeztem (minden ismétlésben 1,5 m³ vizet mintáztam). Az öt beállítás a felszívó csonk mélységének és a keverés intenzitásának különböző kombinációjából adódott. A felszívó csonk helyzete alapján a mintánkat a víz felszínről (10 cm-rel felszín alatt) vagy a vízoszlop közepéről vettem. A természetben előforduló különböző áramlási viszonyú víztípusok modellezése érdekében a rendszert (1) folyamatosan (F), (2) periodikusan (P) vagy (3) egyáltalán nem kevertetem (N).

A mintavételek után a mintákat a szűrőházakból és a szűrőbetétekről 5 µm pórusú szűrőn szűrt, ioncserélt vízzel egy főzőpohárba mostam, majd 25 mm átmérőjű, 0,2 µm pórusú alumínium-oxid szűrőre (Whatman Anodisc, Merck KGaA,

Darmstadt, Németország) szűrtem. A mintákat Fourier-transzformációs (FT) spektrofotométerhez kapcsolt mikroszkóppal vizsgáltam a közeli infravörös (NIR) hullámhossztartományban. A mikroműanyagok azonosítása referencia spektrumokkal való korreláltatás alapján történt, a legalább 80%-os egyezést mutató részecskék értékelése történt meg.

2.3. Mintaelőkészítési módszerfejlesztés és hatékonysági vizsgálat

A mintavétel hatásfokának ismerete egy lépéssel közelebb visz a pontosabb mikroműanyag mérési eredmények eléréséhez, azonban a mintaelőkészítési során is veszteségek merülhetnek fel, így fontos e módszerek hatásfokát is vizsgálni.

2.3.1. A saját fejlesztésű „Small Volume Glass Separator (SVGS)” felépítése és működése

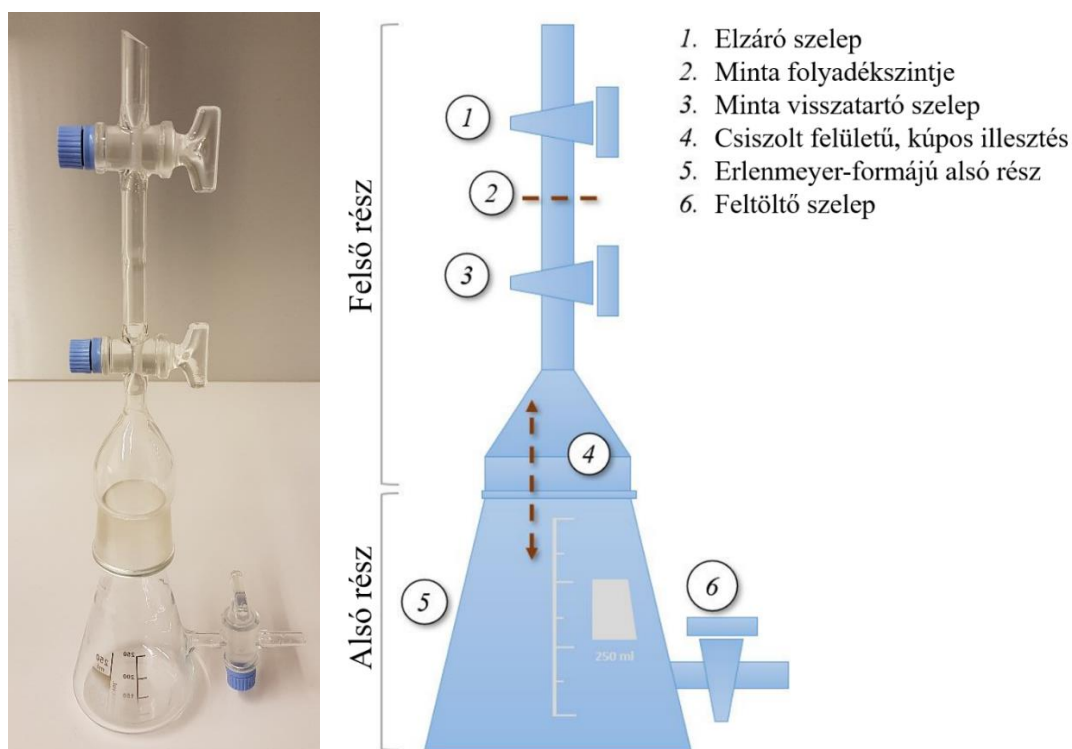
A mintaelőkészítés egyik fő lépése a sűrűségkülönbség alapján történő elválasztás. A szakirodalomban bemutatott különböző rendszerek előnyeit ötvözve olyan eszközt terveztem, amely gyors és költséghatékony mintaelőkészítést tesz lehetővé. 2019. évi bejelentést követően a felépített rendszer műszaki megoldása használatiminta-oltalom védeltséget kapott (Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala lajstromszám: 5155).

A Small Volume Glass Separator (SVGS – kis térfogatú üveg elválasztó) – amelyet a **3. ábrán** szemléltetek – két boroszilikát üvegből készült részből áll, amelyek kúpos alakú, csiszolt felületen illeszkednek egymáshoz. A minta az alsó rész szájnnyílásán keresztül tölthető az eszközbe. A minta betöltésekor üveg bevonatú mágneses keverőt is elhelyezünk az alsó részben, amely a homogenizálást segíti majd. A felső részt a helyére illesztjük, majd az oldalsó feltöltő szelepen át az edényt sóoldattal (kb. 500 cm³) feltöltjük. Az elválasztás után a minta a felső rész két szelepe (elzáró szelep, minta visszatartó szelep) között gyűjthető, amelynek végtérfogata kb. 10 cm³. A sóoldat az oldalsó szelepen leereszthető (újrahasznosítás céljából), majd a felső rész leválasztható. A felső részt fejjel lefelé fordítva a minta egyszerűen

kimosható. A szeparált minta kis térfogata segíti a további lépések egyszerű és hatékony kivitelezését.

2.3.2. A mintaelőkészítés hatékonyságának vizsgálata laboratóriumi modellrendszerben

Az SVGS eszközt és a hozzá megalkotott mintaelőkészítési módszerleírást laboratóriumi körülmények között teszteltem. Az új eszköz hatásfokát a szakirodalomban széles körben alkalmazott módszerrel hasonlítottam össze fluoreszcens mikrogöngyök segítségével, majd környezetileg releváns méretű, alakú és anyag típusú mikroműanyagokkal is vizsgáltam a részecskék visszanyerését.



3. ábra: A Small Volume Glass Separator (SVGS – kis térfogatú üveg elválasztó) felépítése.

2.3.2.1. Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása

A mintaelőkészítési módszerek összehasonlításához kereskedelmi forgalomban kapható mikrogöngyöket (Cospheric Llc.) használtam. A

természetesen előforduló mikroműanyagok kiküszöbölése és a vizsgálatok során szükséges állandó minőség érdekében nemzetközi szabványok alapján előállított mesterséges édesvíz (OECD 201) és mesterséges szennyvíz (OECD 303) oldatokat használtam. Az SVGS módszer teljesítményértékeléséhez nem pusztán az eszköz és a hozzá tartozó módszerleírás visszanyerési hatásfokát értékeltem, hanem a szakirodalomban elterjedt vízminta előkészítési módszerrel is összehasonlítottam azt (MASURA ET AL., 2015).

2.3.2.2. SVGS módszer hatékonyságának vizsgálata

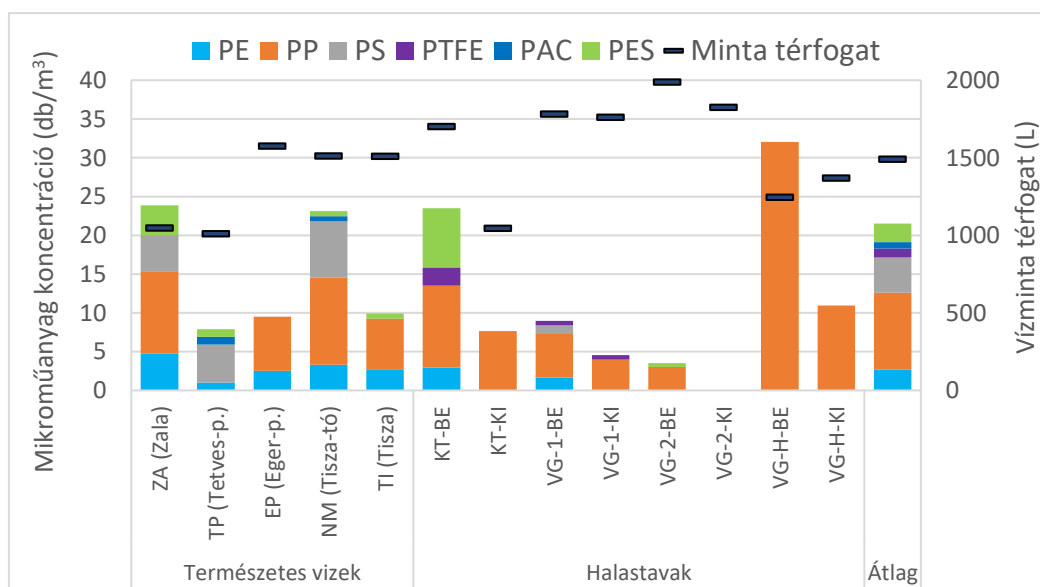
A módszereket összehasonlító vizsgálatokat követően az SVGS eszközzel végzett mintaelőkészítés hatékonyságát környezetileg releváns méretű, alakú és anyagtípusú mikroműanyagokkal is értékeltem. Ehhez 1 L, 50 mg/L mikrokristályos cellulózzal készített OECD 201 oldatot használtam, amelyet 10-10 részecskével (PE, PP, PET, PVC fragmenteket és PA szál) adalékoltam. A teszteket három ismétlésben végeztem, az elválasztást és oxidációt követően a mintákat 25 mm átmérőjű, 0,2 µm pórusú alumínium-oxid szűrőre (Whatman Anodisc, Merck KGaA, Darmstadt, Németország) szűrtem, majd FT-NIR mikrospektroszkópiás módszerrel vizsgáltam.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Környezeti minták mikroműanyag tartalma

3.1.1. Vízminták

A 13 vízminta (átlagos térfogat 1492 ± 326 liter) közül 12 tartalmazott 2 mm és 100 μm közötti méretű mikroműanyagokat $3,52\text{-}32,05$ db/ m^3 tartományban. A mintákban hat különböző polimer típust azonosítottam: polietilén (PE), polipropilén (PP), polisztirol (PS), politetrafluoretilén (PTFE), poliakrilát (PAC) és poliészter (PES) volt kimutatható. Az egyes mintavételi helyszínek eredményeit a **4. ábrán** szemléltetem, kiemelve, hogy méréseimig világviszonylatban sem jelentek meg publikációk mikroműanyagok halastavi indikációjáról. A **4. ábráról** látható, hogy a begyűjtött összes felszíni vízminta közül mindössze egy völgyzárógátas halastó elfolyó vizében (VG-2-KI) nem volt kimutatható 100 μm -nél nagyobb polimer részecskék jelenléte, ugyanakkor az összes halastó befolyó vize – amelyek természetes vízfolyásokból töltődnek – terhelt volt.



4. ábra: Felszíni víz minták mikroműanyag tartalma. (BE: befolyó víz, KI: elfolyó víz, VG: völgyzárógátas tó, KT: körtöltéses tó, PE: polietilén, PP: polipropilén, PS: polisztirol, PTFE: politetrafluoretilén, PAC: poliakrilát, PES: poliészter)

A vízminták eredményeiből változó mértékű terhelésre lehet következtetni, azonban a **halastavi befolyókban mért koncentrációk minden esetben nagyobbak, mint az elfolyó vizekben mértek.** A vízfolyások és tavak eredményei – bár hasonló tartományba esnek – mégsem hasonlíthatók össze egyértelműen a korábbi európai mérési adatokkal az eltérő mintavételi és vizsgálati módszerek miatt. A Rajnán jellemzően 1-10 részecske/m³ (MANI ET AL., 2015), míg Olaszországi tavak és svájci folyók esetében 0,2-4,1 db/m³, illetve 0,1-6,5 db/m³ mikroműanyag volt kimutatható (FAURE ET AL., 2015; FISCHER ET AL., 2016), de minden esetben 300 mikron pórusú planktonhálósával mintáztak és nem végeztek teljes körű FTIR azonosítást. Jelen dolgozat eredményei ezekhez képest előrelépést jelentenek abból a szempontból, hogy

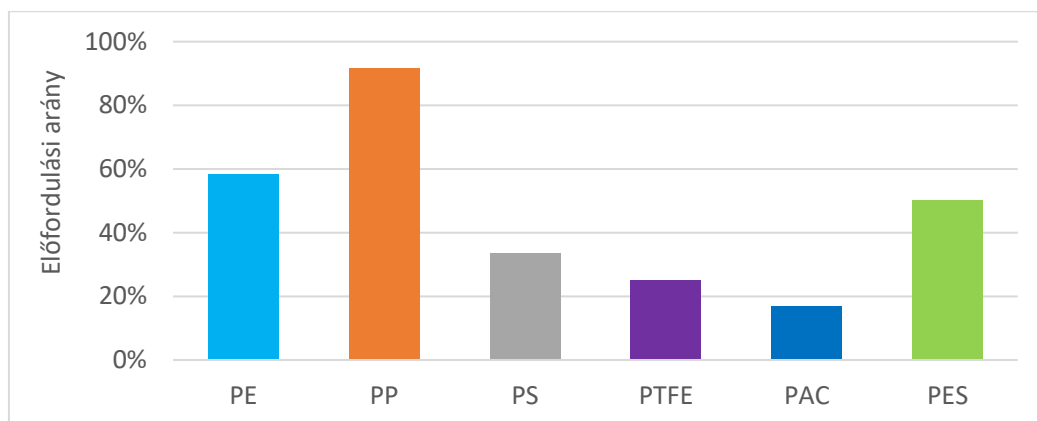
- a részecskéket kisebb alsó mérethatárral (100 µm) vizsgáltam,
- a morfológia alapján mikroműanyagok feltételezett összes részecske FTIR azonosítását elvégeztem, ezzel csökkentve a pozitív hibák előfordulását,
- az indikatív halastavi mikroműanyag mérési eredmények világviszonylatban teljesen hiányoztak a szakirodalmi adatokból.

Az egyes műanyag típusok előfordulási gyakoriságát vizsgálva megállapítható, hogy **a PP és a PE a leggyakrabban azonosított anyag.** Ez a két anyag az európai felszíni vizekben is a leggyakrabban és legnagyobb mennyiségben azonosított mikroműanyag (FAURE ET AL., 2015; MANI ET AL., 2015; SCHERER ET AL., 2020), ami nem meglepő, hiszen együttesen a gyártott műanyagok közel 50%-t teszik ki (HTTP 1). A különböző típusú műanyag részecskék előfordulási gyakoriságát a pozitív mintákban a **5. ábrán** szemléltetem.

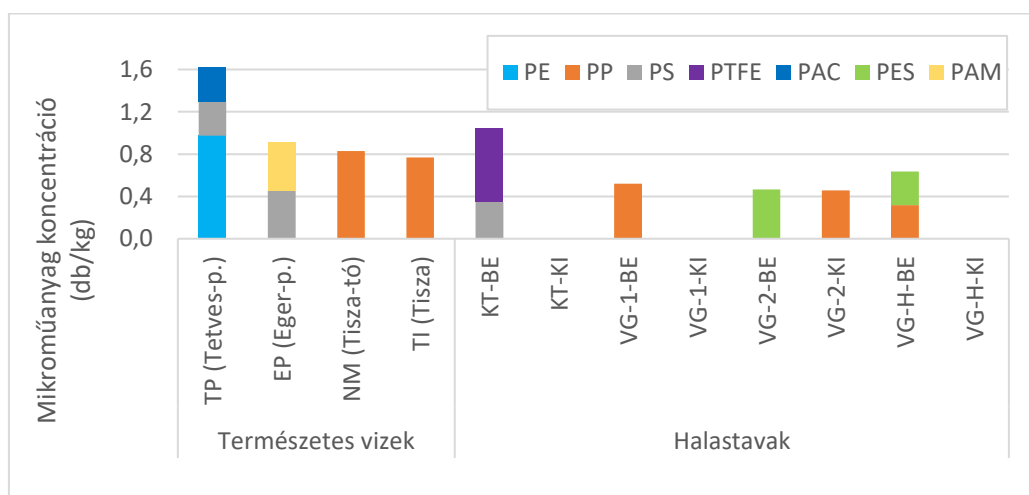
3.1.2. Üledékminták

Üledék mintát 12 helyszínről gyűjtöttem, mivel a Zala torkolata köves aljzata miatt nem volt mintázható. Helyszínenként átlagosan 2703 ± 493 g minta került feldolgozásra. A minták 75%-a tartalmazott mikroműanyagot. Az egyes helyszíneken mért mikroműanyag koncentrációkat a **6. ábrán** mutatom be. Összesen

kilenc helyszínen volt mikroműanyagok jelenléte kimutatható átlagosan $0,81 \pm 0,37$ részecske/kg értékben (0,46-1,62 részecske/kg tartományban). Ezek az adatok jelentősen kisebb mértékű terhelést mutatnak, mint a korábbi európai (KLEIN ET AL., 2015; FISCHER ET AL., 2016; LESLIE ET AL., 2017; SCHERER ET AL., 2020) és nemzetközi vizsgálatok eredményei (SU ET AL., 2016; WANG ET AL., 2017).



5. ábra: Különböző anyagú mikroműanyagok előfordulási gyakorisága a pozitív vízmintákban. (PE: polietilén, PP: polipropilén, PS: polisztirol, PTFE: politetrafluoretilén, PAC: poliakrilát, PES: poliészter)



6. ábra: Mikroműanyag koncentráció (részecske/kg) egyes üledék mintavételi helyszíneken és az üledékminták jellemző szemcseméret eloszlás szerinti kategorizálása.

(kavicsos homok > homokos iszap > iszap > agyagos iszap). (PE: polietilén, PP: polipropilén, PS: polisztirol, PTFE: politetrafluoretilén, PAC: poliakrilát, PES: poliészter, PAM: poliamid)

Az üledékmintákban a detektált mikroműanyag-típusok közül a PP a legjellemzőbben azonosított anyag. Korábbi európai mederüledék vizsgálatok eredményeivel összehasonlítva elmondható, hogy azokban a PP mellett a PE gyakori előfordulásáról is beszámolnak (VIANELLO ET AL., 2013; SCHERER ET AL., 2020). Míg a vízmintákban mért koncentrációk nagyságrendileg azonosak a szakirodalmi adatokkal, az üledékminták jóval alulmúlják azokat. A nemzetközi eredményekhez viszonyított kis koncentrációk egyik oka lehet az elválasztás során használt sóoldat sűrűsége (NaCl; $\sim 1,2 \text{ g/cm}^3$). Ebből kiindulva a mintaelőkészítés fejlesztésénél a későbbiekben célszerűvé vált nagyobb sűrűségű oldat használata, amely vélhetőleg javíthatja minden anyag típusú mikroműanyag visszanyerését, nem csak a nagyobb sűrűségűekét.

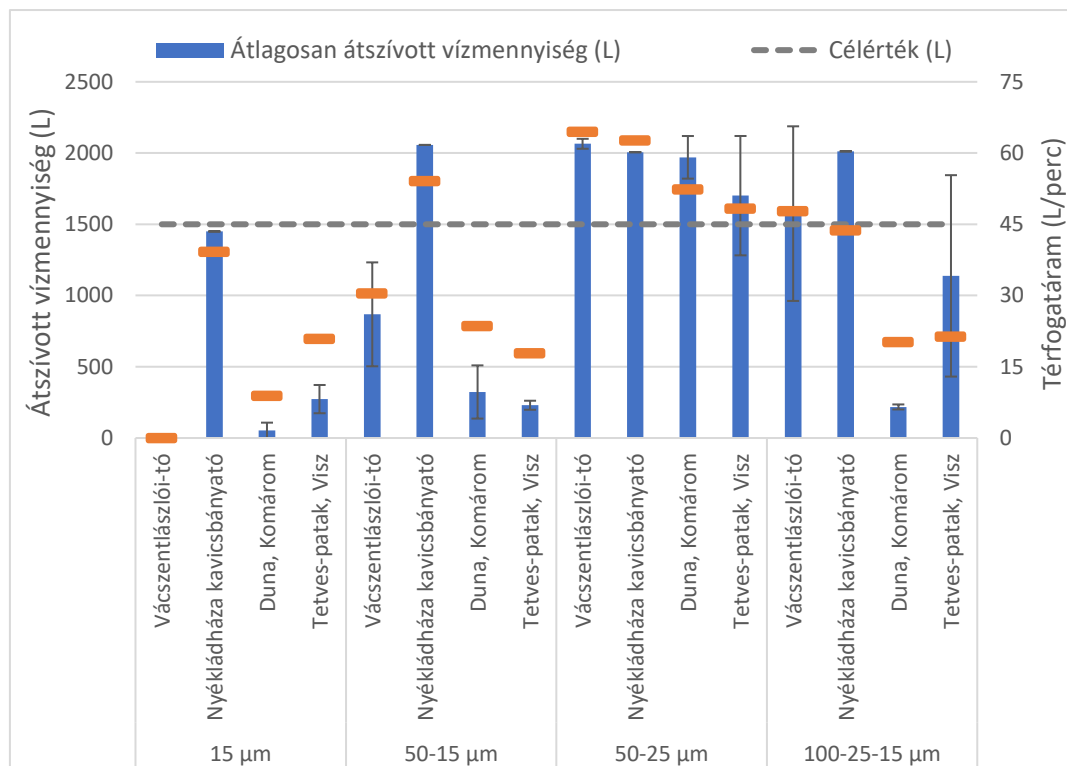
3.2. Vízmintavételi módszerfejlesztés és hatékonyságvizsgálat

Az első mintavételi sorozat alatt szerzett tapasztalatok alapján fontossá vált a mintavevő rendszer fejlesztése és hatásfokának vizsgálata. Ennek érdekében a szűrési hatékonyságot kisebb pórusméretű szűrőkaszkádokkal terepi körülmények között teszteltem. Ezeknél a vizsgálatoknál az elsődleges cél az volt, hogy minél kisebb pórus átmérő mellett, minél nagyobb mintatérfogatot (optimálisan 2 m^3) lehessen tartani. A teljes mintavevő rendszer hatékonyságát végül mikroműanyaggal mesterségesen dúsított modellrendszerben is vizsgáltam.

3.2.1. Szűrőbetétek alkalmazhatóságának vizsgálata terepi körülmények között

A vizsgálatokat a halastavi mintavételek során gyűjtött tapasztalatok alapján továbbfejlesztett mintavételi eszközzel végeztem, amelyben gumitömítőket és tömítéseket, valamint rozsdamentes szűrőházakat és szűrőbetéteket alkalmaztam. Az egyes szűrőkapcsolásokkal átszűrt átlagos vízmennyiségeket és számolt térfogatáram értékeket a **7. ábra** szemlélteti. Látható, hogy a két érték szoros korrelációt mutat, tehát a nagyobb vízmennyiségek átszívása arányosan nem igényelt

több időt, hiszen ezekben az esetekben a térfogatáram is nagyobb volt. Megállapítható, az 50-25 μm -es szűrőkapcsolás minden mintavételi helyszínen hatékonyak mutatkozott, jellemzően 1-2 m^3 körüli vízmennyiség is mintázható ily módon a szűrőkkel.



7. ábra: Egyes mintavételi helyeken alkalmazott különböző pórusú szűrők átlagos átszívott vízmennyisége (három ismétlés átlaga \pm szórás értékek) és a jellemző térfogatáram.

A felszíni vizek 25 μm -ig történő szűrése a nagy mintatérfogat megtartása mellett jelentős előrelépésnek mondható, hiszen kisebb pórusú szűrőn (3-10 μm) nagyobb mennyiségű (200-1100 L) mintát eddig csak tisztább mátrixnak számító ivóvízből (FUNCK ET AL., 2020; KIRSTEIN ET AL., 2020; MINTENIG ET AL., 2019) tudtak átszűrni kutatók. Felszíni vízből 32-50 μm pórusú szűrőn korábban mindössze 12-20 liter víz volt mintázható (ZHAO ET AL., 2014; WANG ET AL., 2017), nagyobb mennyiségű vizet csak 100-250 mikronos szűrőkön tudtak átfolyatni (LUSHER ET AL., 2014; SETÄLÄ ET AL., 2016).

3.2.2. Mikroműanyagok visszanyerési hatásfoka üzemi méretű modellrendszerben

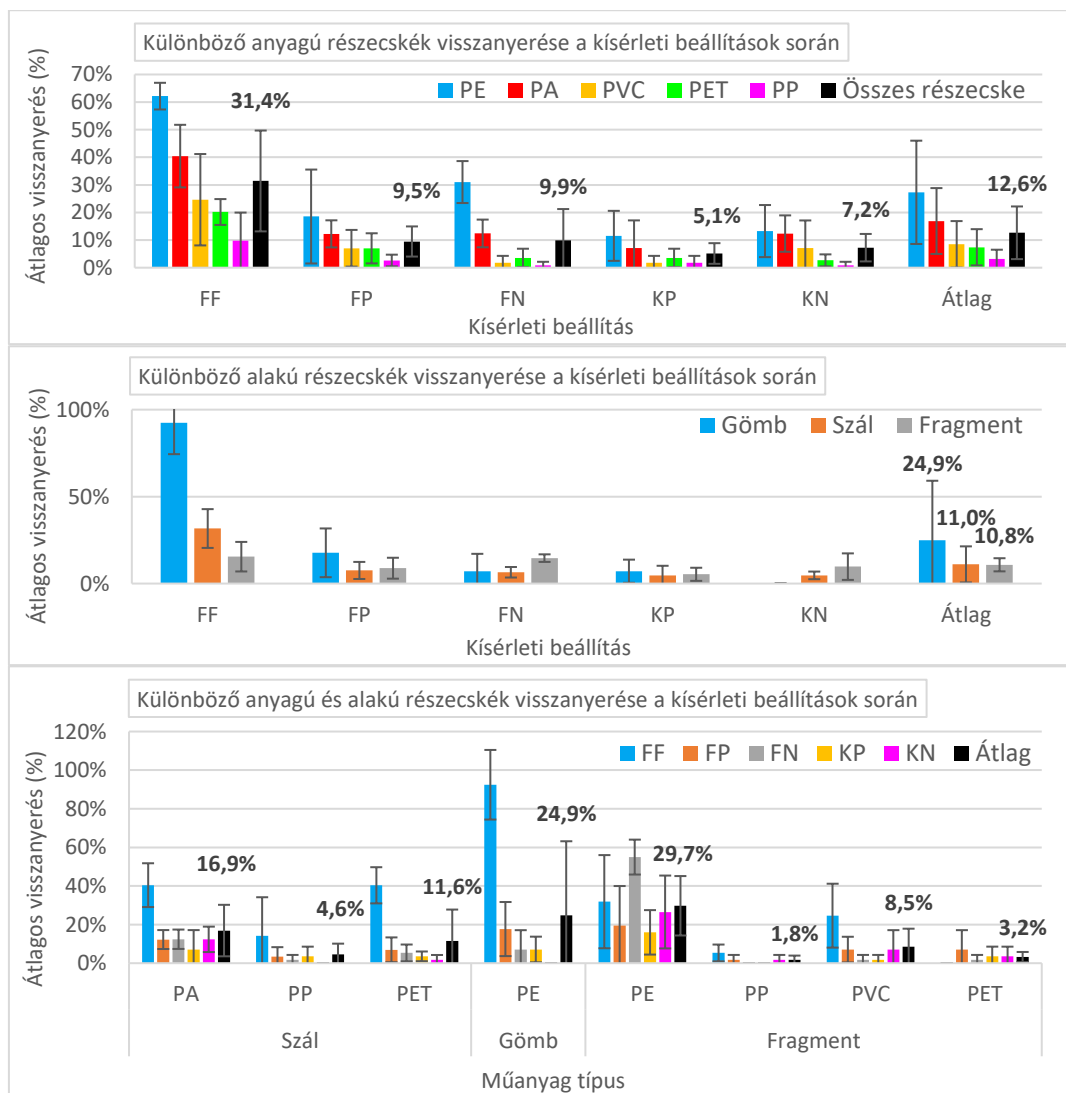
Miután terepi vizsgálatok során meggyőződtem a különböző szűrőkaszkádok alkalmazhatósági körülményeiről, a nagy víztérfogatot stabilan szűrni képes 50-25 µm-es kapcsolási beállítás mintavételi hatásfokát teszteltem. Ehhez üzemi méretű modellrendszert hoztam létre, ahol az általam beállított mikroműanyag koncentrációjú vízből mintákat vettem, majd mértem a kimutatható mikroműanyagok koncentrációját és visszanyerési számításokat végeztem.

A korábbi szakirodalmi mintavételi teljesítményértékelési tesztekhez viszonyítva vizsgálatom egyik újdonsága, hogy több mintavételi mélységet és keverési beállítást használva minősíti a mintavevő eszköz visszanyerési hatásfokát. A különböző keverési viszonyokkal az eltérő adottságokkal rendelkező felszíni vizeken (tavakon, folyókon) létrejövő változatos áramlási körülményeket kívántam kifejezni, ahol a mikroműanyagok eloszlását nem pusztán az anyagsűrűségük, hanem egyéb tényezők, így pl. a keveredési viszonyok is befolyásolják. A legnagyobb visszanyerési arányokat a tartály folyamatos keverése esetén mértem.

Vizsgálataim során a különböző mintavételi mélységek visszanyerésre gyakorolt hatását is mértem. A mintavételi mélységeket összehasonlítva elmondható, hogy **a felszíni mintavétel minden keverési beállításban hatékonyabbnak bizonyult**, mint a vízoszlop közepén végzett mintázás. A visszanyerési adatokat a **8. ábrán** mutatom be részletesen.

A használt anyagtípusok és sűrűségük visszanyerésre gyakorolt hatását vizsgálva elmondható, hogy egyértelműen a kis sűrűségű PE részecskék mutatták a legnagyobb visszanyerési értékeket minden beállításban [átlagosan 29,7% fragmenteknél ($0,95 \text{ g/cm}^3$) és 24,9% mikrogöngyöknél ($1,2 \text{ g/cm}^3$)]. A részecskék alakjának figyelmen kívül hagyása mellett az egyes anyagtípusok átlagos visszanyerési aránya három ismétlés alapján a következőképpen alakul: PE ($27,3 \pm 18,7\%$; 11,5-62,2% tartomány) > PA ($16,9 \pm 11,9\%$; 7,1-40,4% tartomány) > PVC ($8,5 \pm 8,4\%$; 1,8-24,6% tartomány) > PET ($7,4 \pm 6,6\%$; 2,7-20,2% tartomány) >

PP ($3,2 \pm 3,3\%$; $0,9-9,7\%$ tartomány). A PP kivételével ezek az eredmények a kisebb sűrűségű anyagok nagyobb visszanyerési tendenciájára utalnak: PE ($0,95 \text{ g/cm}^3$) > PE ($1,2 \text{ g/cm}^3$) > PA ($1,14 \text{ g/cm}^3$) > PET ($1,3 \text{ g/cm}^3$) > PVC ($1,29 \text{ g/cm}^3$) > PET ($1,37 \text{ g/cm}^3$). Ez a trend a nagyobb sűrűségű anyagok ülepedés miatti elvesztését jelezheti. Az eredményeket a **8. ábrán** szemléltetem.



8. ábra: Különböző anyagú és alakú részecskék átlagos visszanyerése (%) a kísérleti beállítások során. Három ismétlés átlaga \pm szórás értékek. FF – felszín, folyamatos keverés; FP – felszín, periodikus keverés; FN – felszín, nincs keverés; KP – vízoszlop közép, periodikus keverés; KN – vízoszlop közép, nincs keverés; PE – polietilén; PP – polipropilén; PVC – polivinil-klorid; PET – polietilén-tereftalát; PA – poliamid

Vizsgálataim során a részecskék méretének visszanyerésre gyakorolt hatása csak korlátozottan értékelhető, ugyanis csak a PP és PET anyag került különböző méretben a rendszerbe (1-1,5 mm szál és 100-300 µm fragment formájában). Korábbi tanulmányokhoz hasonlóan jelen eredményekből is megállapítható, hogy a visszanyerési arány a méret csökkenésével párhuzamosan csökken (HENGSTMANN ET AL., 2018; HURLEY ET AL., 2018; SILVA ET AL., 2018; WIGGIN & HOLLAND, 2019). További limitáló tényező az, hogy a különböző részecskék alakja nem egyezik, annak ellenére sem, hogy a szálak jellemzően vastagabbak és nem a műszálas ruhák mosásából származó filamenteket jellemzik. A részecskék mintavétel közben esetlegesen fellépő aprózódása további hibát jelenthet a darabszámra vonatkoztatott eredményközlésben, azonban ezt sem korábbi mintavételi határfokot elemző tesztek, sem jelen kutatás nem vizsgálta.

A tesztekhez választott részecskékkkel céloom a környezetileg releváns mikroműanyagok modellezése volt, így az alkalmazott részecskék lefedik a leggyakrabban előforduló mikroműanyag-formákat (fragmentek, szálak, mikrogyöngyök). Ez fontos szempont, ugyanis a szakirodalomban elérhető mintaelőkészítési (QUINN ET AL., 2017; HURLEY ET AL., 2018; WIGGIN & HOLLAND, 2019) és mintavételi határfok (BANNICK ET AL., 2018; HILDEBRANDT ET AL., 2019; FUNCK ET AL., 2020) vizsgálatok során a gömb alakú anyagok (mikrogyöngyök, pelletek) használata a legelterjedtebb. Az eredmények egyértelműen jelzik, hogy a referenciaanyagok alakját tekintve a mikrogyöngyök visszanyerése a legnagyobb ($24,9 \pm 34,4\%$). A szálak ($11 \pm 10,4\%$) és fragmentek ($10,8 \pm 3,8\%$) visszanyerése ennél jóval kisebb, ahogy az a **8. ábrán** is látható. A jövőbeli vizsgálatok során a környezetileg releváns referenciaanyagok használata fontos irány, hiszen vizsgálataim eredményei is megerősíti azt az álláspontot, miszerint **kizárólag mikrogyöngyöket alkalmazó vizsgálatok túl optimista visszanyerési arányokat mutathatnak** és így túlbecsülhetik az adott módszer környezetileg releváns alakú és méretű mikroműanyagokra vonatkozó visszanyerését.

3.3. A mintaelőkészítés hatékonyságának vizsgálata laboratóriumi modellrendszerben

A mintavétel hatásfokának vizsgálatán túl céлом volt a mintaelőkészítési folyamat mikroműanyag visszanyerési jellemzőinek a megismerése is, hiszen itt is jelentkezhet veszteség vagy a minta elszennyeződése, ami a végső eredmények pontosságát befolyásolhatja. A mintaelőkészítés körülményeinek javítása érdekében a tesztek elvégzése előtt **kifejlesztettem egy a mikroműanyagok elválasztásához használható eszközt (SVGS, Small Volume Glass Separator, kis térfogatú üveg elválasztó), amely nagy sűrűségű, így jobb elválasztást biztosító sóoldattal is költséghatékonyan üzemeltethető kis térfogata miatt.** Az eszközhöz tartozó részletes módszerleírást is megalkottam, az így létre jövő mintaelőkészítési eljárást fluoreszcens mikrogyöngyök és szabványos modelloldatok használatával irodalomban elterjedt előkészítési módszerrel hasonlítottam össze. A modelloldatok biztosítják a különböző beállítások megfelelő ismételtetését, így hozzájárulnak a megbízható eredményekhez. Az SVGS visszanyerési hatásfokát környezetileg releváns anyagú, méretű és alakú mikroműanyagokkal is minősítettem.

3.3.1. Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása

Ahogy azt a **9. ábra** szemlélteti, az öt ismétlésben végzett mérések eredményei alapján elmondható, hogy a **Masura és munkatársai által leírt módszer (MASURA ET AL., 2015) átlagos visszanyerési 45-70% közöttiek, míg az SVGS használatával 81-93%-os visszanyerés mérhető.** A mintaelőkészítési módszerek során használt minden referenciaanyag gömb alakú és PE anyagú, így a sűrűség és méret visszanyerésre gyakorolt hatása jól elemezhető. **Az anyagsűrűség visszanyerésre gyakorolt hatása egyértelműen kimutatható volt,** hiszen a Masura és munkatársai által kidolgozott módszerrel (MASURA ET AL., 2015) a legnagyobb sűrűségű anyag (300-355 μm , 1,2 g/cm^3) visszanyerése öt ismétlés átlaga alapján igen kicsi (átlagosan $14\pm 20\%$, 4-34% tartományban), míg a kisebb sűrűségű részecskék (300-355 μm , 1,13 g/cm^3) visszanyerése nagyobb (átlagosan $65\pm 14\%$,

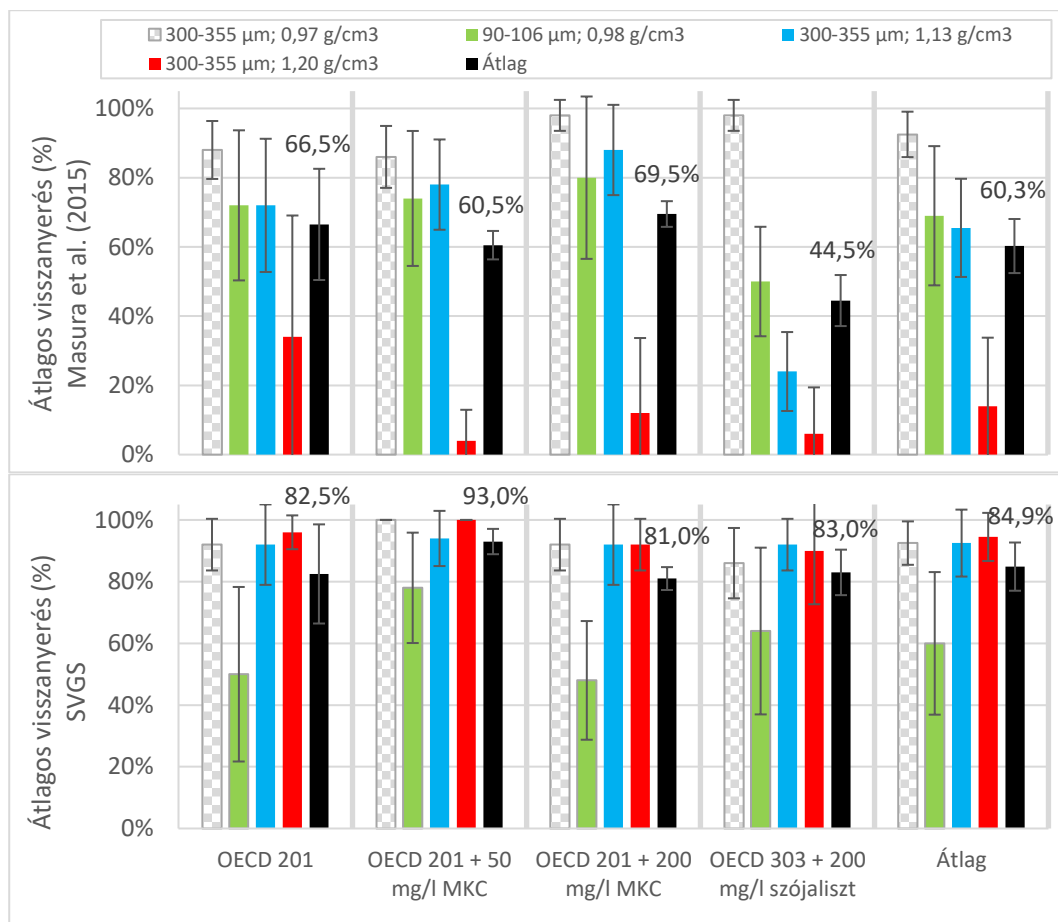
24-88% tartományban). A legjobban a legkisebb sűrűségű anyag (300-355 μm , 0,97 g/cm^3) volt visszanyerhető (átlagosan 92,5 \pm 7%, 86-98% tartományban). Az SVGS módszer esetében a sűrűségkülönbség hatása nem érzékelhető, hiszen az összes 300-355 μm méretű részecske közel azonos mértékben volt visszanyerhető (átlagosan 92,5 \pm 11 - 94,5 \pm 8%, 86-100% tartományban).

A részecskék méretének hatása jelentős, hiszen az azonos sűrűségű (0,97 g/cm^3), de eltérő méretű (90-106 μm ; 300-355 μm) mikrogyöngyök közül **a nagyobb méretű részecskék nagyobb visszanyerést mutattak** mindkét módszer esetében (átlagosan 92,5 \pm 7%-ot). A kisebb részecskék visszanyerése a két módszer között minimálisan tér el: az SVGS-sel átlagosan 60 \pm 23% (47%-78% tartományban), míg a szakirodalomban leírt módszerrel átlagosan 69 \pm 20% (50-74%) visszanyerés érhető el. Az eredményeket a **9. ábra** részletesen szemlélteti.

3.3.2. A mintaelőkészítés hatásfokának vizsgálata az SVGS módszerrel

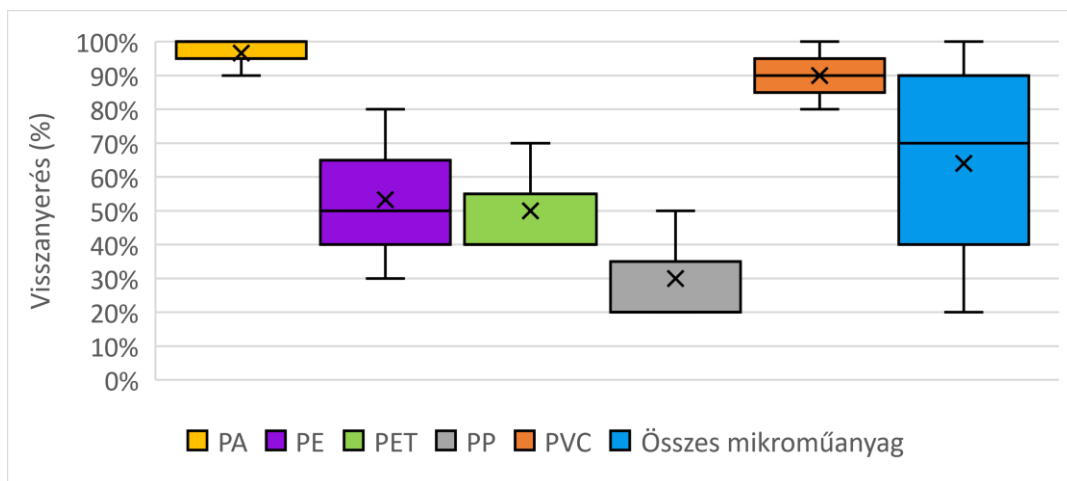
Az SVGS eszköz visszanyerési hatásfokát nem csak mikrogyöngyökkel, de a környezeti mintákban gyakrabban megjelenő mikroműanyagokkal, fragmentekkel (100-300 μm -es PE, PP, PET, PVC) és szálakkal (1000-1500 μm hosszú PA) is teszteltem.

Ahogy az a **10. ábrán** látható, az összes műanyagtípus átlagos visszanyerése három ismétlés alapján 64 \pm 28,7% volt. A kísérlethez használt, öt különböző anyagtypusból a PA (1,14 g/cm^3) visszanyerése volt a legnagyobb, minden ismétlésben 90% fölötti (átlagosan 96,7 \pm 4,7%). A második legnagyobb visszanyerést (átlagosan 90 \pm 8,2%) a PVC részecskékénél (1,29 g/cm^3) tapasztaltam. A PET (1,37 g/cm^3) és PE (0,95 g/cm^3) részecskéket közel azonos mértékben azonosítottam (50 \pm 14,1% és 53,3 \pm 20,6%). Érdekes módon a legkisebb mértékben a PP volt visszanyerhető (30 \pm 14,1%), pedig az alkalmazott anyagok közül ez a legkisebb sűrűségű (0,9 g/cm^3).



9. ábra: 90-106 μm és 300-355 μm méretű, 0,97-1,2 g/cm³ sűrűségű fluoreszcensen jelölt polietilén mikrogöngyökkel végzett tesztek során tapasztalt visszanyerési arányok (öt ismétlés átlaga ± szórás) a saját fejlesztésű (SVGS – Small Volume Glass Separator, kis térfogatú üveg elválasztó) és az irodalomban gyakran hivatkozott (MASURA ET AL., 2015) mintaelőkészítési módszer összehasonlítása során.

A fluoreszcens mikrogöngyökkel és a környezeti mintákban gyakrabban előforduló alakú és méretű fragmentekkel, szálakkal végzett tesztek esetén is megállapítható volt, hogy a kisebb méretű részecskék visszanyerése rosszabb, mint a nagyobbaké. A fluoreszcens mikrogöngyökkel végzett módszer összehasonlítás során az anyagsűrűség visszanyerésre gyakorolt hatása is egyértelműen kimutatható volt, míg a környezetileg releváns mikroműanyagok használata során az anyagsűrűség visszanyerésre gyakorolt hatása nem volt megfigyelhető.



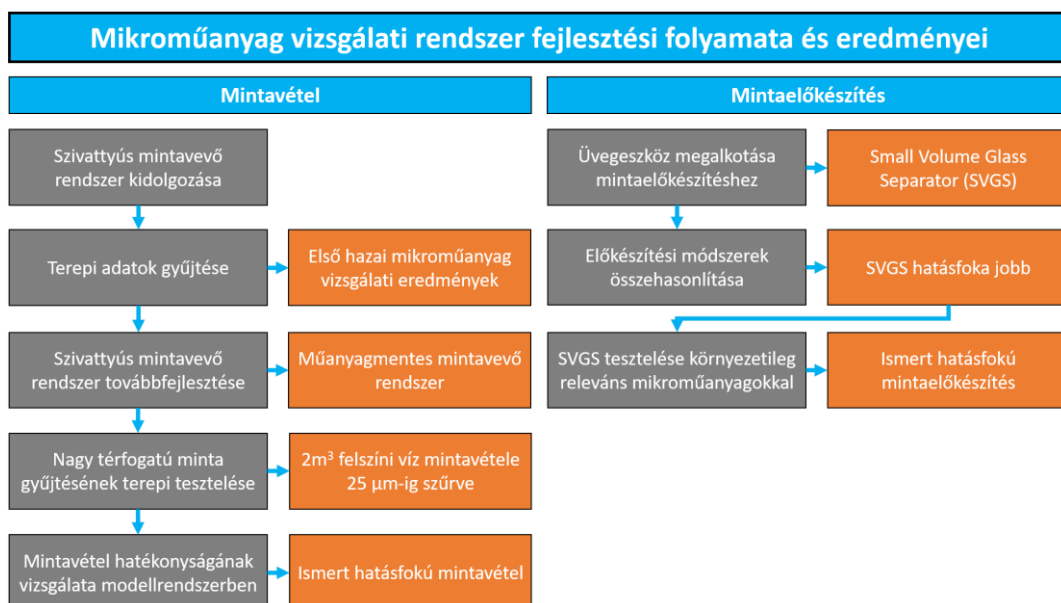
10. ábra: Egyes referencia mikroműanyagok visszanyerési adatai a saját fejlesztésű (SVGS – Small Volume Glass Separator, kis térfogatú üveg elválasztó) eszközzel három ismétlés alapján. (Minimum és maximum értékek vonallal jelezve, interkvartilis rész oszloppal jelezve, azon belül az átlag x-el, míg a medián vonallal jelölve.)

A mintavételi hatások vizsgálatoknál tapasztaltakhoz hasonlóan a mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása során az SVGS-ben azonos modellközegben alkalmazott mikrogönggyökkel elért visszanyerési arányok (átlagosan $93 \pm 2\%$) és a környezetileg releváns részecskékkel mutató eredmények (átlagosan $64 \pm 28,7\%$) különbsége is rávilágít arra, hogy **csak gömb alakú részecskék alkalmazása esetén kísérletesen túl optimista visszanyerési hatások állapítható meg.** A vizsgálataimban alkalmazott, környezetileg releváns mikroműanyagok az eszköz gyakorlati használhatóságáról és megbízhatóságáról biztosabb képet adnak, mintha a minősítést csak mikrogönggyökkel végeztem volna.

A környezetileg releváns mikroműanyagok alkalmazása mellett a fluoreszcensen jelölt mikrogönggyök használatának is van jelentősége, hiszen segíthetnek az adott módszer egyes erősségeit vagy gyengeségeit felderíteni. A mintában ezek a részecskék az előkészítés folyamata közben UV fényel megvilágítva szabad szemmel is megfigyelhetők, így könnyen nyomon követhetők, segítenek a veszteséget jelentő helyek, műveletek feltárásában. Különböző módszerek gyors összehasonlítására vagy minőségbiztosításra (pl. környezeti mintában kísérőszertenderdként való alkalmazás) kifejezetten alkalmasak lehetnek.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Doktori munkám során az elvégzett kutatások kiterjedtek a mikroműanyagok környezeti elemekből (felszíni víz és üledékek) történő azonosítására, valamint a jelenleg szerteágazó, az eredmények összehasonlíthatóságát akadályozó mintavételi és mintaelőkészítési módszerek fejlesztésére, és ezeknek a műveleteknek egy egységes mikroműanyag vizsgálati rendszerbe foglalására. A módszerfejlesztés lépéseit és eredményeit a **11. ábrán** foglaltam össze.



11. ábra: A kutatómunka során a mikroműanyagok mintavételét és mintaelőkészítését magába foglaló vizsgálati rendszer kialakításának fontosabb fejlesztési lépései és eredményei.

Magyarországon elsőként vizsgáltam indikatív jelleggel a mikroműanyagok megjelenését a környezetben, ezek egyben Közép-Kelet-Európa első eredményei is. Mivel a nemzetközileg publikált mintavételi és mintaelőkészítési módszerek jelenleg nem egységesek, ezek fejlesztéséhez és hatásfokuk értékeléséhez is hozzájárultam vizsgálataimmal. Kutatásom során mintáztam minden természetes helyszínről (tavakból, folyókból) származó minta és az összes halastó befolyó vize – amelyek természetes vízfolyásokból ágaznak – terhelt volt mikroműanyagokkal. Mindössze

egy völgyzárógátas halastó elfolyó vizében nem volt kimutatható polimer részecskék jelenléte. Az eredmények jellemzően 5-25 részecske/m³ tartományba esnek (átlag: 13,79 db/m³, min.: 3,52 db/m³ max.: 32,05 db/m³, 13 vízminta eredményei alapján). Bár a nemzetközi publikációk adatainak egymás közötti és az eredményeimmel való pontos összehasonlítását az eltérő módszerek (pl. mintavételi stratégia, pórusátmérő, azonosítási módszer) nem teszik lehetővé, mégis látható, hogy az eredményeim a szakirodalmi adatokhoz nagyságrendileg hasonló környezeti terhelést mutatnak. Az általam leggyakrabban azonosított anyagtípusok (PE; PP; PS) is összhangban vannak a korábban közölt eredményekkel. Az üledékminták vizsgálata során megállapítható volt, hogy a nemzetközi eredményeknél nagyságrendekkel kisebb a mikroműanyagok koncentrációja, egy esetben sem haladta meg a 2 részecske/kg értéket. Az azonosított polimerek jellemzően PE és PS anyagúak voltak

A kutatásom keretében elvégzett információgyűjtő, indikatív vizsgálatok az első hazai eredményeket szolgáltatják, azonban az egyes helyszínek közötti eltérések robusztus elemzésére vagy időbeli változások követésére nem alkalmasak. Ezen információk gyűjtéséhez a mikroműanyagok összetettebb monitoring rendszerét kell megalkotni és bevezetni, hiszen ezek az eredmények az ökológiai és humánegészségügyi kockázati modellek megbízható expozíciós adataiként szükségszerűek lesznek a jövőben.

A monitoring rendszerek felállítása egységes módszerek hiányában nem lehetséges, így munkám fontos célja és eredménye a mintavételi és mintaelőkészítési módszerek fejlesztése, azok hatásfokának értékelése. Munkám során olyan paramétereket, eszközöket, módszereket terveztem, hoztam létre és alkalmaztam, amelyek megkönnyítik az édesvízi mintavételi és mintaelőkészítési műveletek reprodukálhatóságát, ezzel utat nyitva az egységesítés, a szabványosítás felé.

Az első hazai mikroműanyag mérésekhez kialakítottam egy szivattyúzáson és frakcionált szűréseken alapuló mintavételi rendszert. Az eszköz kompakt, könnyen alkalmazható, használatához nem feltétel vízi jármű vagy híd igénybevétele, ami monitoring program tervezésekor fontos gyakorlati szempont. További előnyt jelentenek a könnyen lezárható szűrőházak, amelyek lehetővé teszik a minta

egyszerű szállítását és nem igénylik a terepen való kétes kimenetelű tisztítást két mintavétel között. A mintázott víztérfogat pontosan mérhető, így a módszer jól reprodukálható, az eredmények megbízhatóbbak, összehasonlíthatóbbak.

A terepi tapasztalatok alapján a rendszert továbbfejlesztettem, kiküszöböltem a műanyag alkatrészeket (tömlő, szűrőház), a használatot egyszerűsítő kiegészítőket terveztem és alkalmaztam. Megvizsgáltam, hogy különböző trofitású magyarországi felszíni vizeken univerzálisan milyen szűrő kapcsolási beállításokkal lehet nagy mennyiségű mintát (legalább 1-2 m³) venni minél kisebb pórusátmérő mellett. Ennek érdekében eltérő szűrőkapcsolási beállításokat különböző víztípusokon teszteltem és mértem a maximálisan szűrhető vízmennyiséget. A mérések alapján elmondható, hogy az 50 és 25 µm pórusú szűrőkkel ideális eredmény volt elérhető minden víztípuson, jellemzően 2 m³ víz szűrésére is alkalmasnak bizonyult a rendszer.

A nagy mennyiségű minta 25 µm-ig történő szűrése előrelépés a nemzetközi mikroműanyag-kutatásban, hiszen ekkora mennyiségű mintát eddig csak 100-300 µm-ig szűrtek. Módszeremmel mód nyílik ennél a szűrési tartománynál akár egy nagyságrenddel kisebb mérettartományból történő mintázásra. További fejlesztési irány lehet a még kisebb, akár 10 µm-es pórusméretű szűrők alkalmazása, azonban hazai mezotróf-hipertróf vizeken ilyen szűrőkön történő nagy víztérfogat átfolyatásához a szűrőfelület növelése, vagy a szűrőbetétek fordított áramlású, mintavétel közben végzett szakaszos visszamosásának megvalósítása szükséges. A szűrőrendszer ilyen irányú fejlesztése nem csak felszíni vizek szempontjából fontos, de lehetőséget jelent a környezeti mikroműanyag terhelés egyik forrásainak, a szennyvíztisztítók vizsgálatára is.

A mintavevő berendezés egyik fontos tulajdonsága, hogy nagy mennyiségű mintát gyűjtsön minél kisebb pórusú szűrőfelületen. Ez azonban még nem szolgáltat információt arra vonatkozóan, hogy a környezetben ténylegesen jelenlévő mikroműanyag koncentrációt a minta megfelelően reprezentálja-e. Ennek érdekében a mintavevő eszköz és a teljes mintavételi folyamat mikroműanyag-visszanyerési hatásfokát üzemi méretű modellrendszerben teszteltem, a terepen legjobb térfogat adatokat mutató 50-25 µm-es szűrőbetétek vizsgálatával. A vizsgálatokhoz nem

pusztán a kereskedelmi forgalomban elérhető, szabályos alakú mikrogyöngyöket alkalmaztam, hanem más, a környezetben gyakran előforduló szabálytalan alakú részecskéket (fragmenteket, szálakat) előállítottam és a vizsgálatba vontam.

A mintavétel hatásfokát a modellkísérletben két mélységben (felszín, vízoszlop közép), különböző keverési beállítások (folyamatos, periodikus, keverés nélküli) mellett mértem. A felszíni mintavétel minden esetben hatékonyabbnak bizonyult, mint a mélyebb rétegből végzett mintagyűjtés. A modellrendszerben végzett mintavétel eredményei a kisebb sűrűségű anyagok nagyobb visszanyerési tendenciájára utalnak. Amennyiben a részecskék alakját is figyelembe vesszük a visszanyerési adatok értékelésénél, elmondható, hogy a mikrogyöngyök a szálaknál és a fragmenteknél nagyobb mértékben azonosíthatók. Ezek az adatok igazolják azt a feltételezést, miszerint csak mikrogyöngyök használata túl optimális szakirodalmi visszanyerési eredményekhez vezethet. Ennek értelmében a mintavevő eszközök környezeti teljesítményének értékelése érdekében fontos a további, környezetileg releváns referenciaanyagok (fragmentek, szálak) használata is.

A mintavétel hatásfokának ismerete egy lépéssel közelebb visz a pontosabb mikroműanyag eredmények méréséhez, azonban a mintaelőkészítési lépések során is veszteségek merülhetnek fel. Ebből kifolyólag fontos e lépések hatásfokát is vizsgálni. A mintaelőkészítés fejlesztése érdekében megalkottam egy kis térfogatú, üvegből készült elválasztóeszközt (SVGS). A kis térfogat lehetővé teszi a nagy sűrűségű oldatok költséghatékony használatát, így a nagyobb sűrűségű mikroműanyagok visszanyerése javítható. Az eszközzel végzendő műveletsorrend részletes módszerleírását is megalkottam, az így létrejövő mintaelőkészítési eljárást fluoreszcens mikrogyöngyök és szabványos modelloldatok használatával az irodalomban elterjedt előkészítési módszerrel hasonlítottam össze.

A tesztekhez nemzetközi szabványok alapján előállított, referencia műanyagokkal mesterségesen adalékolt vizeket használtam. Fluoreszcens mikrogyöngyökkel öt ismétlésben végzett mérések alapján elmondható, hogy a Masura és munkatársai által leírt módszer (MASURA ET AL., 2015) átlagos visszanyerései 45-70% közöttiek, míg az SVGS használatával 81-93%-os

visszanyerés mérhető. A nagyobb, 300-355 µm méretű részecskék nagyobb visszanyerést mutattak mindkét módszer esetében (átlagosan 92,5%-ot). Az anyagsűrűség visszanyerésre gyakorolt hatása egyértelműen kimutatható volt, az SVGS-sel a nagyobb sűrűségű anyagok is jól visszanyerhetőek voltak, míg a szakirodalmi módszerrel azok jelentős része elveszett.

Az SVGS nagyobb visszanyerési értékei alapján jó előkészítési módszernek bizonyult, teljesítményéről környezetileg releváns referencia mikroműanyagok (szálak, fragmentek) használatával is meggyőződtem. A különböző anyagok átlagos visszanyerése $64 \pm 28,7\%$ volt. Az anyagsűrűség visszanyerésre gyakorolt hatása nem volt kimutatható, azonban a mintavétel értékelésénél tapasztaltakhoz hasonlóan itt is megállapítottam a különböző alakú részecskék adatai alapján, hogy csak mikrogyöngyök használata túlzó, felülbecsült eredményekhez vezet.

A fentebb említett javaslatok irányába mutató kutatások az elmúlt pár évben körvonalazódnak. A tématerület további hatékony fejlődéséhez összefoglalva az alábbi lépésekre van szükség:

- mintavételi, mintaelőkészítési és vizsgálati módszerek hatásfokának további részletes megismerése, validációja,
- a különböző módszerek alkalmazhatósági, költséghatékonysági és hatásfok paramétereit alapján egységesített, szabványosított eljárások megalkotása,
- egységesített módszerekkel végzett átfogó monitoring programok a környezeti koncentrációk, a mikroműanyag-terhelés forrásainak (pl. szennyvíz), valamint a terhelés környezeti sorsának (pl. kiülepedés) részletesebb megismerése érdekében,
- a humán expozíciós utak (pl. ivóvíz, palackozott víz, élelmiszerek, levegőminták) azonosítása
- a mikroműanyagok potenciális káros hatásainak ökotoxikológiai, humán egészségügyi vizsgálata és komplex kockázatbecslési modellek megalkotása.
- a társadalmi, gyártói és forgalmazói szemléletformálás a megelőzés (anyagfelhasználás- és hulladékcsökkentés) érdekében, valamint hatékony hulladékkezelési rendszerek fejlesztése és alkalmazása.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

I. tézis

Magyarországi felszíni vizekben, köztük halastavak vizében frakcionált szűrési mintavételt alkalmazva először mutattam ki mikroműanyagok jelenlétét 0,1-2 mm közötti mérettartományban, megállapítva, hogy átlagos koncentrációjuk 21,5 db/ m³ (3,52-32,05 db/m³ tartományban). Nátrium-klorid oldatos elválasztást követően részletesen meghatároztam a szemcsék anyag típusát és megállapítottam, hogy a legnagyobb mennyiségben, illetve a leggyakrabban előforduló anyagok a polipropilén és a polietilén.

II. tézis

Mederüledékek indikatív vizsgálata során nátrium-klorid oldatos elválasztást követően meghatároztam a mikroműanyagok darabszámát és pontos anyag típusát. Megállapítottam, hogy a hazai akvakultúrás rendszerek és természetes felszíni vizek (tavak, folyók) üledékében egyéb nemzetközi eredményekhez képest jelentősen kisebb mikroműanyag koncentráció mutatható ki, átlagosan 0,37 részecske/kg értékben (0,46-1,62 részecske/kg tartományban), a melyek között leggyakrabban a polipropilén anyagúak fordulnak elő.

III. tézis

Műanyagmentes, univerzálisan alkalmazható mintavevő eszköz konstrukciót hoztam létre felszíni vizek mikroműanyag tartalmának meghatározásához, úgy, hogy a rugalmas elemek gumiból, míg a szűrők és szűrőházak rozsdamentes acélból készültek. Az eszközt különböző víztípusokon tesztelve megállapítottam, hogy szűrők sorba kapcsolásával nagy mennyiségű minta (akár 2 m³) szűrhető akár kis pórusátmérőjű (25 µm) szűrőn szárazföldi felszíni vizekből is, ami a nemzetközi mikroműanyag-kutatásban jelentős előrelépés, hiszen nagy víztérfogatot (1-2 m³) eddig csak nagyobb pórusméretű (100-250 µm) szűrőn tudtak szűrni, míg kis pórusú szűrőn (32-50) csak kevés minta (12-20 L) volt áteresztendő.

IV. tézis

Elsőként gyűjtöttem információt frakcionált szűrőrendszer teljes mintavételi folyamatának hatékonyságáról különböző alakú, anyagú és méretű, környezetileg releváns koncentrációban alkalmazott mikroműanyagok visszanyerésének mérésével. Megállapítottam, hogy a kísérleti beállításokban a felszínközeli mintavétel minden esetben nagyobb hatásfokú. Eredményeim rámutatnak arra, hogy a csak mikrogyönggyel végzett tesztek során mért adatok túlzó detektálási hatásfokot feltételeznek a környezetileg releváns alakú és méretű mikroműanyagokra nézve.

V. tézis

Kutatásom során új mintaelőkészítési eszközt és módszert dolgoztam ki, amely kis vegyszerigényű (500 cm^3 recikálható ZnCl_2 /minta), gyors és hatékony mintaelőkészítést tesz lehetővé, miközben csökkenti a mintaelőkészítés során esetlegesen jelentkező háttérszennyezést és a mintában lévő részecskék számában mutatkozó veszteségeket a minimalizált transzferlépések révén. Fluoreszcens mikrogyöngyök használata során a fejlesztett eszköz a szakirodalomban széles körben használt mintaelőkészítési módszer visszanyerési eredményeinél (átlagosan 60,3%) jelentősen nagyobb visszanyerési értékeket (átlagosan 84,9%) mutatott a nagyobb sűrűségű részecskékre is. A saját fejlesztésű módszer $1,2 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű mikrogyöngyök átlagosan 94,5%-os visszanyerését mutatta, míg az irodalomban széles körben alkalmazott metódus átlagosan mindössze 14%-os visszanyerést eredményezett. A mintaelőkészítési rendszerbe foglalt eszköz és módszer környezeti mintákra vonatkoztatható hatásfok jellemzőit különböző alakú (fragmentek, szálak) és anyagú (PE, PP, PET, PVC, PA), környezetileg releváns méretű ($100\text{-}300 \text{ }\mu\text{m}$ fragment és $1000\text{-}1500 \text{ }\mu\text{m}$ szál) mikroműanyagok visszanyerésének vonatkozásában OECD szabvány alapján készült modell vizekkel minősítettem.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- BANNICK, C. G., SZEWZYK, R., RICKING, M., SCHNIEGLER, S., BARTHEL, A. K., ALTMANN, K., EISENTRAUT, P., BRAUN, U. (2018). Development and testing of a fractionated filtration for sampling of microplastics in water. *Water Research*, 149, 650-658. p. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.045>
- FAURE, F., DEMARS, C., WIESER, O., KUNZ, M., FELIPPE DE ALENCASTRO, L. (2015): Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environmental Chemistry*, 12 (5), 527-538. p. <https://doi.org/10.1071/EN14218>
- FISCHER, E. K., PAGLIALONGA, L., CZECH, E., TAMMINGA, M. (2016): Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments: A case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (central Italy). *Environmental Pollution*, 213 648-657. p. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.012>
- FUNCK, M., YILDIRIM, A., NICKEL, C., SCHRAM, J., SCHMIDT, T. C., TUERK, J. (2020): Identification of microplastics in wastewater after cascade filtration using Pyrolysis-GC-MS. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100778>
- HENGSTMANN, E., TAMMINGA, M., VOM BRUCH, C., FISCHER, E. K. (2018). Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea) - Implementing a novel glass elutriation column. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 263–274. p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.010>
- HILDEBRANDT, L., VOIGT, N., ZIMMERMANN, T., REESE, A., PROEFROCK, D. (2019): Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies. *Marine Environmental Research*, 151 (June), 104768. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104768>
- HURLEY, R.R., LUSHER, A.L., OLSEN, M., NIZZETTO, L. (2018): Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. *Environmental Science & Technology*, 52, 7409–7417. p. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01517>
- JIANG, C., YIN, L., LI, Z., WEN, X., LUO, X., HU, S., YANG, H., LONG, Y., DENG, B., HUANG, L., LIU, Y. (2019): Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau. *Environmental Pollution*. 91–98. p. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.022>
- KIRSTEIN, I. V., HENSEL, F., GOMIERO, A., IORDACHESCU, L., VIANELLO, A., WITTEGREN, H. B., VOLLERTSEN, J. (2020): Drinking plastics? – Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. *Water Research*, 188, 116519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116519>
- KLEIN, S., WORCH, E., KNEPPER, T. P. (2015): Occurrence and Spatial Distribution of Microplastics in River Shore Sediments of the Rhine-Main Area in Germany. *Environmental Science & Technology*, 49 (10) 6070-6076. p. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00492>
- LESLIE, H. A., BRANDSMA, S. H., VELZEN, M. J. M. VAN, VETHAAK, A. D. (2017): Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota. *Environment International*, 101, 133-14. p. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.018>
- LUSHER, A. L., BURKE, A., O'CONNOR, I., OFFICER, R. (2014). Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling. *Marine Pollution Bulletin*, 88 (1–2), 325–333. p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.08.023>
- MANI, T., HAUKE, A., WALTER, U., BURKHARDT-HOLM, P. (2015): Microplastics profile along the Rhine River. *Scientific Reports* 5. Article number: 17988. 7 p. <https://doi.org/10.1038/srep17988>
- MASURA, J., BAKER, J., FOSTRE, G., ARTHUR, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. <https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications->

- files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: microplastic, analysis. Lekérdezés időpontja: 2021.02.06.
- MINTENIG, S., LÖDER, M., GERDTS, G. (2014): Mikroplastik in Trinkwasser. Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Biologische Anstalt Helgoland, 18. p. https://schlicktown.stadt-media.de/wp-content/uploads/AWI_Abschlussbericht_Mikroplastik_in_Trinkwasser.pdf Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: mikroplastik, trinkwasser. Lekérdezés időpontja: 2021.01.31.
- MINTENIG, S. M., PRIMPKE, S., GERDTS, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365–372. p. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- MINTENIG, S. M., LÖDER, M. G. J., PRIMPKE, S., GERDTS, G. (2019): Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment*, 648, 631–635. p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>
- QUINN, B., MURPHY, F., EWINS, C. (2017): Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment. *Analytical Methods*, 9 (9), 1491–1498. p. <https://doi.org/10.1039/c6ay02542k>
- SCHERER, C., WEBER, A., STOCK, F., VURUSIC, S., EGRCI, H., KOCHLEUS, C., ARENDT, N., FOELDI, C., DIERKES, G., WAGNER, M., BRENNHOLT, N., REIFFERSCHIED, G. (2020): Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river. *Science of the Total Environment*, 738, 139866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139866>
- SETÄLÄ, O., MAGNUSSON, K., LEHTINIEMI, M., NOREN, F. (2016): Distribution and abundance of surface water microlitter in the Baltic Sea: A comparison of two sampling methods. *Marine Pollution Bulletin*, 110, 177–183. p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.065>
- SILVA, A. B., BASTOS, A. S., JUSTINO, C. I. L., DA COSTA, J. P., DUARTE, A. C., ROCHA-SANTOS, T. A. P. (2018): Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review. *Analytica Chimica Acta*, 1017, 1–19. p. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.043>
- SU, L., XUE, Y., LI, L., YANG, D., KOLANDHASAMY, P., LI, D., SHI, H. (2016): Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 216, 711–719. p. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.036>
- VIANELLO, A., BOLDRIN, A., GUERRIERO, P., MOSCHINO, V., RELLA, R., STURARO, A., DA ROSB, L. (2013): Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 54–61. p. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>
- WANG, W., NDUNGU, A. W., LI, Z., WANG, J. (2017): Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 575, 1369–1374. pp. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.213>
- WIGGIN, K.J., HOLLAND, E.B. (2019): Validation and application of cost and time effective methods for the detection of 3–500 µm sized microplastics in the urban marine and estuarine environments surrounding Long Beach, California. *Marine Pollution Bulletin*, 143, 152–162. p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.060>
- ZHAO, S., ZHU, L., WANG, T., LI, D. (2014): Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 86, 562–568. pp. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.032>
- ZIAJAHROMI, S., NEALE, P. A., RINTOUL, L., LEUSCH, F. D. L. (2017): Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research*, 112, 93–99. p. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>

Internetes hivatkozás

HTTP 1 – <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Folyóiratcikk

- MÁRI, Á., BORDÓS, G*, GERGELY, SZ., BÜKI, M., HÁHN, J., PALOTAI, Z., BESENYŐ, G., SALGÓ, A., KRISZT, B., SZOBOSZLAY, S. (2021): Validation of microplastic sample preparation method for freshwater samples. *Water Research*, közlésre elfogadva, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117409> **IF:9,13; D1, Q1**
*levezető szerző
- BORDÓS, G., GERGELY, S., HÁHN, J., PALOTAI, Z., SZABÓ, É., BESENYŐ, G., SALGÓ, A., HARKAI, P., KRISZT, B., SZOBOSZLAY, S. (2021): Validation of pressurized fractionated filtration microplastic sampling in controlled test environment. *Water Research*. 189. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116572> **IF:9,13; D1, Q1**
- BORDÓS, G., URBÁNYI, B., MICSINAI, A., KRISZT, B., PALOTAI, Z., SZABÓ, I., HANTOSI, ZS., SZOBOSZLAY, S. (2019): Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe. *Chemosphere* 216 pp. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.110>, **IF:5,778; D1, Q1**
- BORDÓS, G., URBÁNYI, B., PALOTAI, Z., KRISZT, B., MICSINAI, A., SZABÓ, I., NAGY, D., SZOBOSZLAY, S. (2018): Mikroműanyagok a Duna és a Tisza vízgyűjtőjén – Első hazai eredmények. *MaSzeSz Hírcsatorna*, 2018 (6) pp. 24-31.
- BORDÓS G., PALOTAI Z., HÁHN J, SZOBOSZLAY S., KRISZT B. (2020): Mikroműanyag utazó növényvédő szerek. *In Green Magazin*, 2020 tavasz, p. 60-61.

Konferencia részvétel

- BORDÓS, G., GERGELY, S., HÁHN, J., PALOTAI, Z., SZABÓ, É., BESENYŐ, G., SALGÓ, A., HARKAI, P., KRISZT, B., SZOBOSZLAY, S. (2021): The road to microplastic sampling validation. SETAC Europe 2021. 52. p.
- BORDÓS G., PALOTAI Z, KRISZT B., SZOBOSZLAY S. (2021): Mikroműanyag kutatások Magyarországon. XIV. Szent-Györgyi Albert konferencia. Budapest. p. 21. ISBN: 978-963-421-849-4
- BORDÓS, G., NAGY, D., PALOTAI, Z., KRISZT, B., SZOBOSZLAY, S. (2019): Development of a standard addition method for the preparation of water samples for microplastic analysis. SETAC Europe 29th Annual Meeting. Helsinki. p. 44.
- BORDÓS, G., NAGY, D., PALOTAI, Z., KRISZT, B., SZABÓ, I., SZOBOSZLAY, S. (2019): Microplastics in Hungarian freshwaters: development of a standard addition sample preparation method. International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea. Capri. p. 53.
- BORDÓS, G., PALOTAI, Z., KRISZT, B., SZOBOSZLAY, S. (2019): Mikroműanyagok felszíni vizekben. XIV: Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia. Balatonszárszó. 2019. pp. 78. ISBN 978-615-6018-02-1
- BORDÓS, G., URBÁNYI, B., MICSINAI, A., KRISZT, B., PALOTAI, Z., SZABÓ, I., HANTOSI, Zs., SZOBOSZLAY, S. (2018): Microplastics in riverine systems of Hungary. *Microplastics2018*. Ascona. pp. 28.
- BORDÓS, G., KRISZT, B., PALOTAI, Z., SZOBOSZLAY, S. (2018): Development of a jet pump based sampling system for freshwaters. pp. 33-34. in BAZTAN J., BERGMANN M., CARRASCO A., FOSSI C., JORGENSEN B., MIGUELEZ A., PAHL S., THOMPSON R.C., VANDERLINDEN J-P. (Eds.) 2018, MICRO 2018. Fate and Impact of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions. 414 pp. MSFS-RBLZ. ISBN 978-84-09-06477-9. CC-BY-NC-SA.
- BORDÓS, G., PALOTAI, Z., MICSINAI, A., KRISZT, B., SZABÓ, I., SZOBOSZLAY, S. (2018): Mikroműanyagok édesvízi ökoszisztémákban. TOX'18 Tudományos Konferencia, Lillafüred p. 68.
- BORDÓS, G., PALOTAI, Z., MICSINAI, A., KRISZT, B., SZABÓ, I., SZOBOSZLAY, S. (2017): Mikroműanyagok édesvízi ökoszisztémákban. VII. Ökotoxikológiai Konferencia p. 9. Magyar Ökotoxikológiai Társaság. Budapest ISBN 978-963-89452-8-0