



**MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM
SZENT ISTVÁN CAMPUS, GÖDÖLLŐ
TERMÉSZETVÉDELMI MÉRNÖK BSc**

MIKROMŰANYAGOK KÖRNYEZETI HATÁSAI

Belső konzulens: Dr. Szoboszlay Sándor
egyetemi docens

Külső konzulens: Prikler Bence
laboratóriumi mérnök
Wessling Hungary (Eurofins) Kft
doktorandusz

Készítette: Banga Tomás
G39P7T
Természetvédelmi mérnök BSc, levelező

Akvakultúra és Környezetbiztonsági Intézet
Környezetbiztonsági Tanszék

Gödöllő
2022

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés és célkitűzés.....	3
2	Szakirodalmi áttekintés	5
2.1	<i>Mikroműanyagok környezeti előfordulása</i>	5
2.2	<i>Mikroműanyagok a szárazföldi ökoszisztémában és a táplálékláncban.....</i>	9
2.2.1	Mikroműanyagok a talaj-növény kapcsolati rendszerekben.....	9
2.2.2	Mikroműanyagok az állati szervezetekben.....	11
2.2.3	Mikroműanyagok a növényi, állati termékekben és az élelmiszerekben.....	14
2.2.4	Mikroműanyagok az emberi szervezetben.....	14
2.2.5	Mikroműanyagok előfordulása természetvédelmi és emberek által nehezen megközelíthető területeken	15
2.3	<i>Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) áttekintő bemutatása.....</i>	16
2.3.1	Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer kiépítése	16
2.3.2	Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer működése.....	19
2.3.3	Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer és a természetvédelem	21
3	A vizsgálatok módszerei.....	24
3.1	<i>A mintavételek időpontjai és helyszínei.....</i>	24
3.2	<i>A mintavételi helyszínek bemutatása</i>	24
3.3	<i>A mikroműanyagok számának meghatározási lépései, módszerei</i>	26
3.3.1	Mintavétel felszíni vizekből.....	26
3.3.2	Mintaelőkészítés	27
3.3.3	Mikroműanyagok mennyiségi és minőségi meghatározása.....	28
3.3.4	Minőségbiztosítás a laboratóriumi mintafeldolgozás során.....	28
4	Eredmények és értékelésük	30
4.1	<i>A Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító felett vett vízminta eredményei (mintajel: ZEG-F)...</i>	30
4.2	<i>A zalaegerszegi szennyvíztisztító tisztított szennyvízből vett vízminta eredményei (mintajel ZEG-EL) 30</i>	
4.3	<i>A Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító alatt vett vízminta eredményei (mintajel: ZEG-A) ...</i>	31
4.4	<i>Zala folyó, Zalaapáti közúti híd mellől vett vízminta eredményei (mintajel: z15)</i>	32
4.5	<i>A Kiskomáromi-csatornából (Zalacomár) vett vízminta eredményei (mintajel: kiko)</i>	32
4.6	<i>Zala folyó (KBVR I. és II. ütem között), Balatonhídvég közúti híd mellett vett vízminta eredményei (mintajel: z11).....</i>	33
4.7	<i>A Zala-Somogyi határokról (Zalacomár) vett vízminta eredményei (mintajel: Zsha).....</i>	33
4.8	<i>A Marótvölgyi-csatornából (Vörs) vett vízminta eredményei (mintajel: Mvcs)</i>	34
4.9	<i>Az Egyesített-övcatornából (Keszthely) vett vízminta eredményei (mintajel: eo20).....</i>	34
4.10	<i>A Zala folyón (Fenekpuszta), a KBVR II. ütem zárószilip és a Balaton között vett vízminta eredményei (mintajel: z27).....</i>	35
5	Következtetések és javaslatok	39
6	Összefoglalás	42
7	Köszönetnyilvánítás.....	43
8	Irodalomjegyzék	44

1 Bevezetés és célkitűzés

Számos társadalmi hasznuk miatt a műanyagok fontos szerepet töltenek be az emberi társadalomban. A műanyagok gyártása olcsónak és gyorsnak tekinthető, melynek végeredménye egy erős, ellenálló és könnyű anyag. Ennek következményeként az 1950-es évek óta a globális műanyaggyártás folyamatos és gyorsuló léptekben növekszik (Hermabessiere et al. 2017).

Európában az elmúlt tíz évben átlagosan évi 60 millió tonna műanyagot gyártottak, melynek 39,5%-a csomagolóanyagként hasznosul. Az EU tagállamaiban a csomagolóipar 24 millió hulladékot generál évente. A termelési és a hulladékkezelési adatok közötti rés bizonyítja, hogy tekintélyes mennyiségű csomagolási műanyag hulladék kerül ki a környezetbe, amelyek feltételezhetően a mikroműanyagok elsődleges forrásai. A széles körben előforduló műanyag típusok, magas fokú ellenállóságuknak köszönhetően hosszú távon perzisztensek a környezetben, ezáltal nagy mennyiségben halmozódnak fel mind szárazföldi, mind a tengeri ökoszisztémákban. A „mikroműanyag” szókapcsolat elsősorban az elaprózódott műanyagok méretére utal. Az általánosan elterjedt terminológia alapján a környezetben előforduló öt milliméternél kisebb műanyagdarabokat nevezik mikroműanyagoknak. Eredetük alapján léteznek elsődleges és másodlagos mikroműanyagok. Az elsődleges mikroműanyagok az ipari termelésből származó, kis méretű és egy meghatározott alakra gyártott, formázott termékek. Ezek az anyagok általában más műanyag termékek előállításának kiindulópontjai, illetve a fogyasztói termékekben koptató hatású anyagként funkcionálnak. A másodlagos mikroműanyagok a környezetbe kerülő hulladékból jönnek létre (Bordós & Reiber 2016).

Jelen dolgozatomban a mikroműanyagok környezetre gyakorolt hatásait szeretném összefoglalóan bemutatni. A szakirodalmi áttekintésben továbbá szó lesz a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) működéséről és szerepéről. 2022 nyarán konzulensem, Dr. Szoboszlai Sándor irányításával és a Wessling Hungary (Eurofins) Kft. segítségével személyesen tudtam a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer területén mikroműanyag mintavételezéseket végezni. A három nap során lehetőségem volt részletesen megismerni a mintavételi folyamatokat, aminek köszönhetően dolgozatomban számszerű adatokon keresztül tudom szemléltetni a mikroműanyagok jelenlétét a Zala folyó és a KBVR vizsgált helyszínein. A szakdolgozatom készítésének céljai a következők voltak:

1. A mikroműanyagok környezeti előfordulásának és hatásaik összefoglaló szakirodalmi áttekintése.
2. A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer működésének és természetvédelmi jelentőségének a bemutatása.
3. A Wessling Hungary Kft. által kidolgozott és alkalmazott mikroműanyag mintavételi és mérési módszertan megismerése.
4. A zalaegerszegi kommunális szennyvíztisztító tisztított szennyvízének és a Zala folyón lévő befogadási pontjának felvízi és alvízi területén vett vízminták mikroműanyag koncentrációjának a vizsgálata.
5. A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer területén és a környezetében vett mikroműanyag minták analitikai eredményeinek áttekintése és elemzése.

2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 Mikroműanyagok környezeti előfordulása

Műanyagoknak nevezzük azokat a makromolekuláris anyagokat, amelyeket mesterségesen állítottak elő, vagy valamilyen természetes eredetű makromolekula jelentős átalakításával jöttek létre. A műanyagok másik sajátossága, hogy az alappolimeren kívül mindig tartalmaznak valamilyen adalékanyagot, melyekkel a műanyagtól megkívánt tulajdonságot tudják biztosítani, ilyenek lehetnek pl. a színezékek, lágyítószerke, stabilizátorok, töltőanyagok, erősítők. Ezek az adalékok befolyásolják az előállítás költségeit a műanyag kémiai összetételét, mechanikai tulajdonságait, biológiai aktivitását (Miskolczi 2012). 2020-ban a világ műanyag termelése 367 millió tonna volt, amelyből az EU részesedése 65,2 millió tonnát tett ki, ez utóbbi megoszlása: 55 millió tonna újonnan előállított és 10,2 millió tonna újra hasznosított. Az EU-ban a műanyagipar a nyolcadik legfontosabb iparágnak számít, az ide tartozó 52.000 cégben 1,5 millióan dolgoznak, évi 330 milliárd EUR forgalmat produkálva ([http1](#)).

Az EU-ban, 2020-ban a legnagyobb mennyiségben felhasznált műanyagok a polietilén (PE), a polipropilén (PP), a polivinil-klorid (PVC), a poliuretán (PUR) a polietilén-tereftalát (PET) és a polisztirol (PS) voltak. A kimutatások szerint a műanyagok 40,5%-át a csomagolóipar, 20,4%-át az építőipar, 8,8%-át az autóipar, 6,2 %-át a villamos- és elektronika eszközök gyártása, 4,3%-át a háztartások, 3,2%-át pedig a mezőgazdaság használták fel, illetve 16,6%-uk egyéb célokat szolgált. Sajnos a csomagolóanyagok jelentős része a gyártásukat/felhasználásukat követő rövid időn belül hulladékká válik ([http2](#)).

A mikroműanyagok jellemzően a műanyagok aprózódásával képződnek. A mikroműanyag terhelés jeleit a Föld összes ökoszisztémájában felfedezhetjük, de az általuk okozott környezeti problémáknak csak a töredéke vált eddig ismertté (Piehl et al. 2018).

A műanyagok felfedezése és nagyüzemi gyártása a XX. század elejére tehető, míg a mikroműanyagok kutatása viszont csak az 1970-es években kezdődött (Bordós & Reiber 2016). Az első vizsgálatok a tengeri, illetve óceáni környezetben zajlottak, amelyek elsősorban a mikroműanyagok forrásaira keresték választ. A terhelés legfőbb eredetének a tengerekbe, óceánokba ömlő folyókat találták, illetve azokat a szennyvíztisztítókat, amelyek a felszíni vízfolyásokba vezetik a tisztított szennyvizet. A műanyagok kémiai, fizikokémiai és biológiai átalakulások révén - műanyag törmeléket alkotva - kisebb részecskékre aprózódnak a környezetben. Amikor méretük eléri az öt millimétert mikroműanyagoknak (MP: microplastic)

nevezik őket. Keletkezésükben nagyon jelentős tényező a fotodegradáció: az ultraibolya sugárzás, az UV-B (~295-315 nm) és az UV-A (~315-400 nm) tartományban, amely az oxigénatomoknak a polimerláncba való beépüléséhez szükséges aktiválási energiát biztosítja. Ez a folyamat lánchasadást eredményez, így egyre apróbb műanyag fragmentumok keletkeznek. A hagyományos, kőolaj alapú műanyagok esetében a polimerláncok szétesése végbemegy ugyan, de ezt nem követi azonos ütemben a biológiai lebomlás, mert a keletkező fragmentumok molekulatömege még mindig a mikrobiológiai hozzáférhetőség feletti érték lehet. Ez a tényező valószínűleg az egyik fő oka a mikroműanyagok környezetben való megjelenésének, felhalmozódásának (Bordós 2021). Az aprózódással képződött részecskéket másodlagos mikroműanyagoknak hívják, megkülönböztetve azoktól az elsődleges mikroműanyagoktól, amelyeket eleve kis méretűre gyártanak (10-500 mikrométer), például kozmetikai termékekhez, illetve háztartási tisztítószerkehez (http3).

Jelenleg nincs olyan nemzetközi, illetve hazai szabályozás, amely a környezetbe kerülő műanyagok méret szerinti megnevezését egyértelműen meghatározná, példaként az 1. táblázatban két, máig közkeletű osztályozást mutatok be (TetraTech 2021).

1. táblázat. Példák a környezetterhelő műanyagok méret szerinti osztályozására

Megnevezés	GESAMP (2019)	Hartman et al. (2019)
	Méret	
Megaplasztik	> 1 m	nincs adat
Makroplasztik	25 - 1000 mm	> 1 cm
Mezoplasztik	5 - 25 mm	1 - 10 mm
Mikropasztik	< 5 mm	1 µm - 1 mm
Nanoplasztik	< 1 µm	1 nm - 1 µm

GESAMP: Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)

Számos élőlényről ismert, hogy lenyeli és/vagy belélegzi a mikroműanyag részecskéket, aminek a molekuláris szinttől a viselkedési szintig terjedő káros hatásai többnyire még felderítetlen következményekkel járnak (Galloway et al. 2017, Albert et al. 2017, Dissanayeke, 2022).

A mindennapokban a mikroműanyag szennyeződések a vízi ökoszisztémákban kiemelt jelentőségű témának számítanak, kimutatták őket pl. halakból, kagylókból, osztrigákból (Osorio et al. 2021). Az előbbi szerzők mérési adatai szerint pl. a Fülöp-szigeteki kb. 220 km

hosszúságú, kb. 17.000 km² vízgyűjtő területű Manila-öbölben a tengervízben köbméterenként 1.580-57.665 darab mikroműanyag részecskét lehetett kimutatni a 75 µm - 2,36 mm mérettartományban.

Kína a világ legnagyobb műanyagtermelő országa, 2018-ban 108 millió tonna műanyagot gyártottak, ami a globális műanyagtermelés 30%-át tette ki (Jianxin et al. 2022).

Több kutató is felvetette, hogy a mikroműanyagok lokális előfordulása összefügg a népsűrűséggel (Eriksen et al. 2013), például a Gyöngy-folyó (Pearl River) városi szakaszán átlagosan 19.860 részecske/m³ mikroműanyag mennyiséget mutattak ki (Di & Wang 2018).

Kínában a felszíni vizekben mért legnagyobb mennyiségű mikroműanyagot a Sárga-folyóban találták 380.000 - 582.000 részecske/m³ tartományban, 497.000 db/m³ átlagos értékkel (Han et al. 2020). Magas szintű mikroműanyag terhelést mértek a Manas-folyóban, 49.000 részecske/m³ és a Poyang-tóban, 34.000 részecske/m³ mennyiségben. Alacsony szintű volt a mikroműanyag jelenlét az északkeleti régióban, a Csinghaj-Tibet fennsíkon 483-967 közötti részecske/m³ mennyiséggel és a Jangce-folyó torkolatánál. A legalacsonyabb értékeket Hong Kong környékén a Gyöngy-folyó torkolatánál mérték 0,017 részecske/m³ mennyiségben. A folyók torkolatainál minden esetben csökkent a mikroműanyagok koncentrációja, melyet a tengervízzel való felhígulásuk okozhat. A mintákban talált mikroműanyagok domináns része fragmentumok és szálak formájában voltak jelen, melyek többnyire átlátszóak és színesek voltak (Jianxin et al. 2022).

Az európai mérési eredmények ennél nagyságrendekkel alacsonyabbak, pl. a Rajnában 1-22, az Elbán átlagosan 5,6, svájci folyókban 0,1-64 részecskét mutattak ki köbméterenként, leggyakrabban a PE, PP és PS fordult elő a mintákban. Olaszországi tavakban 0,2-4,1 részecske/m³ koncentrációkat regisztráltak, míg 6 svájci tóban átlagosan 91.000 részecskét találtak egy négyzetkilométeres vízfelületen, ami átszámítva 1,2 részecske/m³ mikroműanyag jelenlétnek felelhet meg.

Magyarországon először mikroműanyag mintavételezést és kimutatást felszíni vizekből – köztük a világon elsőként halastavakból – a Wessling Hungary Kft munkatársa, Bordós Gábor végzett. Ezek a vizsgálatok kaszkád rendszerű, sorba kapcsolt, különböző pórus átmérőjű szűrők felhasználásán alapultak, és 3,52-32,05 db/m³ mikroműanyagot mutattak ki a 0,1-2 mm-es mérettartományban, FT-IR mikroszkóp alatti azonosítással. Köztük a PE és a PP fordult elő leggyakrabban (Bordós 2019, Bordós 2021).

Az EU Duna Régió Stratégia (EUSDR) nemzeti koordinációját végző Külgazdasági és Külügyminisztérium megbízásából 2021-2022 folyamán hiánypótló tanulmány készült a „Mikroműanyagok a szennyvizekben – Szennyvízanalitika a magyarországi

szennyvíztisztítókból a Duna mentén” címmel. A Wessling Hungary Kft által végzett vizsgálatok szerint a szennyvíztisztítók a befolyó szennyvíz mikroműanyag-tartalmát csökkentik, de az elfolyó tisztított szennyvízben kimutatható koncentráció még mindig nagyobb, mint a befogadó felszíni vizekben mért értékek. A nyers szennyvizekben 800-4400 részecske/m³, a tisztított szennyvíz mintákban 12-85 részecske/m³, míg a felszíni víz mintákban 9-28 részecske/m³ értékben jelentek meg a mikroműanyagok. Ezek a hazai eredmények is arra utalnak, hogy a szennyvíz a felszíni vizekben lévő mikroműanyagok egyik forrása lehet. A szennyvíziszap-minták, mint potenciális felhalmozódási helyek vizsgálata is megtörtént. Itt 3-94 részecske/kg koncentráció mutatkozott. A mintákban leggyakrabban polietilén, polipropilén és polisztirol anyagú részecskék megjelenése volt detektálható (http4).

A Wessling Hungary Kft eredményei szerint a Tiszában köbméterenként 4,9 db 300 mikrométernél nagyobb, de 2 mm-nél kisebb, míg 62,5 db 15 és 300 mikron közé eső részecske található. Ezek az adatok a nemzetközi eredmények tükrében is jelentősek, hiszen a 300 mikrométernél nagyobb tartományban a Duna ausztriai szakaszán 0,3 részecskét, olaszországi tavakban 1-4 részecskét, míg a Rajna iparosodott szakaszán 15-20 részecskét mutattak ki köbméterenként (http5).

Sajnos a nemzetközi szakirodalomban az eredmények változatos mérettartományban és különböző mértékegységben kerülnek megadásra, így azok összehasonlítása sok esetben nem lehetséges. Az eltérő dimenziók oka a mintavételi és vizsgálati technikák sokfélesége. **Jelenleg a mikroműanyag mintavételek módjára, a mintaelőkészítésre és a részecskék számolására nincs nemzetközileg elfogadott, szabványosított eljárásrend.**

A mikroműanyagok jelenlétét a különböző mintákból való begyűjtés (pl. mantaháló, szivattyúzás) után a szerves anyagok eltávolítása (pl. oxidáció és/vagy savas, lúgos, enzimátikus kezelés), a részecskék sűrűség szerinti szétválasztása (pl. szűrés, flotáció, szedimentáció), majd FT-IR (Fourier transzformációs infravörös) spektroszkópia, (mikro)Raman-spektroszkópia, pirolízis gázkromatográfia-tömegspektrometria (Py-GC-MS) és termikus deszorpció gázkromatográfia-tömegspektrometria (TD-GC-MS), illetve elektronmikroszkóp,) alkalmazási módszerek valamelyikével lehet meggyőzően igazolni (http6).

2.2 Mikroműanyagok a szárazföldi ökoszisztémában és a táplálékláncban

A mikroműanyagok jelenléte mára már a szárazföldi ökoszisztémákat, illetve az élelmiszerláncot is érinti. A következő alfejezetekben ebben a témakörben gyűjtöttem információkat, adatokat.

2.2.1 Mikroműanyagok a talaj-növény kapcsolati rendszerekben

A mikroműanyagokat mára már számos szárazföldi ökoszisztémában megtalálták, beleértve a mezőgazdasági területeket, városokat, az ipari területeket, valamint a meglehetősen távoli, emberek által gyéren lakott területeket is (Blasing és Amelung 2018).

A talajfelszínen lerakódó részecskéket számos bejutási útvonal - beleértve a biológiai aktivitást is - segíti a talajba való beépülésben. Bár a mikroműanyagok jelentős, potenciális szénforrást jelentenek a talajlakó mikrobiota számára, elenyésző bomlási/bontási sebességük, nagyfokú perzisztenciájuk miatt folyamatosan halmozódnak a talajokban (Rillig 2012, Rillig 2018, Rillig et al. 2017a).

A kutatások kimutatták, hogy a mikroműanyagok hátrányos hatással lehetnek a talaj élővilágára, például a földi gilisztákra (Huerta-Lwanga et al, 2017, Rillig et al. 2017b) megváltoztathatják a talaj biofizikai tulajdonságait, pl. a térfogatsűrűséget és vízmegtartó képességet (Machado et al. 2018; Wan et al. 2019).

Négy üvegházi és egy (kontroll) erdő területet vizsgálva megállapításra került, hogy a 0,05-10 mm-es mérettartományban 7.100-42.960 / kg talaj (átlagosan 18.760) mikroműanyag részecske volt ötven talajmintában, ezek 95%-a 0,05-1 mm-esnek bizonyult. A mikroműanyagok döntően szálak voltak, amelyek a minták 92%-át tették ki, a filmek és a törmelékek/fragmentek adták a maradék részt. Ugyanakkor a műanyag részecskék 72%-a talajaggregátumokhoz kapcsolódott, a műanyag szemcsék 28%-a pedig diszpergált állapotban volt jelen. Az aggregátumokhoz kapcsolódó műanyag szálak inkább a mikroaggregátumokban, voltak kimutathatóak, míg a műanyag filmek és fragmentek inkább a makroaggregátumokban (Zhang és Liu 2018).

Kína egyik legfontosabb üvegházi termelési körzetében lévő talajokban a 0,5 mm-nél kisebb mikroműanyag fragment és film részecskék (PP, PE és etilén-propilén kopolimer) szignifikánsan nagyobb számban fordultak elő a 10-25 cm-es mélységben, mint a 0-5 cm-es felszíni rétegben, amit az öntözés hatására létrejövő vándorlásnak/áthelyeződésnek tulajdonítottak (Yu et al, 2021).

A mikroműanyagok többféle módon is bekerülhetnek a talajba. Az egyik lehetőség a szennyvizek, szennyvíziszapok és szerves trágyák mezőgazdasági területekre való kijuttatása. Kimutatták, hogy a nyers szennyvízben lévő mikroműanyagok akár 90%-a is felhalmozódhat az iszapban, 1.500 és 56.400 részecske/kg tartományban. (Li et al. 2020, Mintenig et al. 2017). Egy tanulmányban a szerves trágyákban a mikroműanyagok jelenlétével kapcsolatosan 895 részecske/kg maximális értéket dokumentáltak (Weithmann et al. 2018).

A műanyagok mezőgazdasági célú felhasználása lehet a talajok mikroműanyag terhelésének a másik fontos forrása, ezen belül is a műanyag fólia sátrak és talajtakarók („mulcsok”). Ez utóbbiakat vékonyságuk miatt (0,01-0,3 mm) sokszor lehetetlen visszagyűjteni, így közvetlen forrásai lehetnek a talajok mikroműanyag terhelésének (Zhu et al.2019).

Jelentős lehet a mikroműanyagok kiülepedése a légkörből is, ennek pl. Párizsban 2-355 részecske/m² a napi becsült értéke (Dris et al. 2016). A légkörből való lerakódás fontosságát támasztja alá az a tény is, hogy pl. távoli, természetes állapotú, magas-hegyi területek talajában is kimutatták a mikroműanyagokat (Bläsing és Amelung 2018).

Egy felmérés szerint az USA-ban a csapadékkal több mint 1000 tonna mikroműanyag hullik évente 11 védett területre. Ez a tömeg 120 millió műanyag palacknyi mennyiségnek felel meg ([http7](http://7)).

A mikroműanyagokat a talaj fizikai szennyező anyagának tekintik. Az adatok arra utalnak, hogy a mikroszálak (microfiber) megváltoztathatják a talaj struktúráját, csökkenthetik a talaj térfogatsűrűségét, így megnöveli a talaj légáteresztő képességét, ami fokozott gyökérnövekedést eredményez, viszont a műanyagok kialakíthatnak kisebb csatornákat is, melyek megnövekedett vízpárolgáshoz, és ezáltal a talaj kiszáradásához vezethet, ami a növények teljesítményére potenciálisan negatív hatással lehet (Wan et al. 2019).

A mikroműanyagok szennyező anyagokat (pl. növényvédő szereket) adszorbálhatnak a felületükön, hidrofób felületeket képezhetnek a talajokban, „kitakarhatják” az agyagásványok kötőhelyeit, illetve kémiai összetevőikből különböző vegyületek kerülhetnek a pórustér vízébe, a talajoldatba. Ezek az adszorbeálódott, illetve kioldódott anyagok a talajba kerülésüket követően negatív hatással lehetnek a növények gyökereire vagy azok szimbionta mikrobiotájára és lelassíthatják a növények növekedését. Alternatív hatásként az is elképzelhető, hogy a mikroműanyagok meggátolják más szennyező anyagok felszívódását a talajba, megőrizve ezzel a talaj élővilágát. Ezt vízi környezetben már megfigyelték, de jelenleg még nagy a bizonytalanság, hogy a szennyező hatásokat fokozzák vagy csökkentik a mikroműanyagok (Kleinteich et al. 2018, Rehse et al. 2018).

A nanoműanyag részecskék létezését a talajban még sohasem bizonyították, mivel a jelenlegi mennyiség meghatározási módszerek nem képesek érzékelni, illetve nem adnak megfelelő méretinformációkat. Ugyanakkor, ha a mikroműanyag részecskék kisebb darabokra töredeznek valószínűsíthető, hogy a nanoműanyagok is jelen vannak a környezetünkben. Míg a mikroméretű részecskék várhatóan nem jutnak be a gyökérzetbe, a nanoméretűek (<100 nm) k esetében más a helyzet, bekerülhetnek a gyökerekbe, károsíthatják a sejtmembránt és a sejten belüli molekulákat. A nanorészecskék növényekbe való belépési mechanizmusairól keveset tudunk, de tény, hogy pl. nanoméretű fluoreszcens PS gyöngyökkel végzett kísérlet során már megállapítást nyert, hogy endocitózis révén a részecskék bejutottak dohány sejtekbe. Haszonnövények esetében pl. saláta, búza konfokális lézer pásztázó mikroszkóp (CLSM) segítségével kimutatták, hogy a nanoméretű műanyagok (PS) a növény olyan részeibe is migrálhatnak, amelyeket emberi vagy állati fogyasztás céljából termesztenek, ezáltal bekerülhetnek a táplálékláncba (Li et al. 2019, Li et al. 2020).

A növények teljesítménye nagymértékben függ a talajlakó élőlényektől, azok diverzitásától, valamint a növények gyökerein élő mikrobáktól. Mivel a talajba bekerült mikroműanyagok változásokat okoznak a talaj szerkezetében, ezen keresztül befolyásolhatják a talajban lévő mikrobiális közösséget, különösen a rizoszféra mikrobáit pl. a nitrogénkötőket, kórokozókat, illetve a mikorrhiza gombákat (Rillig et al. 2019). Számos tanulmány arról is beszámolt, hogy a mikroműanyagok jelenléte megváltoztatta a talaj mikrobiális enzimjeinek, például a dehidrogenáz, a leucin-aminopeptidáz, az alkalikus foszfatáz, a β -glükozidáz, a cellobiohidroláz és a fluoreszcein-diacetát-hidroláz aktivitását. Jelenleg nem ismerjük a mikro- és nanoműanyagok hatásait a talajban élő mikrobák közösségeire, következményei teljesen tisztázatlanok, azonban ennek kutatási prioritásnak kell lennie (Awet et al., 2018, de Souza Machado et al. 2019).

2.2.2 Mikroműanyagok az állati szervezetekben

A következő fejezetben a mikroműanyagok állati szervezetekbe való bekerüléséről szeretnék részletesebben foglalkozni. Egy kutatás szerint Európa mezőgazdasági területeinek mikroműanyag terhelése ugyan olyan nagyságrendű, mint a tengeri környezeté (Nizzetto et al. 2016).

Nanoműanyagok jelenlétét már a legkisebb organizmusokban, a tápláléklánc legalján elhelyezkedő élőlényekben, mint például a baktériumokban is kimutatták. Hasonló kutatások gombákra nézve egyelőre még nem ismertek, azonban algák esetében történtek bizonyos

vizsgálatok, melyekben megfigyelték, hogy az algákra tapadó nanaműanyagok átjuthatnak az édesvízi táplálékláncba (Chae et al. 2018).

Az ízeltlábúak (*Arthropoda*) törzsének, a rovarok (*Insecta*) osztályának és a hártyásszárnyúak (*Hymenoptera*) rendjébe tartozó méhek létszáma folyamatosan csökkenő tendenciát mutat szerte a világon. Egy kutatás a mikroműanyagok mézelő méhekre (*Apis mellifera*) és azok táplálék keresési viselkedésére gyakorolt hatásairól számol be. Ebben a kutatásban a méheket 24 és 48 órán keresztül olyan cukoroldattal táplálták, amely literenként 100 mg poliszter mikroműanyagot tartalmazott és bár a bélcsatornában kimutathatóak voltak a mikroműanyag szálak, de akut mérgezési tüneteket, viselkedési változásokat nem lehetett tapasztalni. A szerzők viszont hangsúlyozzák a hosszú távú hatásvizsgálatok szükségességét is (Buteler et al. 2022).

A fullánkosdarázs-alkatúak (*Apocrita*) alrendjébe tartozó rovarok, mint például a bányásméhek, a talajban található üregekben élnek, általában nem táplálkoznak föld alatt élő organizmusokkal, de mikroműanyagokat juttathatnak a talajba, ugyanis ismerünk olyan jelentéseket magányosan élő méhekről, amelyek a fészkeiket műanyagdarabokból építették fel. A hangyák családjából is ismerünk olyan talajban fészkelő hangyafajokat, mint például a pompás fémhangya, aki amellett, hogy kiválóan képes a talajt és az üledéket újrafeldolgozni, véletlenszerűen műanyag részecskéket is el a hangyafészkekben (Allasino et al. 2019).

A rovarok közül a bogarak (*Coleoptera*) rendje rendkívül változatos összetételű. A mikroműanyagok felvételéről szóló tanulmányok főként a trágyabogarak (*Scarabaeinae*) felnőtt egyedeire összpontosítottak. A latex mikrogyöngyökkel (microbeads) végzett átfogó kutatások kimutatták, hogy sok faj testmérettől függően csak a kisebb, körülbelül 10-83 mikrométer közötti részecskéket fogyasztanak el, melyek megmaradnak az emésztőrendszerükben. A nagyobb részecskék még a nyelést és emésztést megelőzően távoznak a szervezetükből (Holter & Scholtz, 2005).

Számos tanulmányban - melyekben a műanyagot a bogarak táplálék forrásaként használták - kimutatták, hogy az emésztőrendszerükben élő mikrobiota összetétele megváltozott. A lisztbogarak (amelyek lárvái feldolgozzák a PE, PP műanyagokat) szaporodásra, túlélésre és élettani funkciók károsodására gyakorolt szignifikáns, negatív hatásokat nem észleltek (Yang et al. 2021).

Az ízeltlábúak pókszabásúak (*Arachnida*) osztályába tartozó atkák közül ismerünk olyan talajlakó fajokat, melyek hulladékokkal táplálkoznak, kiváló bioindikátorok, érzékenyek a talaj fizikai és kémiai változásaira. Kutatások kimutatták, hogy az atkák passzív módon,

kutikuláikhoz kapcsolódva tolják és húzzák maguk előtt és mögött a mikroműanyagokat (Zhu et al. 2018).

A gerinctelenek között a leggyakrabban vizsgált élőlények a mikroműanyagok kutatások során a gyűrűsférgesek (*Annelida*). A gyűrűsférgesek a Föld legtöbb táján és ökoszisztémájában megtalálhatóak, fajgazdagok, sokfélék. A földigilisztákat gyakran használják a talajok állapotának monitorozására, mivel olyan különféle fizikai, biológiai és kémiai folyamatokban vesznek részt, melyek fontosak a talajok ökoszisztémájára nézve. A tanulmányok, kísérletek többsége - melyek a mikroműanyagok hatásait vizsgálják a földigilisztákra nézve polietilén használatával - többnyire a közönséges földigiliszta (*Lumbricus terrestris*) vagy a vörös trágyagiliszta (*Eisenia fetida*) fajok vonatkozásában történtek. A kísérletek túlnyomó része laboratóriumi körülmények között folytak, melyekben a mikroműanyagokat a talajba keverték vagy a talajfelszínen szórták szét. A részecske darabok átlagosan kevesebb mint 1 mm átmérőjűek és a kísérletek időtartama 14 és 60 nap között mozogott. Kimutatták, hogy a földigiliszták képesek a talaj mélyebb szintjeire eljuttatni a mikroműanyagokat, minél kisebb a részecskék mérete annál mélyebbre. A műanyagok szállítása aktív és passzív módon történik. A szállítás aktív módon úgy zajlik, hogy egy bizonyos ponton a földigiliszták szervezetébe bejutnak a műanyag részecskék, majd áthalad az emésztőrendszeren és egy másik ponton kiürül a szervezetükből. Passzív módon a földigiliszták testéhez tapadva szállítják maguk után a mikroműanyagokat (Chen et al. 2020). Azt is kimutatták, hogy a földigiliszták beleiben élő baktériumok képesek lebontani (tovább aprózni) a mikroműanyagokat, és feltételezhető, hogy ezek a mélyebb rétegekben kisebb részecskék formájában ürülnek a talajba (Huerta Lwanga et al. 2018)

Az emlősök között a mikroműanyag kutatások a rágcsálók tekintetében a laboratóriumi modell-állatnak számító egerekre összpontosulnak. Amikor laboratóriumi kísérletek során az egereket 4 héten keresztül táplálták 1-14 mikrométer nagyságú poliszitirén részecskékkel, mikroműanyagok által okozott káros hatást nem sikerült kimutatni (Stock et al., 2019). Ezzel szemben, amikor megnövelték a táplálási időt 6 hétre és csökkentették az adagolt részecskék koncentrációját a táplálékban észrevették, hogy az egerek anyagcseréje megváltozott és bélműködési zavarok jelei mutatkoztak szervezetükben (Jin et al., 2019).

A gazdasági állatok tekintetében sertések takarmányából elvégzett vizsgálatok alapján a napi PET bevitel értékét 0,8-7,79 µg/testtömeg kg⁻¹-ra becsülték és ugyanakkor a szerzők felhívták a figyelmet a fiatalok ezt meghaladó 2,4-70,3 µg/testtömeg kg⁻¹ napi beviteli dózisára (Xu et al. 2022). Birkák fekáliájában mintegy 1000 db/sz.a. kg, csirkékében 130 db/g mikroműanyag részecskét mutattak ki (Perez-Guevara et al. 2021).

2.2.3 Mikroműanyagok a növényi, állati termékekben és az élelmiszerekben

A mikroműanyagok a tápláléklánc legtöbb szakaszán megtalálhatóak, azonban az állati eredetű termékekben kimutatott mikroműanyagokról szóló kutatások hiányosak. Az élelmiszerek mikroműanyagokkal való szennyezettségéhez a csomagolásuk is hozzájárul. A műanyag csomagolás kisebb részecskékre töredezhetsz, ezáltal növelve az élelmiszerek szennyezettségét. Tej-és tejtermékeket vizsgálva nyers tehén tejben 80-96 db, feldolgozott tejek mintáiban 116-328 db, tejporkban pedig 420-968 db 4 mikrométernél nagyobb mikroműanyag részecskét találtak 100 ml térfogatban (http8).

47 féle méz vizsgálata során bennük kg-onként 10-336 db mikroműanyag szálat, illetve 2-82 db fragmentet találtak (Liebzeit & Liebzeit 2015).

Különböző oldható és folyékony élelmiszereket vizsgálva pl. almalében 21, a fehér borban 36, vörös borban 15, sörben 45teljes tejben 21, közepes zsír tartalmú tejben 15, sovány tejben 4, ecetben 15, napraforgó olajban 6, szódavízben 4, tonikban 2, mikroműanyag részecskét találtak literenként, illetve kg-onként cukorban 230, gyógyszertári minőségű sóban 4, háztartási sóban 40, Holt-tengeri sóban 225 mikroműanyag darabkát lehetett azonosítani (http6).

Egy vizsgálat során világszerte 14 ország (köztük Anglia, Franciaország, Németország, Írország, Olaszország, Szlovákia, Svájc) összesen 159 csapvíz mintáját elemezték. Ezek 81%-a tartalmazott mikroműanyagot, a részecskék 98,3%-a szál volt a 0,1-5 mm-es hossz-tartományban, koncentrációjuk 0-61 részecske/L volt, 5,45 db/L átlaggal (Kosuth et al. 2018). Két budapesti iskolában a vett csapvíz mintából - a Greenpeace megbízásából - a Wessling Hungary Kft végzett mikroműanyag vizsgálatot 2020-ban, 1500 liter vízben 7, illetve 10 részecskét tudtak azonosítani. A mintákban a polietilén, a polipropilén, a poliuretán, a polietilén-tereftalát és a polisztirol voltak jelen (http9).

2.2.4 Mikroműanyagok az emberi szervezetben

3600 feldolgozott minta alapján érdekes az a megállapítás miszerint az amerikaiak (USA) éves mikroműanyag fogyasztását 39.000 és 52.000 db közötti lenyelt részecskére becsülik. Ez a tartomány 74.000 és 121.00 közé nő, ha a belélegzett mennyiséget is figyelembe veszik. Ezen felül azok, akik csak palackozott vizet fogyasztanak további 90.000, akik pedig csak csapvizet isznak 4.000 részecske bevitelével számolhatnak (Kieran et al. 2019).

A mikroműanyagok egészséghatásának vizsgálatát nehezíti, hogy nem egységes, jól jellemezhető anyagokról van szó, hanem egy széles, heterogén anyagcsoportról. Tehát egy nem egyértelműen definiált anyagcsoport emberi egészségre gyakorolt hatását próbáljuk megítélni úgy, hogy a toxikológiai vizsgálatok száma kevés, nehezen összehasonlítható vagy extrapolálható. A mikroműanyagok káros hatásukat kifejthetik fizikai, kémiai és biológiai úton is. A különböző méretű és alakú részecskék közvetlenül, fizikailag is irritálhatják az emésztőrendszert, a légzőszerveket, így okozva gyulladást. A műanyag részecskékből vegyi anyagok is a szervezetbe kerülhetnek, kioldódhatnak belőlük monomerek (pl. akrilamid), illetve adalékanyagok (pl. biszfenol-A, kadmium), de nem csak a műanyagokba a gyártás során bejutó vegyületek jelenthetnek problémát. A felületükön megkötődhetnek káros anyagok (pl. poliklórozott-bifenilek, poliaromás szénhidrogének, peszticidek), amik végül leoldódhatnak, miután a szemcsék a szervezetbe, a tápcsatornába, tüdőbe kerülnek. Akár az egészségre veszélyt jelentő összetételben és számban a felületükön patogén mikroorganizmusok is megtapadhatnak, így közvetve hozzájárulhatnak megbetegedések kialakulásához is (Izsák&Vargha 2020).

2.2.5 Mikroműanyagok előfordulása természetvédelmi és emberek által nehezen megközelíthető területeken

Antropogén eredetű anyagok a környezetünkben mindenhol megtalálhatóak még a Föld legtávolabbi pontjain is. Például a Yellowstone Nemzeti Parkban található 341 km² vízfelületű Yellowstone Tó-ban és a tóban élő élőlények szervezetében is találtak mikroműanyagot. A víz felszíne volt a legszennyezettebb és a halminták 1/3-ának gyomrában találtak mikroműanyagokat. Mivel a Yellowstone Nemzeti Parkban évente 4 millió turista fordul meg, ezért nagy valószínűséggel a szennyezettség a turizmusnak tulajdonítható (Driscoll et al. 2021). Mongóliában a világ 19. legnagyobb tavát, a 2760 km² vízfelületű Hovsgol vizét tanulmányozva megállapították, hogy távoli elhelyezkedésének, védettségének és vízgyűjtőjének alacsony népsűrűsége ellenére magas volt a mikroműanyag szennyezettsége, átlagosan 20.264 részecske/km² (Free et al. 2014).

Dél-Amerikában, Argentína patagóniai régiójában kilenc tavat vizsgáltak és ezek mindegyikben találtak mikroműanyagokat, azonban az itt kimutatott átlagos $0,9 \pm 0,6$ részecske/ m³ világviszonylatban is alacsony koncentrációnak számít (Alfonso et al. 2020).

2.3 Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) áttekintő bemutatása

A szervezett természetvédelem kezdete a Kis-Balaton területén 1922-re tehető, amikortól a nemes kócsagok védelmére kócsagórt alkalmaztak. A Kis-Balaton 1951-óta természetvédelmi terület, 1997 óta a Balaton-felvidéki Nemzeti Park része. A Kis-Balaton, mint nagy kiterjedésű, összefüggő vizes élőhely, 1979 óta a – nemzetközi jelentőségű vizes területekről, mint a vízmadarak tartózkodási helyéről szóló – Ramsari egyezmény védelme alá tartozik. (http10).

2.3.1 Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer kiépítése

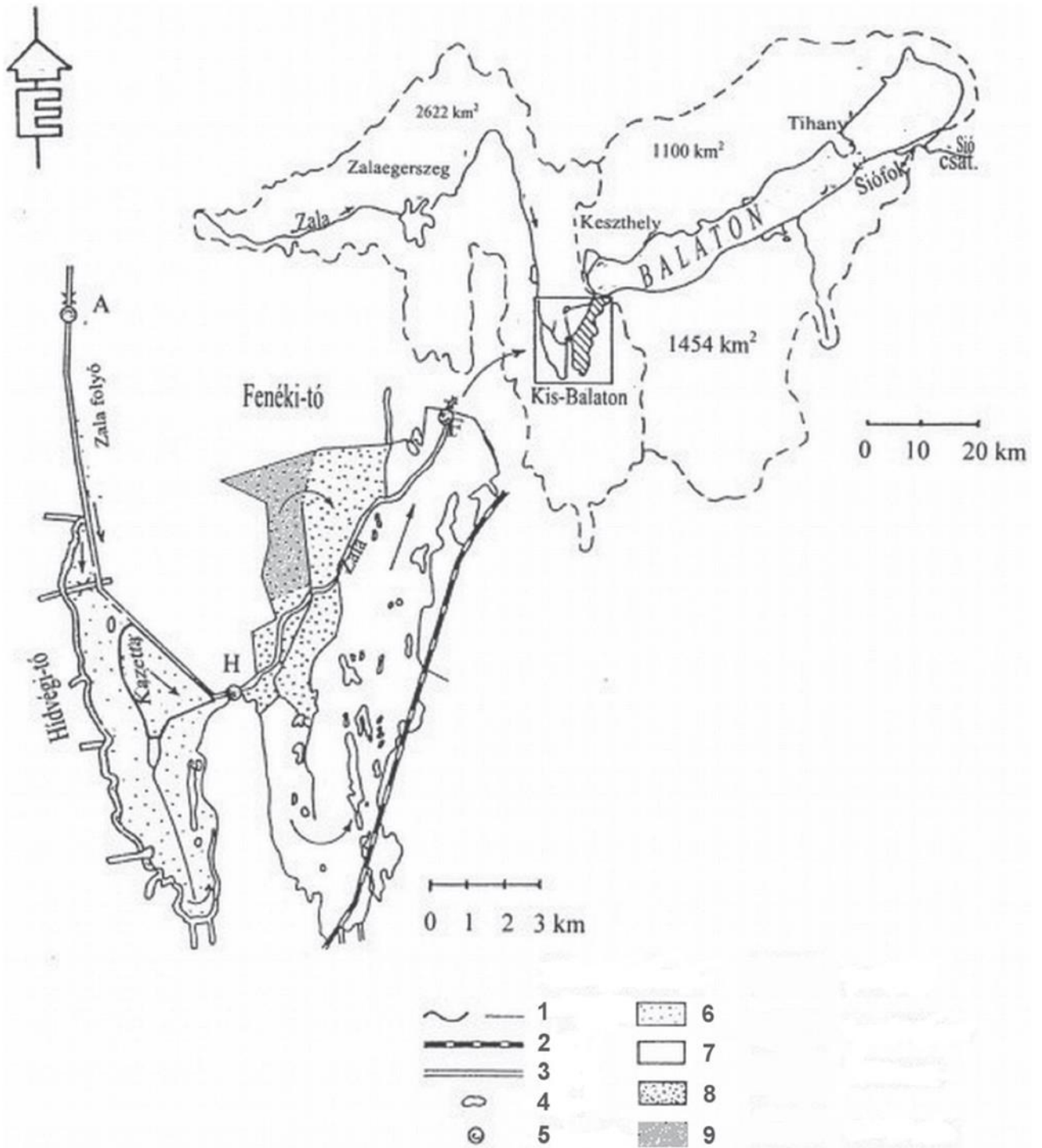
Egészen a XVIII. század végéig nem tettek különbséget a Kis-Balaton és a Balaton között, a Fenépuszta és Balatonhídvég közötti területet, voltaképpen a mai értelemben vett Kis-Balaton a Balaton egy részének tekintették. A Balaton szokványos vízmélysége és térfogata a XVIII. század végét követően a felére csökkent az 1863-ban kiépített Sió-zsilipnek és a Balaton déli partján futó vasútvonal miatt végzett szabályozási munkálatoknak köszönhetően. Ezen munkálatok eredményeként a Kis-Balaton magasabban fekvő területei szárazra kerültek, a terület csak az időnként előforduló árvizek során kapott vízborítást. Az 1920-as években a Zala folyó árvízvédelmi szabályozásai következtében kiépített töltéseknek köszönhetően gyakorlatilag a folyó árvizeit is kizárták a Kis-Balatonból. Ezek után csatornák rendszerét alakították ki annak érdekében, hogy megpróbálják csökkenteni a talajvízszintet, mindemellett szabályozzák azt, hogy a területen mezőgazdasági tevékenységeket lehessen folytatni. A munkálatok az 1960-as évekig tartottak, azonban nem voltak eredményteljesek. A szabályozási folyamatoknak köszönhetően a XX. század közepére a Kis-Balaton apránként elvesztette szűrő funkcióját, mely szerint kulcsfontosságú szerepe volt abban, hogy a Zala folyó, mielőtt a Balatonba ömlene a területre rakja hordalékát és szervesanyag tartalmát. Természetes tisztulás nélkül a Balaton vízminősége gyorsan és fokozatosan romlásnak indult, mivel a Zala már nem a Kis-Balaton mocsaras térségében, hanem a Keszthelyi-öbölben rakta le hordalékát, ami az öböl jellegzetes áramlási viszonyainak köszönhetően túlnyomórészt ott is maradt. Ez idő alatt a megnövekedett mezőgazdasági termelés miatt fokozódott a területen a biológiai, kémiai szennyezés és kibocsátás. Pár évtized múlva a beavatkozások mellékhatásai is megjelentek, eutrofizáció, halpusztulás és alga túlterhelés formájában (http10).

Az ökológiai katasztrófa elkerülésének, és a Balaton vízminőségének javítása érdekében, több más beavatkozás (pl. szennyvízelvezetés és tisztítás) mellett a vízügyi szakemberek kidolgoztak egy tervet a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) kiépítésére. Az alap gondolat az volt, hogy a hajdan öbölként, illetve mocsárként létezett terület ismételt elárasztásával kialakuló mocsaras-nádas terület a Zalán érkező hordalékot, tápanyagokat a Balaton előtt kiszűrje és feldolgozza. A Balaton tápanyagterhelésének 30-40%-át és vízutánpótlásának 45%-át a Zala folyó adja, körülbelül évi 300 t foszfort, 3000 t nitrogént és 30 000 t lebegőanyagot szállít a tóba, ami számottevő terhelést jelent. Ezt a többletterhelést kívánta megszüntetni a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (http11).

Az 1980-as években a tó vízminőségének javításáért elindult a Balaton Vízyűjtő Fejlesztési Program. A program megvalósításában több közigazgatási szervezet is szerepet kapott, mint például a minisztériumok a programalkotásban, az alapközművek megépítésében és a települések a helyi építési szabályozás megalkotásában. A program egyik kiemelkedő eleme a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer (KBVR) kiépítése volt. A rendszer működésének lényege: gátakkal, zsilipekkel a Zala vizének lelassítása, így adva időt a természeti folyamatoknak a szennyező-és tápanyagok feldolgozására. Leírva ez rendkívül egyszerű, ám valójában számos zsilipet, bukót, szivattyútelepet, monitoring állomást, kb. 150 km töltést kellett megépíteni, kell üzemeltetni a célt szolgáló „vízterelgetés” érdekében (http12).

A vízminőségvédelmi célból, két ütemben megépült KBVR jelentős természeti értékkel bír, de mesterségesen kialakított vízi környezetet hozott létre. A mesterséges létesítmény két részből áll: az I. ütem 1985-ben készült el, és a Hídvégi-tó nevet viseli, a II. ütem 2014-ben került átadásra, és a Fenéki-tó elnevezést kapta (ennek részét képezi az Ingói-berek). Megvalósulásukkal a Balatonban – főleg a Keszthelyi-öbölben – lejátszódó hordaléklerakódási és tápanyag hasznosulási/felhalmozódási folyamatok a Balaton elé, a Zala alsó szakaszán kialakított vízvédelmi rendszer területére helyeződnek át. Ez a megoldás a mintegy 200 évvel ezelőtti, természetes állapothoz hasonlító viszonyokat állított elő.

A Balaton vízyűjtőjét a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszerrel az 1. ábrán mutatom be.



1. ábra A Balaton és vízgyűjtője a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer. (Forrás: http13)
 1=vízszél, töltés; 2=vasút; 3=befolyó; 4=sziget; 5=Zala-szelvény; 6=I.ütem; 7=II.ütem;
 8=Ingói-berek; 9=víztáj.

2.3.2 Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer működése

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer I. üteme a Hídvégi-tó, mely egy mély fekvésű (átlagos vízmélysége 1,1 méter), észak-déli irányú, régebben mezőgazdasági célokra alig használt terület volt, azonban alkalmasnak ígérkezett a Zala folyón keresztül érkező oldott tápanyagok és más hordalékok Balaton elöl történő visszatartására, hasonlóan a 150 évvel ezelőtti funkciójához. Összesen 18 négyzetkilométer kiterjedésű területre terült szét a Zala folyó vize, amely a Zala jobb parti és a délről csatlakozó Kiskomáromi-csatorna völgyeit foglalja magába. A rendszer kiépítése 1981-ben kezdődött és 1985-ben készült el. A szakembereknek köszönhetően a Zala folyó vízszintje a Balaton vízszintjénél 2 méterrel magasabbra duzzadt (Balti tenger vízszintjétől 106,5 méterrel magasabb). A folyó jobb parti töltését elbontották, hogy a megalapozott területre kifolyhasson a víz, továbbá terelőtöltést is épült annak érdekében, hogy a víz ne a legrövidebb úton áramoljon az I. és II. ütemet elválasztó zsilip felé (http14).

A területtöltés és a Zala folyó között maradt áramlási holtterben egy 3,4 négyzetkilométer alapterületű kazettát építettek ki egy beeresztő és egy leeresztő műtárggyal. A beeresztő műtárgy másodpercenként 10 köbméter vizet tud átengedni, így relatíve gyorsan be lehet engedni például a magas árhullámot, így a töltések megóvásával lehet a leeresztő műtárgyon lebocsátani a megnövekedett vízmennyiséget. A kazetta segítségével mód van a szennyezett vizeket tisztítani, kezelni. A víz minőségét és tisztaságát naponta laboratóriumi vizsgálatok alá vetik (http15).

Az I. ütemre érkező vizek tartózkodási idejét 30 napra becsülik. A vízterület átlagos mélysége 1,5 méter, mely viszonylag könnyen átmelegszik, magasabb rendű növényekkel kis mértékben fedett (http14).

A vízvédelmi rendszer első ütemének legnagyobb műtárgya a zsilip, mely a Zala megtisztult vizét engedi tovább a második ütemre. A zsilipnek két nyílása van: egy kisebb, mely a vízszint szabályozására, kis- és középvizek átvezetésére alkalmas és egy nagyobb, amelyen keresztül levezetik az esetleges árvizeket, kisebb úszó munkagépeket és a vízi járműveket (http15).

A II. ütem Ingói-berek része 1992 novemberétől indulva került elárasztásra melynek következtében a terület vízszintje átlagosan 30 centiméterrel emelkedett. A II. ütem teljes rekonstrukciója csak 2015-ben fejeződött be (http16).

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer Fenéki-tavát eredetileg úgy tervezték, hogy a víz a megközelítően 51 négyzetkilométeren elárasztott területet és két terelőtöltést megkerülve többé-kevésbe 90 nap alatt jusson el a Balatonba. 1992 novemberében a tervezett rendszerből 16 négyzetkilométernyi terület került elárasztásra, melyet Ingói-bereknek nevezünk (2. ábra). A megnövekedett víztermelés hatására a terület észak-nyugati részén elkezdett kibontakozni az úgynevezett „babásodás” jelensége. A babásodás során a nádnak nincs lehetősége ivarosán szaporodni, a mélyebb vízben csak vegetatív úton képes, ez hosszú távon a nádak fellazulásához és kiritkulásához vezet ([http14](#)).



2. ábra Ingói-berek (Forrás: [http17](#)).

Összefoglalva, a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer II. ütemének folyamatosan megvalósuló feladatai, céljai a következők.

1. A Balaton vízminőség-védelmének növelése: a tó vízminőségét leginkább az algás eutrofizáció veszélyezteti, melynek csökkentését a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer a tavat terhelő tápanyagok csapdázásával segíti elő. Rugalmas üzemrend kialakításával a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer rövidre zárható és így a Zala folyó vize akár egyenesen a Balatonba is kormányozható. Továbbá javul a lebegőanyag eltávolításának hatásfoka, ezáltal kevesebb tápanyag érkezik a Zalán keresztül a Balaton Keszthelyi-

medencéjébe. Előreláthatóan csökken foszforterhelés, ami redukálja a kék alga tömeges elszaporodásának lehetőségét, és hosszú távon csökken a Keszthelyi-medencében felhalmozódott üledék mennyisége is.

2. Természetvédelmi és ökológiai értékek védelme érdekében: a Zalavári belvízöblözet elárasztása, az Ingói-berek terhelésének csökkentése és vízszintjének szabályozhatósága. Ez a wetland-szerű kezelés biztosítja, hogy a Fenéki-tó ez idáig el nem árasztott részeire ne csak alkalmoszerűen, mint például árvizek esetén, hanem igény szerint, és a monitoring eredményeit figyelembe véve megfelelő mennyiségű víz jusson ki a területeire.
3. Az árvizek kockázatának redukálása a nagyobb hozzáférhető tározó térfogattal és rekonstruált belvízvédelmi rendszerrel (http14).

2.3.3 Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer és a természetvédelem

A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer létesítése során a növényzet nagymértékű változásokon ment keresztül, újra vizes és nedves élőhelyek jöttek létre. Az elárasztást megelőzőn a növényzet közel negyven százaléka sásos terület volt. A nádasok csupán 25 hektáron nőttek. Az I. ütem beüzemelését követő vízszintemelést az ott élő szárazság kedvelő növényzet nem tűrte, emiatt a sások kipusztultak és helyüket több száz hektárnyi kiterjedésű úszónövényzet foglalta el. A II. ütem területe mélyebben található, mint az I. ütemé, ezért sokkal nagyobb részesedése volt a nádasoknak és a mocsári növényzetnek. Az elárasztást követően ezek visszahúzódtak és helyüket hínárok vették át. A nádasok visszahúzódásának következménye a fényviszonyok változása is, így több fény jut a mélybe és emiatt jönnek elő a hínárosok. Nagyobb figyelmet érdemelnek még az Ingói- berek úszó szigetei és azok növényei (3.ábra), melyek szilárd tőzegtalajjal rendelkeznek, alattuk és az eredeti talajképző kőzet között nyílt vízfelület van. Ezeken az úszó szigeteken igazán különleges növények jelennek meg (http18).



3. ábra Ingói-berek úszó szigetei (Forrás: <http18>).

A Kis-Balaton 1951-et követően lett természetvédelmi terület és 1997-ben lett a Balaton-felvidék Nemzeti Park része. A Kis-Balaton, mint összefüggő, nagy kiterjedésű vizes élőhely, 1979-óta a nemzetközi jelentőségű vadvizekről, különösen, mint a vízimadarak tartózkodási helyéről szóló ún. Ramsari Egyezmény hatálya alá tartozik, továbbá 2004-től Különleges Madárvédelmi Területnek minősül az Európai Unió Natura 2000 területek hálózatában (<http20>). A terület gazdag növény- és állatvilágából Európa híré a madárvilága, melyet a mintegy 250 madárfaj, közöttük 27 fokozottan védett faj biztosít. Vonulások ideje alatt a térség több mint 20 000 vízimadárnak ad otthont, különösképpen récéknek és ludaknak. A hófehér nagy kócsagnak (*Adrea alba*), a magyar természetvédelem kedvelt szimbólumának jelentős nagyságú populációja fészkel a térségben. A mocsárrekonstrukciós munkálatokat befejezve, gyarapodtak az optimális táplálkozási és szaporodási lehetőséget biztosító területek, melyek a vonuló, valamint a telető madárfajok rövid idő alatt el is foglaltak. A Kis-Balaton területén a Kányavári sziget szabadon látogatható, míg az élőhely többi területe csak engedéllyel vagy szakvezető segítségével tekinthető meg (<http10>). A Kis-Balaton Zala megye legnagyobb vízi paradicsoma, Fekete István regényeinek, a Tüskevárnak és a Teli bereknek a színhelye, fokozottan védett területe 14 745 ha. A Kis-Balaton növényzetét a lápi növénytársulások sokszínűsége jellemzi. Éger- és fűzlápok, zombékos-sásos társulások, mocsárrétek és nagy terjedelmű nádasok veszik körül a terebélyes,

nyílt vízterületet. Veszélyeztetett növényfajai a lápi csalán (*Urtica kioviensis*), a kálmos (*Acorus calamus*) és a kis holdruta (*Botrychium lunaria*). A terület állatvilágának gerincét a madarak adják. Valamennyi hazai vízimadár megtalálható itt, de ide jár táplálkozni a réti sas (*Haliaeetus albicilla*) és a halászsas (*Pandion haliaetus*). A területen fészkelő ragadozó madarak közé tartozik a hamvas rétihéja (*Circus pygargus*) és a réti fülesbagoly (*Asio flammeus*). Madárvonulás idején a terület madarak tízezreinek biztosít átmenti élőhelyet. A halfajok közül a máshol ritka lápi póc (*Umbra krameri*) és a réti csík (*Misgurnus fossilis*), itt tömegesen fordul elő. Csaknem minden hazai halfaj fellelhető a területen, tökéletes élőhelye olyan halfajok számára, mint például a ponty (*Cyprinus carpio*), a csuka (*Esox lucius*), a balin (*Leuciscus aspius*) és a compó (*Tinca tinca*). A nádasokat kedvelő ritka emlős a patkányfejű pocok (*Microtus oeconomus*) is megtalálható itt. A Kis-Balaton rovar- és alsóbbrendű faunájának fajgazdagsága szintén kiemelkedő, köztük olyan fajokkal, amelyek Magyarországon vagy egész Európán belül csak itt fordulnak elő (http19).

A térségben a védettségi státuszának megfelelően régóta zajlanak különböző madártani vizsgálatok és állománybecslések. A 19. század második felében és a 20. században folytatott vizsgálatok főként a terület lecsapolását követően létrejövő faj és egyedszám csökkenésről számoltak be. A vízviszonyokban és a madárállományokban bekövetkező változások a 70-es évek végére érték el melypontjukat, ezek után került előtérbe a Kis-Balaton vízvédelmi célú feltöltése és a Balaton vízminőségének javítása. A terv része volt az 1984-ben történt fejlesztés, melyben a Zala folyó vizével árasztották el Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer I. ütemének töltéssel körülvett víztározóját (Hídvégi-tó). Az ezt követő kezdeti időszakban 1984 és 1988 között, nagymértékben növekedett a vízhez kötődő fészkelő madárfajok száma, melyek között felfedezték az üstökös récét (*Netta rufina*) is, a faj első hazai fészkelési adatait ez idő tájt jegyezték fel. A Kis-Balaton elárasztásának II. üteme (Kis-Balaton Vízvédelmi rendszer II. Alsó tározó) 1992-ben történt, amely egyéb jelentőségteljes változásokat okozott a régióban. Közismert problémát jelentett az Ingói-berek területén megtalálható fokozottan védett nádasok méretének csökkenése. A megfigyelésekből kiderült, hogy a nádi énekesmadár közösség szerkezete jelentősen eltérő a nádas és sásos élőhelyeken, továbbá csak a nádirigó (*Acrocephalus arundinaceus*) populációja növekedett az elárasztásokat követően. A hosszan tartó vizsgálaton felfedték és egyben rámutattak a nádi énekesmadarak különös élőhely választására és a szegélyhatás jelentőségére a Kis-Balatonon (http20).

3 A vizsgálatok módszerei

3.1 A mintavételek időpontjai és helyszínei

A mikroműanyagok mintázására három különböző alkalommal került sor (2022.06.15., 06.17. és 06.20.), összesen 10 mintavételi ponton. A mintavételi helyszínek GPS koordinátáit és a begyűjtött minták jelöléseit az 2. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat. A mintavételek időpontjai, helyszínei és a begyűjtött minták jelzései

Mintajel	Helyszín	GPS koordináták	
ZEG-F	Zala folyó, Zalaegerszegi szvt felett	46.853391	16.830463
ZEG-EL	Zalaegerszegi szvt tisztított szennyvíz mintavételi aknája	46.852363	16.858745
ZEG-A	Zala folyó, Zalaegerszegi szvt alatt	46.852111	16.860944
z15	Zala folyó, Zalaapáti közúti híd mellett	46.727339	17.121609
kiko	Kiskomáromi-csatorna (Zalakomár)	46.546558	17.170614
z11	Zala folyó (KBVR I. és II. ütem között), Balatonhídvég közúti híd mellett	46.636939	17.183595
Zsha	Zala-Somogyi határárok (Zalakomár)	46.534995	17.221752
Mvcs	Marótvölgyi-csatorna (Vörs)	46.662806	17.250917
eo20	Egyesített-övcatorna (Keszthely)	46.691073	17.238015
z27	Zala folyó (Fenekpuszta, KBVR II.ütem zárózsilip és a Balaton között)	46.701967	17.258314

szvt: szennyvíz tisztító telep

3.2 A mintavételi helyszínek bemutatása

A zalaegerszegi szennyvíztisztító telepet az Észak-zalai Víz-és Csatornamű Zrt. (Zalavíz Zrt.) üzemelteti, napi 17.000 m³ szennyvíz tisztítására alkalmas, évente 4 860 000 m³ tisztított szennyvizet bocsát a Zala folyóba. A telepen a lakossági, intézményi szennyvizeken kívül az ipari üzemek helyileg előtisztított szennyvizeit is fogadják. A zalaegerszegi telepen megtisztított szennyvíz a Balaton vízgyűjtő területén, a Zala folyóba kerül, a telep mérete és a befogadó érzékenysége miatt a tisztított szennyvíz minőségének a 28/2004.(XII.23) KvVM rendelet által előírt legszigorúbb paramétereket is ki kell elégíteni. Ehhez az eutrofizációt okozó tápanyagokat (nitrogén és foszfor) is, a megfelelő hatásokkal el kell távolítani, az üzemben

mechanikai, biológiai tisztítási technológiai fokozatok és vegyszeres N, P eltávolítás zajlik. A tisztított szennyvizet UV fény segítségével fertőtlenítik. Kibocsátási adatait méreténél fogva be kell jelenteni az EU E-PRTR (European Pollutant Release and Transfer Register), az Európai Szennyezőanyag-kibocsátási és -szállítási Nyilvántartás adatbázisába ([http 21](http://21)).

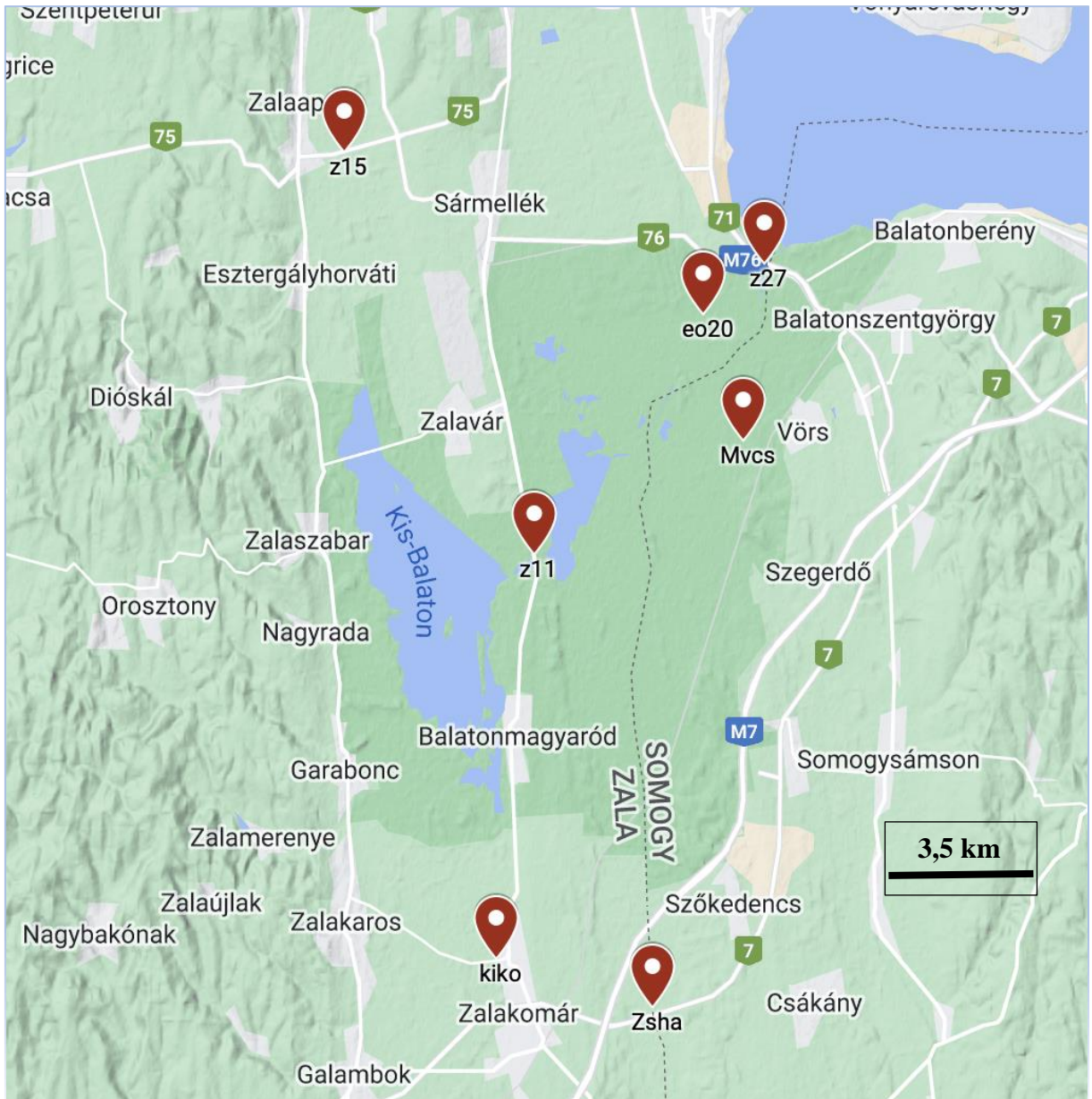
A Zala folyón, a zalaegerszegi szennyvíztisztító telep felvízi (**ZEG-F**) és alvízi szakaszán (**ZEG-A**), valamint az elmenő tisztított szennyvíz aknájánál (**ZEG-EL**) lévő mintavételi pontok vázlatos térképi elhelyezkedését a 4. ábrán mutatom be.



4. ábra A zalaegerszegi szennyvíztisztító telep felvízi szakaszán (ZEG-F), az elmenő tisztított szennyvíz mintavételi aknája (ZEG-EL) és a telep alvízi szakaszán lévő mintavételi pont (ZEG-A) vázlatos térképi elhelyezkedése a Zala folyón (Forrás Google MyMaps 2022).

A Zala folyón és a Kis-Balaton területén létesült további 7 mintavételi pont vázlatos térképi elhelyezkedését az 5. számú ábrán mutatom be. Ezekben a pontokban a Zala-folyót és a Kis-Balatont közvetlenül tápláló négy jelentős vízfolyást (Kiskomáromi-csatorna, Zala-Somogyi határárok, Marótvölgyi-csatorna, Egyesített-övcatorna) mintáztuk.

A **ZEG-A** ponthoz képest a Zala folyón folyásirányban a következő mintavételi pont Zalaapátnál a 75-ös számú közúti híd alatt létesült **z15** jelzéssel, kb. 5,5 km-re a Zala folyónak a Kis-Balatonba (KBVR I.) érkezése előtt. A vízáramlási irányokat figyelembe véve a Kiskomáromi-csatorna vize a KBVR.I. legdélebbi pontján lép a Kis-Balatonba, a csatornát a **kiko** jelű pontban mintáztuk. A KBVR I. és II. ütem közötti vízátvezetésnél (a Zala folyón) vettük fel a **z11** mintavételi pontot. A Zala-Somogyi határárok a KBVR II. ütem legdélebbi területén lép a Kis-Balatonba, míg a Marótvölgy-csatorna a II. ütem középső, keleti szektorában, az Egyesített-övcatorna pedig a II. ütem északnyugati végében. Ezekben a vízfolyásokon a vettük fel az előbbi felsorolás sorrendjében a **Zsha, Mvcs és eo20** mintavételi pontokat. A **z27** mintavételi pont a KBVR II. ütemét lezáró zsilip és a Balaton közötti Zala folyó víztestből származik. Az összesítő térképvázlaton szereplő mintavételi helyeket a Google MyMaps nevű internetes térképkészítő program segítségével, vörös színű címkékkel („gombostűkkel”) jelöltem meg.



5. ábra A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer környezetében és a területén létesített mintavételi pontok vázlatos megjelenítése. A térkép vázlaton a kék szín a vízfelületeket, a körülöttük lévő sötétebb zöld színezés pedig a KBVR teljes területét jelöli az alaptérkép készítésének idején (Forrás Google MyMaps 2022).

3.3 A mikroműanyagok számának meghatározási lépései, módszerei

3.3.1 Mintavétel felszíni vizekből

A szivattyús mintavételezés módszerét a Wessling Hungary Kft fejlesztett ki és folyamatosan tökéletesíti (Bordós et al. 2020). A részvételemmel zajló mintavételezések során vízszivattyú segítségével - melyet egy generátor látott el energiával - vizet áramoltattunk át eltérő

pórusméretű acél szűrőkön. A szűrők pórusmérete az 1 mm átmérőjű előtét szűrőtől haladva 300, 100 és 50-es mikronos volt. Az előtétiszűrőt azért alkalmaztuk, hogy a nagyobb részecskék zavaró hatását az előkészítés és mérés során elkerüljük. Mintavételi helyszínenként 1100-2100 liternyi vizet szivattyúztunk keresztül a szűrő kaszkádon. A mintavétel módszeréből adódóan így az 50 µm - 1 mm közötti méretű mikroműanyagokat tudtuk begyűjteni. A mintavétel körülményeit a 6. ábrán mutatom be.



6. ábra. Mintavételezés az Mvcs, Vörs, Marótvölgyi-csatorna helyszínen. Előtérben a külső konzulensem, középen a dolgozat szerzője, háttérben a szivattyú és a szűrő kaszkád (Készítette: Dr. Szoboszlai Sándor).

3.3.2 Mintaelőkészítés

A rozsdamentes szűrőbetétekről a laborba érkezés után a részecskéket lemosás mikroműanyag mentes ioncserélt víz segítségével (MP free); majd a minták térfogatcsökkentésén esnek át, melyhez rozsdamentes szitát használnak 50 µm-es pórusátmérővel. Térfogatcsökkentés után 100 mL-nyi 30%-os hidrogén peroxidot (30% H₂O₂ Medical, Purissimum, Merck KGaA, Germany) adnak a mintákhoz, annak érdekében, hogy a megelőzzék a nem kívánt biológiai aktivitást (például biofilm képződés) és megkezdődjön a szerves anyagok lebontása, oxidációja.

Az oxidáló szerben egy éjszakán keresztül inkubálják a mintákat, majd újból leszűrik őket. Ezt egy újabb oxidáción alapuló mintaelőkészítési lépés követi, a Fenton reakció. (A Fenton-reakció egy erős oxidációs folyamat, melynek során vas (II)ion (Fe^{2+}) elindítja és katalizálja a H_2O_2 bomlását, ami in-situ hidroxilgyök képződéshez vezet). A Fenton reakció kivitelezéséhez először 200 mL MP free vizet adnak a mintákhoz, majd 200 ml-nyi 30%-os hidrogén peroxidot és végül 60 mL-nyi vas(II)-szulfát katalizátort, majd egy újabb egy éjszakán keresztül inkubáció következik. A reakció végeztével újból leszűrik a mintákat és a sűrűsége alapján elválasztás érdekében kis térfogatú üveg szeparátorba helyezik őket (small volume glass separator; SVGS) Az SVGS-t cink-klorid (Purissimum, Thomasker Fine-chemicals Inc., Hungary) $1,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű oldatával töltik fel, így a mintáikban lévő részecskék két órán keresztül a sűrűségük szerint szétválnak. Az SVGS felső részébe kerülő részecskék képezik a koncentrált mikroműanyagokat tartalmazó mintákat, melyet kimosnak az üveg eszközökből és még egyszer utoljára leszűrik ANODISC szűrőre ($\text{Ø} = 25 \text{ mm}$; pore = $0.2 \text{ }\mu\text{m}$, GE Healthcare, United Kingdom) (Mári et al. 2021).

3.3.3 Mikroműanyagok mennyiségi és minőségi meghatározása

Az ANODISC szűrőt két kalcium-fluorid (CaF_2) optikai ablak közé teszik, annak érdekében, hogy a részecskék egy síkban helyezkedjenek el. A részecskék anyagtípusának megállapítását FTIR mikroszkóp (Nicolet iN10, Thermo Fisher Scientific, USA) segítségével végzik transzmissziós üzemmódban. A mikroszkóp a szűrő felszínét $25 \text{ }\mu\text{m}$ -es pixelenként végig pásztázza. Az FTIR spektrumokat $4000\text{-}1250 \text{ cm}^{-1}$ hullámhossz tartományban gyűjtik. A mintákról több mint félmilliónyi spektrum készült, amelyeket a siMPle szoftver (<http://22>) segítségével értékelik. A szoftver a mintánkban lévő spektrumokat összehasonlítja egy spektrális könyvtárral és ha 70% vagy annál nagyobb hasonlóságot talál a spektrumok között, akkor a részecskét műanyagként tekinti, és polimer-típusomként kategorizálja őket.

3.3.4 Minőségbiztosítás a laboratóriumi mintafeldolgozás során

A minták feldolgozása közben általános óvintézkedéseket tesznek az esetleges laboratóriumi kontamináció elkerülése érdekében. A mintatartó üveg főzőpoharakat alumínium fóliával takarják le, a mintaelőkészítés során pamut laborköpenyt viselnek, a szűrési lépéseket lamináris levegő áramlást biztosító (steril) fülkében végzik a szakemberek. Az oxidációs lépéseket elszívófülke alatt kivitelezik, amely ugyan nem védi meg teljes mértékben a mintákat a szennyeződéstől, de munkavédelemi előírások miatt használata szükséges. Emellett

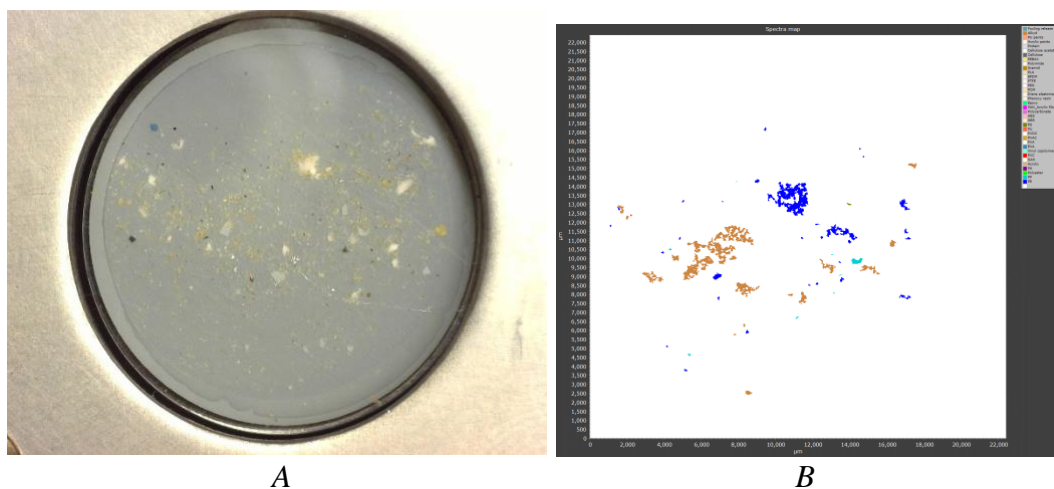
párhuzamosan a mintáinkkal laboratóriumi vak mintákat is készítenek azért, hogy számszerűsíteni lehessen a kontamináció mértékét. Ezekben a vak mintákban átlagosan 1,3 polietilén részecske, 1 polipropilén részecske és 0,3 polisztirol részecske volt azonosítható.

4 Eredmények és értékelésük

Ebben a fejezetben először mintavételi helyszínenként bemutatom a vízmintákból készült ANODISC szűrőlapok Petri-csészékben tárolt fényképeit két verzióban: közvetlenül szűrés utáni, „natúr” állapotban, és az FTIR mikroszkópos technikával ebből mátrixból legalább 70%-os anyagspektrum egyezőségi szinten azonosított mikroműanyag részecskéket. A fényképek alatt megadom a helyszínen a kaszkád szűrőrendszeren átszívott vízmennyiséget és az ebből azonosított mikroműanyag részecskék fajtáját és számát. A fényképes áttekintés után egy köbméter víztérfogatra vetítve táblázatos formában összefoglalom a különböző helyszíneken meghatározott mikroműanyag részecske számokat és térképvázlaton is bemutatom őket.

4.1 A Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító felett vett vízminta eredményei (mintajel: ZEG-F)

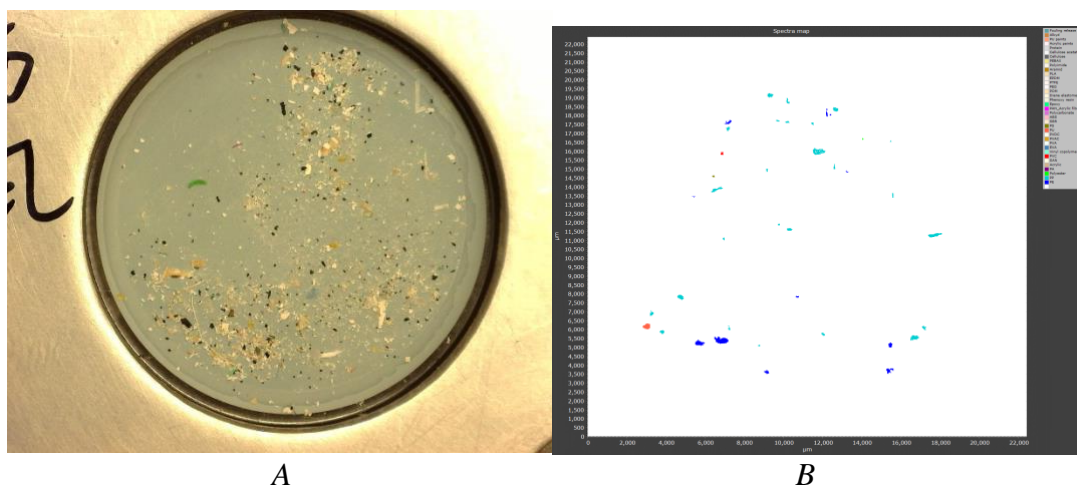
A **ZEG-F** mintajelű mérési pontnál összesen 2009 liter átszűrt vízből 51 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 31 db polietilén, 2 db polipropilén és 18 db alkid (poliészter elsősorban zsírsav adalékokkal, főleg fémre és fára való festékekben alkalmazzák) főkomponensűt (7. ábra).



7. ábra A **ZEG-F** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

4.2 A zalaegerszegi szennyvíztisztító tisztított szennyvízéből vett vízminta eredményei (mintajel ZEG-EL)

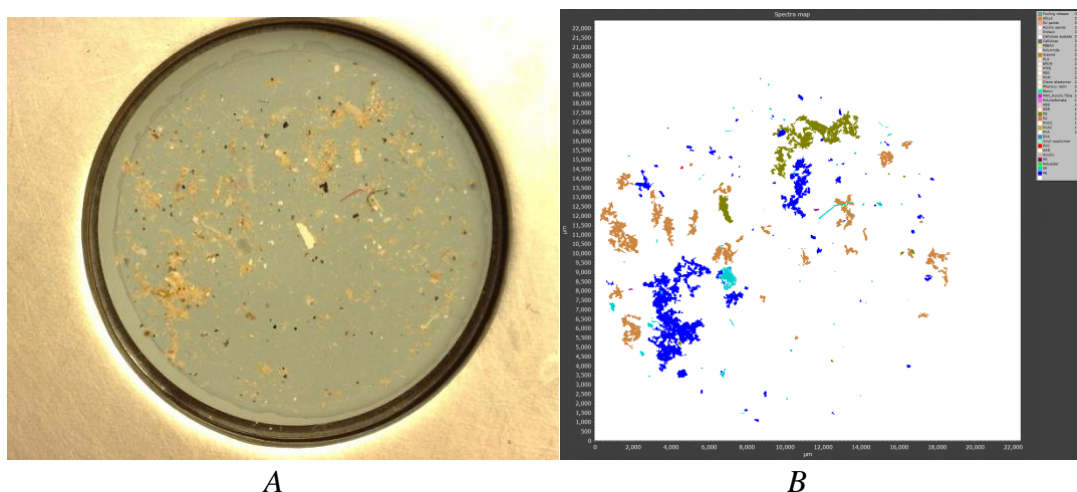
A **ZEG-EL** mintajelű mérési pontnál összesen 1003 liter átszűrt vízből 30 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 12 db polietilén, 15 db polipropilén, 1 db poliészter, 1 db polivinil-klorid és 1 db polisztirol főkomponensűt (8. ábra).



7. ábra A **ZEG-EL** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyagok részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtaenkénti színezését az értékelő program végzi.

4.3 A Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító alatt vett vízminta eredményei (mintajel: ZEG-A)

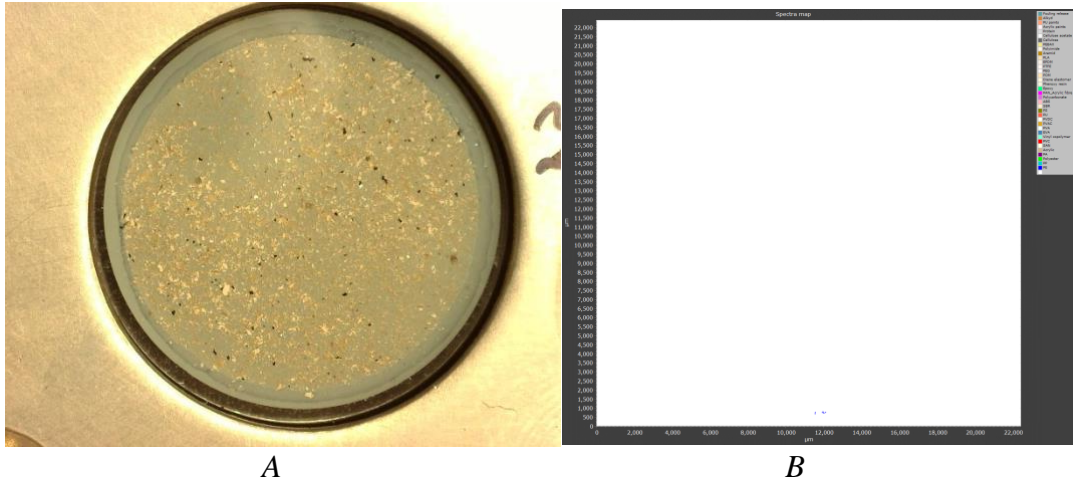
A **ZEG-A** mintajelű mérési pontnál összesen 1890 liter átszűrt vízből 129 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 64 db polietilén, 19 db polipropilén, 1 db poliészter, 2 db poliamid, 13 db polisztirol és 30 db alkid főkomponensűt (9. ábra).



9. ábra A **ZEG-A** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtaenkénti színezését az értékelő program végzi.

4.4 Zala folyó, Zalaapáti közúti híd mellől vett vízminta eredményei (mintajel: z15)

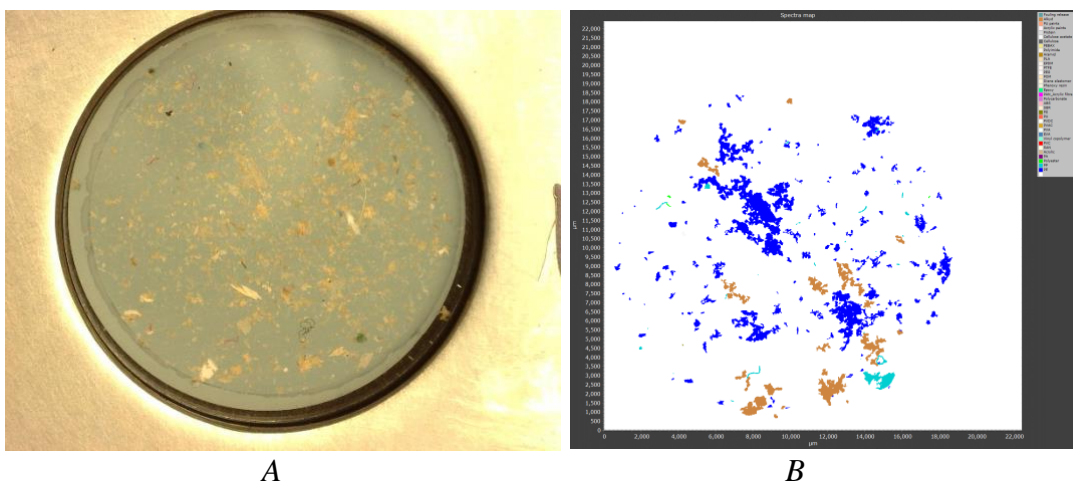
A **z15** mintajelű mérési pontnál összesen 1988 liter átszűrt vízből mindössze 3 db polietilén főkomponensűt mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani (10. ábra).



10. ábra A **z15** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után, mindössze 3 db. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

4.5 A Kiskomáromi-csatornából (Zalacomár) vett vízminta eredményei (mintajel: kiko)

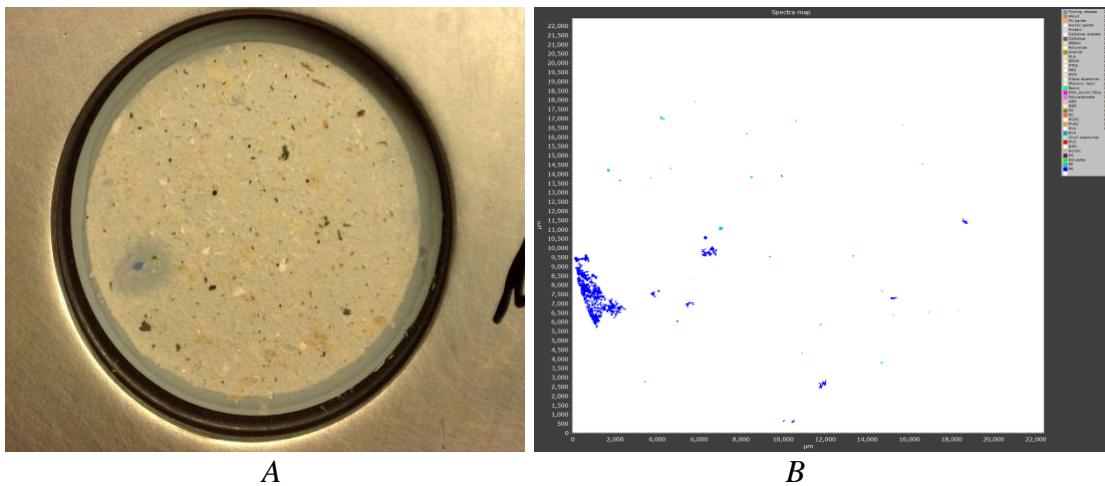
A **kiko** mintajelű mérési pontnál összesen 1347 liter átszűrt vízből 206 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 160 db polietilén, 21 db polipropilén, 2 db poliészter, 2 db cellulóz acetát és 21 db alkid főkomponensűt (11. ábra).



11. ábra A **kiko** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

4.8 A Marótvölgyi-csatornából (Vörs) vett vízminta eredményei (mintajel: Mvcs)

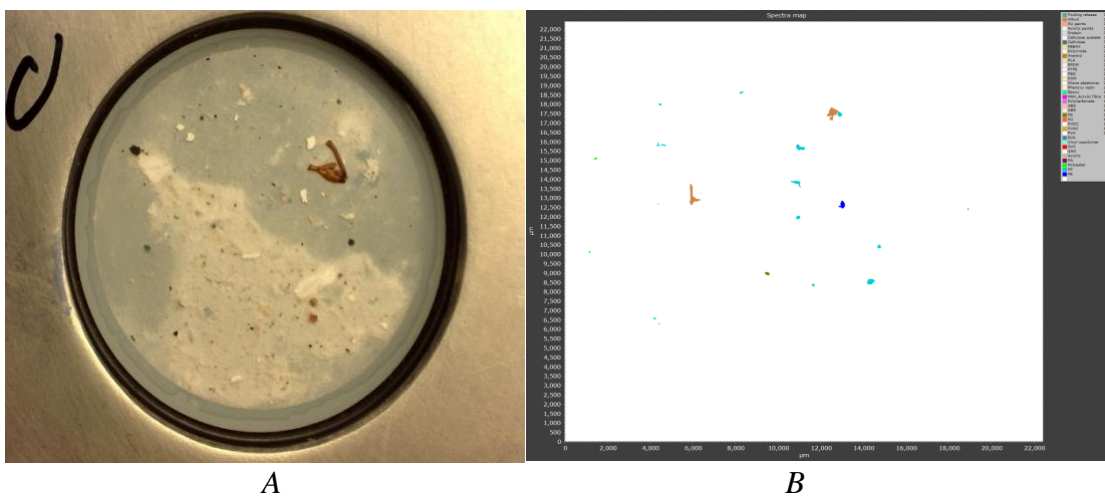
Az **Mvcs** mintajelű mérési pontnál összesen 2001 liter átszűrt vízből 19 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 15 db polietilén, 3 db polipropilén és 1 db polisztirol főkomponensűt (14. ábra).



14. ábra Az **Mvcs** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

4.9 Az Egyesített-övcSATORNÁból (Keszthely) vett vízminta eredményei (mintajel: eo20)

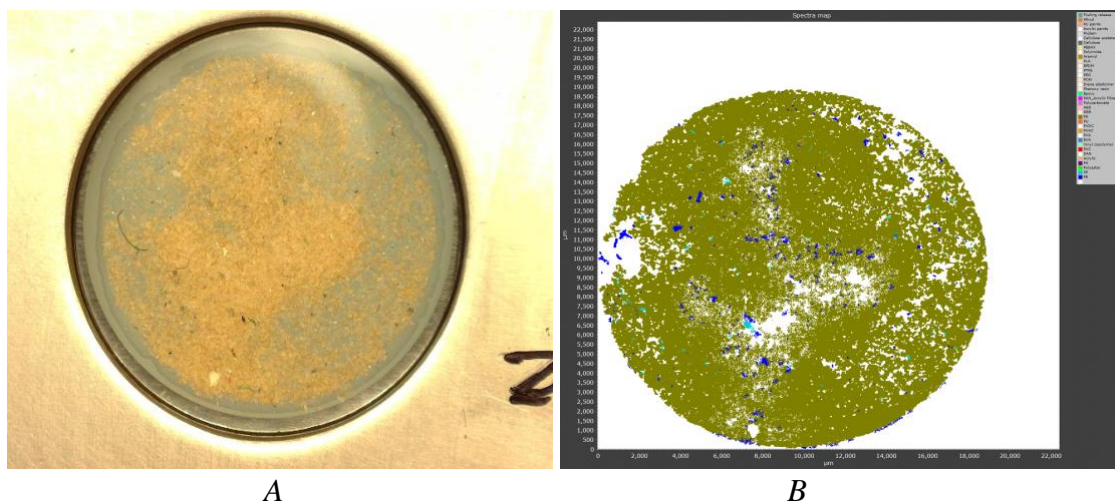
Az **eo20** mintajelű mérési pontnál összesen 2101 liter átszűrt vízből 12 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 3 db polietilén, 6 db polipropilén, 1 db poliészter és 2 db alkid főkomponensűt (15. ábra).



15. ábra Az **eo20** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

4.10 A Zala folyón (Fenekpuszta), a KBVR II. ütem zárószilip és a Balaton között vett vízminta eredményei (mintajel: z27)

A **z27** mintajelű mérési pontnál összesen 2032 liter átszűrt vízből lehetett a legnagyobb számú, összesen 398 db mikroműanyag részecskét lehetett azonosítani: 343 db polietilén, 45 db polipropilén és 10 db polisztirol főkomponensűt (16. ábra).



16. ábra A **z27** minta. A: a szűrt, natív minta, B: mikroműanyag részecskék FTIR azonosítás után. A részecskék anyagfajtánkénti színezését az értékelő program végzi.

A fényképeket áttekintve feltűnő, hogy pl. a **z11** (12. ábra), **Zsha** (13. ábra), **eo20** (15. ábra), **z27** (16. ábra) minták natív szűrletéről készült fotókon (A) a háttérnél világosabb, többnyire csóva-szerű, vagy pl. az **Mvcs** mintánál (14. ábra) a teljes szűrőlapot befedő alakzatok tűnnek fel. Ezeknek a vastagodott rétegeknek a jelenléte a feltételezés szerint az eredeti minta magas szerves anyag tartalmából adódik, vagyis a szerves komponensek mintából való eltávolításához nem volt elég az alkalmazott oxidáló szerek mennyisége. Érdekes, hogy a **z27** mintánál (16. A ábra) „9 óránál” egy hosszú szálú alakzat látszik, de ezt a 16. B. ábrán már nem látjuk, így ez valószínűsíthetően műtermék, így nem a minta része volt és/vagy nem mikroműanyag. A maradék szerves anyag mátrix okozta kitakarások, illetve a részecskék esetleges átfedése („átlapolása”) miatt a vízmintákból azonosított részecskék száma valószínűsíthetően „csak” a mintában minimálisan meglévő, 50 μm és 1 mm közötti méretű mikroműanyagok számát jelzik. A 7-16. ábrák fényképeit a Wessling Hungary (Eurofins) Kft szakemberei készítették. A vízmintákból köbméterenként kimutatott mikroműanyag részecske számokat a 3. számú táblázatban mutatom be.

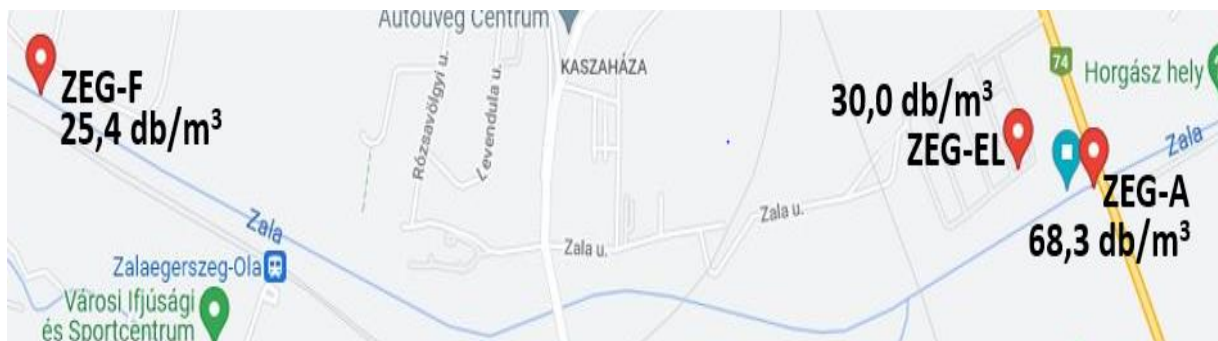
3. táblázat. A mikroműanyag részecske) számok (db) egy köbméter vízmintára átszámítva, műanyag fajtánként (főkomponens) és mintavételi helyszínenként.

Mintajel / MP főkomponens	ZEG-F	ZEG-EL	ZEG-A	z15	kiko	z11	Zsha	Mvcs	eo20	z27
PE	15,4	12,0	33,9	1,5	118,8	0,5	11,5	7,5	1,4	168,8
PP	1,0	15,0	10,1	0,0	15,6	3,5	0,0	1,5	2,9	22,1
PES	0,0	1,0	0,5	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
PA	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PVC	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PS	0,0	1,0	6,9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	4,9
CA	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PAK	9,0	0,0	15,9	0,0	15,6	0,0	6,5	0,0	1,0	0,0
Összesen	25,4	30,0	68,3	1,5	152,9	4,0	18,5	9,5	5,7	195,9

MP: mikroműanyag, PE: polietilén, PP: polipropilén, PES: poliészter, PA: poliamid, PVC: polivinil-klorid, PS: polisztirol, CA: cellulóz-acetát, PAK: (poliészter)alkid

A 3. táblázat adataiból kiderül, hogy a polietilén a felszíni vízminták mindegyikében jelen volt, illetve számítható, hogy a polipropilénnek 90%-os, az alkidnak 55%-os, a polisztirolnak 44%-os, a poliészternek 33%-os, a poliamidnak és a cellulóz-acetátnak 11-11%-os volt az előfordulási gyakorisága a minták között, a PVC pedig csak a tisztított szennyvízben fordult elő. Az egyes vízminták összetételét is a polietilén és a polipropilén dominálták.

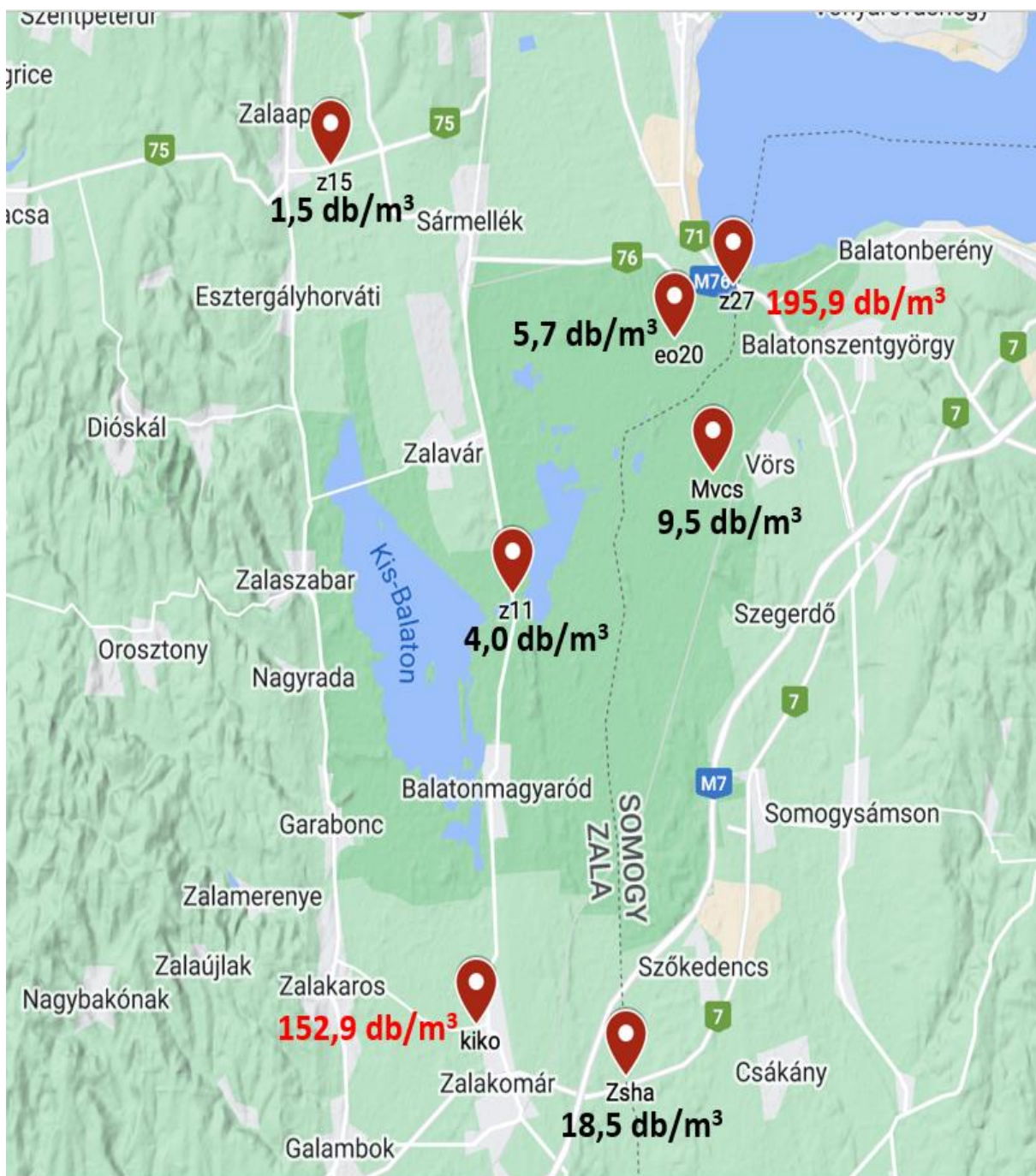
A mikroműanyag részecskék összesített számait a Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító környezetében és az elfolyó tisztított szennyvízben a 17. ábrán szemléltetem.



17. ábra. Az azonosított mikroműanyag részecskék összesített száma a Zala folyón a zalaegerszegi szennyvíztisztító környezetében és az elfolyó tisztított szennyvízben (Forrás: Google MyMaps 2022).

A 17. ábráról megállapítható, hogy a zalaegerszegi szennyvíztisztító a felvízi (ZEG-F) mikroműanyag számot ($25,4 \text{ db/m}^3$) jelentősen, több mint a kétszeresére növeli (ZEG-A: $68,3 \text{ db/m}^3$)

A 18. ábrán A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer környezetében és a területén létesített mintavételi pontokban mért összes mikroműanyag részecske számokat szemléltetem.



18. ábra. A Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer környezetében és a területén létesített mintavételi pontokban mért mikroműanyag részecske számok (Forrás: Google MyMaps 2022).

A 18. ábráról látszik, hogy a Zalaapáti felől érkező Zala folyóból származó mintában (**z15**) meglepően alacsony, mindössze $1,5 \text{ db/m}^3$ mikroműanyag részecske szám volt kimutatható. Persze, ha figyelembe vesszük a folyó $6-15 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozamát, ez évente akár 280 - 710 millió db $50 \mu\text{m}$ és 1 mm közötti méretű polietilén részecske felbukkanását és a KBVR felé való irányulását is jelezheti. A KBVR területén vett vízminták szintén alacsony mikroműanyag koncentrációkat mutattak ($4-18,5 \text{ db/m}^3$). Ezekhez az értékekhez képest viszont 1-2 nagyságrenddel magasabb koncentrációkat lehetett detektálni a Kiskomáromi-csatornán létesített **kiko** jelű, és a **z27** jelzésű, a KBVR II. ütemét lezáró zsilip és a Balaton közötti Zala folyó víztestből származó vízmintákban. Információink szerint a mintavétel időszaka előtt és alatt a zsilip le volt zárva, így a KBVR felől csak a hallépcsőn átsorduló folyóvíz érkezett, így a mikroműanyagok magas koncentrációját a Zala folyó Balatonba torkollása előtti szakaszán valószínűleg nem a KBVR felől érkező részecskék okozták. A **z27** mintavételi pontunk az M76 autópálya hídja alatt volt, így nem elképzelhetetlen, hogy az itt mért, viszonylag magas mikroműanyag koncentrációra befolyással lehetett ez a közút. Szakirodalmi adatok alapján a közlekedés mikroműanyag terhelésével kapcsolatosan a közutakról az esővel lemosódó vízben akár 24.000 db/m^3 , az úttestekről származó „takarítási homokban” pedig 850.000 db/kg mikroműanyag részecske is előfordulhat (Liu et al. 2019, Jarlskog et al. 2021).

5 Következtetések és javaslatok

A szakirodalmi áttekintés fejezetben összefoglalóan bemutattam és elemeztem a felszíni vizekben, a talajban, a növényekben, az állati szervezetekben, az élelmiszerekben és az ember vonatkozásában a mikroműanyagok jelenlétéről, veszélyességéről szóló információkat. Az adatok feldolgozása során arra a megállapításra jutottam, hogy a mezőgazdaság esetében **Magyarországon** teljes mértékben **hiányoznak** a **talajokra**, valamint a felszíni vizek és a talajok/növények ökoszisztémája között kapcsolatot jelentő **öntözővizekre** vonatkozó, publikált mikroműanyag mérési eredmények, így javasolható ezek pótlása. A talajok esetében a szakirodalmi ismertetőik alapján indokolt lehet a mezőgazdasági elhelyezésre szánt szennyvíziszapokban, a szennyvizekben, a biogázelőállítás maradékanyagaiban is a mikroműanyag koncentrációk vizsgálata.

Magyarországon természetvédelmi területen még nem történt mikroműanyag szám becslés, dolgozatomban először számolok be a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer vonatkozásában ilyen eredményekről. Megjegyzendő, hogy ezek az adatok csak egy pillanatnyi, vagyis térben és időben diszkrét, egyedi állapotra, helyzetre vonatkoznak, vagyis csak indikatív, tájékoztató jellegűek. Így javasolható, hogy a KBVR területén is célszerű lenne további helyszíneken és időpontokban méréseket végezni, illetve ezeket a felméréseket más természetvédelmi területekre is kiterjeszteni. Ugyanakkor a víztestekre jellemzőbb információk elérése érdekében ajánlatos lenne egy adott időszakon belül „periodikus, avagy dinamikus átlagmintát” gyűjteni: pl. 12 vagy 24 órás időszakon belül a szivattyút óránként 5-10 percre bekapcsolva ugyanazon a szűrő kaszkádon megkötni a mikroműanyagokat. Ezek a mintavételezések elvégezhetőek lehetnek a víztestre telepített, a főbb általános vízkémiai paramétereket folyamatosan rögzítő automata mérőállomásokkal kombinálva is.

Ugyanakkor a mintákból a mikroműanyagok számának meghatározásakor felmerült, hogy néhány esetben a szűrőlapokon megmaradó, nyálkás szerves anyag mátrix akadályozhatta a részecskék főkomponensek szerinti azonosítását, számlálását. Ennek a kiküszöbölésére célszerű lehet a mintaelőkészítésben nagyobb szerepet szánni a megnövelt hatóanyagú és/vagy ismételt oxidációs műveletek mellett pl. a zsír-, fehérje-, szénhidrát-, keményítő-, cullulózbontó enzimes kezeléseknek is. Az ilyen kezelések szükségességének az előrejelzéséhez támpontként célszerű lehet összefüggést keresni pl. a vizsgált felszíni víz KOI, BOI, TOC, öLa (összes lebegőanyag) tartalma és a nyálkaképződés előfordulása között. Az időbeli átlagmintagyűjtés és a mintákban zavaró jelenlétű szerves anyagok tökéletesebb lebontása növelhetné a meghatározott mikroműanyag számok és anyagi minőségek környezeti relevanciáját.

Két mintát kivéve (**kiko** és **z27**), a KBVR területén és a környezetében, a felszíni vizekben meghatározott viszonylag alacsony mikroműanyag koncentrációk (4-18,5 db/m³) nagyságrendileg összhangban vannak a hazai és az európai adatokkal, viszont megnyugtatóan, messze elmaradnak pl. a kínai eredményektől (19.860- 582.000 db/m³). Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a mikroműanyag eredmények összehasonlítása nemzetközi szinten rendkívül sok bizonytalanságot tartalmaz, mert a szerzők más és más mintavételi, mintaelőkészítési, szám- és anyagmeghatározási módszerekkel dolgoznak. A Wessling Hungary (Eurofins) Kft szakemberei által alkalmazott egységes mérési rendszer megkönnyíti a hazai adatok összehasonlítását, ugyanakkor sokat remélnék a munkatársaik révén folyamatosan fejlesztett pirolízis gázkromatográfia-tömegspektrometria (Py-GC-MS) módszerétől, amely lehetőséget biztosíthat a mikroműanyagok mennyiségi meghatározásának a további pontosítására.

A **kiko** és a **z27** jelű vízmintákban kimutatott – a többi eredményhez képest 1-2 nagyságrenddel magasabb (152,9 db/m³, illetve 195,9 db/m³) – mikroműanyag koncentrációk okát keresve egyelőre csak feltételezéseink lehetnek.

A Kiskomáromi-csatorna (**kiko** minta) vonatkozásában felmerül, hogy a mintavételi ponthoz közel lévő zalakomári és csapi szennyvíztisztítók, illetve a galamboki tisztított szennyvizek gyakorolnak hatást a vízminőségre, ugyanakkor a mért mikroműanyag szám tovább fokozódhat a Kiskomáromi-csatornán a KBVR felé, mivel csak a mintavételi pont után érkezik a Bányavölgyi-patakon keresztül a zalakarosi (termál)fürdők és szállodák tisztított szennyvize a Kiskomáromi-csatornába. Fentiek tisztázása miatt érdemes ezeken a helyszíneken további ellenőrző, feltáró vizsgálatokat folytatni.

A **z27** jelzésű minta a KBVR II. ütemét lezáró zsilip és a Balaton közötti Zala folyó víztestből származik. A mintavétel időszaka előtt és alatt a zsilip le volt zárva, vagyis a KBVR felől csak a hallépcsőn átjutó folyóvíz érkezett a mintavételi pontra. Így szinte kizárható, hogy a mikroműanyagok magas koncentrációját a Zala folyó Balatonba torkollása előtti szakaszán a KBVR felől érkező részecskék okozták volna. Az azonban aggodalomra ad okot, hogy a Zala folyónak ezen a Balatonig tartó, kb. 800 méteres, a vizsgált időszakban pangó szakaszán honnan származhat a kimutatott mikroműanyag mennyiség, illetve ez mennyire befolyásolhatja a Keszthelyi-öböl, a Balaton vízminőségét. Sajnos ezekre a felvetésekre a jelenlegi ismereteink szerint nem tudunk megnyugtató választ adni, ezért további vizsgálatok javasolhatók a KBVR II. ütem záró zsilipje felett, a **z17** mintavételi pontban, a Zala folyó torkolatában és a Keszthelyi-öbölben. Ezeknél a vizsgálatoknál célszerű figyelembe venni az M76-os autópálya esetleges mikroműanyag terhelő hatását is. A közút közvetlenül a **z17** mintavételi pont felett halad.

A vizsgálatok során megerősítésre került az a szakirodalmi felfogás, hogy szennyvíztisztítók jelentős hatást tudnak gyakorolni a tisztított szennyvizet befogadó felszíni vizek mikroműanyag koncentrációjára. Ez visszaigazolódott abban, hogy a zalaegerszegi szennyvíztisztító a Zala folyó felvízi (**ZEG-F**) szakaszán mért mikroműanyag számot ($25,4 \text{ db/m}^3$) több mint a kétszeresére növelte az alvízi szakaszon (**ZEG-A**: $68,3 \text{ db/m}^3$). Ugyanakkor az is megállapítható, hogy annak ellenére, hogy Zalaegerszeg és Zalaapáti között több szennyvíztisztító is a Zala folyóba továbbítja a tisztított szennyvizet a zalaapáti mintavételi pontban (**z15**) mindössze $1,5 \text{ db/m}^3$ mikroműanyag részecskét lehetett kimutatni. Ezek az adatok felvetik a KBVR területén és környezetében is az üledékek mikroműanyag vizsgálatának a jövőbeli fontosságát.

A felszíni vizekben jelenlévő mikroműanyagok polimerek szerinti megoszlása követi a hazai és a nemzetközi kimutatási trendeket, a leggyakrabban és a legnagyobb részarányban a polietilén és a polipropilén részecskék fordultak elő a mintákban. Ezt követték előfordulási gyakoriságban a (polisztirol)alkid, a polisztirol, a poliészter, a poliamid és a cellulóz-acetát. A PVC-t csak a zalaegerszegi tisztított szennyvízben lehetett kimutatni. A zalaegerszegi felvízi mintavételi pontot (**ZEG-F**) – a terepi megközelíthetőségi és a vízkeveredési viszonyok ismeretében - érdemes lenne közelebb vinni a tisztított szennyvíz bevezetési pontjához, ezt támasztja alá, hogy pl. a (polisztirol)alkid részecskék száma anélkül növekedett majdnem duplájára a **ZEG-F** és **ZEG-A** pontok között, hogy az elfolyó tisztított szennyvízből ezt az anyagot nem lehetett kimutatni.

6 Összefoglalás

A globális műanyag gyártás az 1950-es évek óta emelkedő tendenciát mutat, aminek következtében a természetben előforduló mikroműanyagok mennyisége is folyamatosan nő. Dolgozatomban összefoglalóan áttekintettem a mikroműanyagok környezeti előfordulásával foglalkozó szakirodalmat és a Wessling Hungary (Eurofins) Kft munkatársaihoz csatlakozva indikatív mikroműanyag szám méréseket végeztem a Zala-folyón és Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer területén, illetve annak környezetében.

A szakirodalmi adatokból kiderült, hogy a mezőgazdaság esetében Magyarországon teljes mértékben hiányoznak a talajokra és az öntözővizekre vonatkozó, publikált mikroműanyag mérési eredmények, így ezek pótlására további kutatások indokoltak, de szükség van a mezőgazdasági területeken elhelyezni kívánt szennyvíziszapokban és szennyvizekben is a mikroműanyag koncentrációk felderítése a tápláléklánc védelme érdekében.

2022 nyarán a Wessling Hungary (Eurofins) Kft. munkatársai által kidolgozott, kaszkád rendszerű szivattyús mintavételezési technikát, sűrűség szerinti szétválasztást, oxidációs szerves anyag eltávolítást és siMPle szoftver által támogatott FTIR mikroszkópos azonosítást alkalmazva, 10 mintavételi helyről származó vízmintából meghatároztuk az 50 µm és 1 mm közötti méretű mikroműanyagok koncentrációját.

A kimutatott mikroműanyag koncentrációk (4-18,5 db/m³) nagyságrendileg összhangban vannak a hazai és az európai adatokkal, kivéve a Kiskomáromi-csatornát és a Zala folyó torkolati szakaszát, ahol magasabb értékeket mértünk. A mintákban a leggyakrabban és a legnagyobb részarányban a polietilén és a polipropilén részecskék fordultak elő, melyek szintén követik a hazai és a nemzetközi kimutatási trendeket.

Magyarországon természetvédelmi területen még nem történt mikroműanyag szám becslés, dolgozatomban először számolok be a Kis-Balaton Vízvédelmi Rendszer vonatkozásában ilyen eredményekről. Ugyanakkor ezek az adatok csak pillanatnyi állapotra vonatkoznak, vagyis csak tájékoztató jellegűek. Célszerű lenne a KBVR további területein, illetve más természetvédelmi területeken is mikroműanyag szám meghatározásokat végezni.

A zalaegerszegi szennyvíztisztítóval kapcsolatos vizsgálataink során megerősítésre került az a szakirodalmi álláspont, hogy a szennyvíztisztítók jelentős hatást képesek gyakorolni a tisztított szennyvizeket befogadó felszíni vizek mikroműanyag koncentrációjára.

7 Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Szoboszlay Sándornak a szakdolgozatom készítése során nyújtott segítségét. Köszönöm a szakdolgozatom ideje alatt kapott tanácsokat, építő jellegű kritikákat és hogy a felmerült problémák során bármikor rendelkezésemre állt. Hálás vagyok, hogy segítségével betekintést nyerhettem a Wessling Hungary (Eurofins) Kft. mikroműanyagokkal kapcsolatos kutatásaiba és megismerhettem a mikroműanyagok mintavételezésének módszertanát.

Másodsorban szeretném megköszönni a Wessling Hungary (Eurofins) Kft.-nek és a Wessling Hungary (Eurofins) Kft. munkatársainak Prikler Bencének és Dr. Bordós Gábornak a támogatását, munkáját, akik nélkül a mikroműanyag mintavételek és mérési eredmények nem jöhettek volna létre.

Munkámat az Innovációs és Technológiai Minisztérium Tématerületi Kiválósági Program 2020, Nemzeti Kihívások Alprogram (TKP2020-NKA-16) és a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00239 számú kutatási projektek támogatásával végeztem.

8 Irodalomjegyzék

- Albert A. Koelmans, Ellen Besseling, Edwin Foekema, Merel Kooi, Svenja Mintenig, Bernadette C. Ossendorp, Paula E. Redondo-Hasselerharm, Anja Verschoor, Annemarie P. van Wezel, and Marten Scheffer (2107) *Environmental Science & Technology* 51 (20), 11513-11519 DOI: 10.1021/acs.est.7b02219
- Alfonso, M., B., Facundo Scordo, Carina Seitz, Gian Marco Mavo Manstretta, Ana Carolina Ronda, Andrés Hugo Arias, Juan Pablo Tomba, Leonel Ignacio Silva, Gerardo Miguel Eduardo Perillo, María Cintia Piccolo (2020): First evidence of microplastics in nine lakes across Patagonia (South America), *Science of The Total Environment*, Volume 733, 2020, 139385, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139385>.
- Allasino, M. L., Marrero, H. J., Dorado, J., Torretta, J. P. (2019): Scientific note: first global report of a bee nest built only with plastic, *Apidologie*, 50, 230–233, <https://doi.org/10.1007/s13592-019-00635-6>
- Awet, T.T., Kohl, Y., Meier, F., Straskraba, S., Grün, A.L., Ruf, T., Jost, C., Drexel, R., Tunc, E., Emmerling, C. (2018): Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environmental Sciences Europe* 30, 11. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6>.
- Bandmann V, Müller JD, Köhler T, Homann U. (2012) Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters*, 586:3626–3632
- Blasing M, Amelung W. (2018): Plastics in soil: analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment* 612: 422–435
- Bordós G., Reiber, J., (2016): Mikroműanyagok a környezetben és a táplálékláncban. *Élelmiszervizsgáló közlemények* 62(2): 1021-1046.
- Bordós Gábor (2021): Mikroműanyagok környezeti előfordulásának vizsgálata. PhD értekezés. Gödöllő, Környezettudományi Doktori Iskola, p. 114.
- Bordós, G., Urbányi, B., Micsinai, A., Kriszt, B., Palotai, Z., Szabó, I., Hantosi, Z., Szoboszlai, S. (2019): Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe. *Chemosphere*, 216, 110–116. p. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.10.110>
- Bordós, Gábor, Szilveszter Gergely, Judit Háhn, Zoltán Palotai, Éva Szabó, Gabriella Besenyő, András Salgó, Péter Harkai, Balázs Kriszt, Sándor Szoboszlai (2020): Validation of

- pressurized fractionated filtration microplastic sampling in controlled test environment, *Water Research*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.11657>
- Buteler, Micaela, Andrea Marina Alma, Teodoro Stadler, Ariane Carnebia Gingold, María Celeste Manattini, Mariana Lozada (2022): Acute toxicity of microplastic fibers to honeybees and effects on foraging behavior, *Science of The Total Environment*, Volume 822, 2022, 153320, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153320>.
- Chae, Y., Kim, D., Kim, S. W., and An, Y.-J. (2018): Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain, *Scientific Reports*, 8, 284, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18849-y>
- Chen, Y., Liu, X., Leng, Y., and Wang, J. (2020): Defense responses in earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to low-density polyethylene microplastics in soils, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 187, 109788, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109788>
- de Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J.B., Faltin, E., Becker, R., Gorlich, A.S., Rillig, M.C. (2019): Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53, 10, 6044–6052
- Di, M., & J. Wang (2018): Microplastics in surface waters and sediments of the three Gorges reservoir, *China Science of The Total Environment*, Volumes 616–617, 1620-1627, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.150>.
- Dissanayake, Pavani Dulanja; Soobin Kim, Binoy Sarkar, Patryk Oleszczuk, Mee Kyung Sang, Md Niamul Haque, Jea Hyung Ahn, Michael S. Bank, Yong Sik Ok (2022): Effects of microplastics on the terrestrial environment: A critical review. *Environmental Research*, Volume 209, 112734, doi.org/10.1016/j.envres.2022.112734.
- Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande C, Tassin B. (2016): Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104:290–293
- Driscoll, S.C., Glassic, H.C., Guy, Ch., S., Koel, T.M. (2021): Presence of Microplastics in the Food Web of the Largest High-Elevation Lake in North America. *Water*, 13(3), 264; <https://doi.org/10.3390/w13030264>
- Eriksen, M., S. Mason, S. Wilson, C. Box, A. Zellers, W. Edwards, H. Farley, S. Amato (2013): Microplastic pollutants in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*, 77 (1–2) (2013), pp. 177-182, [10.1016/j.marpolbul.2013.10.007](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007)
- Free, Ch., M., Olaf P. Jensen, Sherri A. Mason, Marcus Eriksen, Nicholas J. Williamson, Bazartseren, Boldgiv (2014): High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 85, Issue 1, 156-163, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>.

- Galloway T., Cole, M. & Lewis, C. (2017): Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology Evolution* 1, 0116 <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- GESAMP (2019): Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP No. 99, 130p
- Han, M., X. Niu, M. Tang, B.T. Zhang, G. Wang, W. Yue, X. Kong, J. Zhu (2020): Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary, *Science of the Total Environment*, 707 (2020), p. 135601, [10.1016/j.scitotenv.2019.135601](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135601)
- Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., Duflos, G., (2017): Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. *Chemosphere*, 182: 781-793.
- Holter, P. & Scholtz, C. (2005): Are ball-rolling (Scarabaeini, Gymnopleurini, Sisyphini) and tunnelling scarabaeine dung beetles equally choosy about the size of ingested dung particles?, *Ecological Entomology*, 30, 700–705, <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2005.00746.x>,
- Huerta Lwanga, E., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., and Garbeva, P. (2018): Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration, *Science of the Total Environment*, 624, 753–757, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>
- Huerta-Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salanki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V. (2017): Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 220:523–531. in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science* 8: 1805.
- Izsák Bálint & Vargha Márta (2020): Mikroműanyag az ivóvízben. *Egészségtudomány/ Health Science* 2020. 1-2. 105-125. DOI: <https://doi.org/10.29179/EgTud.2020.1-2.105-125>, <http://egeszsegtudomany.higienikus.hu/cikk/2020-1-2/EgTud.2020.1-2.105.pdf>
- Järnskog, Ida, Ann-Margret Strömvall, Kerstin Magnusson, Helén Galfi, Karin Björklund, Maria Polukarova, Rita Garção, Anna Markiewicz, Maria Aronsson, Mats Gustafsson, Malin Norin, Lena Blom, Yvonne Andersson-Sköld (2021): Traffic-related microplastic particles, metals, and organic pollutants in an urban area under reconstruction, *Science of The Total Environment*, 774, 145503, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145503>.
- Jianxin Fan, Lan Zou, Ting Duan, Liang Qin, Zenglin Qi, Jiaoxia Sun (2022): Occurrence and distribution of microplastics in surface water and sediments in China's inland water systems: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, Volume 331, 2022, 129968,

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129968>.

- Jin, Y., Lu, L., Tu, W., Luo, T., and Fu, Z. (2019): Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of the Total Environment*, 649, 308–317, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>,
- Kieran D. Cox, Garth A. Covernton, Hailey L. Davies, John F. Dower, Francis Juanes, and Sarah E. Dudas (2019): Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (12), 7068-7074 DOI: 10.1021/acs.est.9b01517
- Kleinteich J, Seidensticker S, Marggrander N, Zarfl C. (2018): Microplastics reduce short-term effects of environmental contaminants. Part II: polyethylene particles decrease the effect of polycyclic aromatic hydrocarbons on microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15: 1–16.
- Kosuth, M., Mason, S.A. and Wattenberg, E.V. (2018): Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *Plos One*, 2018; 13(4): e0194970
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Li L, Zhou Q, Yin N, Tu C, Luo Y (2019): Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant. *Chinese Science Bulletin*, 64:928–934.
<https://www.sciengine.com/CSB/doi/10.1360/N972018-00845>
- Li, L., Y. Luo, W.J.G.M. Peijnenburg, R. Li, J. Yang, Q. Zhou (202) Confocal measurement of microplastics uptake by plants. *MethodsX*, 7 (2020), Article 100750, 10.1016/j.mex.2019.11.023
- Liu, Fan, Kristina Borg Olesen, Amelia Reimer Borregaard, Jes Vollertsen (2019): Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds, *Science of The Total Environment*, 671, 992-1000, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.416>.
- Liebezeit, Gerd & Elisabeth Liebezeit (2015): Origin of Synthetic Particles in Honeys 2015, *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. Vol. 65, No. 2, pp. 143–147 DOI: 10.1515/pjfn-2015-0025, <http://journal.pan.olsztyn.pl/pdf-98419-31184?filename=Origin%20of%20Synthetic.pdf>
- Machado AAS, Lau CW, Till J, Kloas W, Lehmann A, Becker R, Rillig MC. (2018): Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology* 52: 9656–9665.
- Machado AAS, Chung W. Lau, Werner Kloas Joana Bergmann, Julien B. Bachelier, Erik Faltin, Roland Becker, Anna S. Görlich and Matthias C. Rillig (2019): Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental Science & Technology* 2019 53 (10), 6044-6052. DOI: 10.1021/acs.est.9b01339

- Mári Á, Bordós G, Gergely S, Büki M, Háhn J, Palotai Z, Besenyő G, Szabó É, Salgó A, Kriszt B, Szoboszlay S. (2021): Validation of microplastic sample preparation method for freshwater samples. *Water Reserch*, 2021 Sep 1;202:117409. doi: 10.1016/j.watres.2021.117409.
- Mintenig S, Int-Veen I, Löder MG, 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
- Miskolczi Norbert (2012): *Műanyagok kémiája és technológiája*. Egyetemi jegyzet. Pannon Egyetem, p. 87.
- Nanna B. Hartmann, Thorsten Hüffer, Richard C. Thompson, Martin Hassellöv, Anja Verschoor, Anders E. Daugaard, Sinja Rist, Therese Karlsson, Nicole Brennholt, Matthew Cole, Maria P. Herrling, Maren C. Hess, Natalia P. Ivleva, Amy L. Lusher, and Martin Wagner (2019): Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris? *Environmental Science & Technology* 53 (3), 1039-1047 DOI: 10.1021/acs.est.8b05297
- Nizzetto, L., Futter, M., and Langaas, S. (2016): Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50, 10777–10779, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>,
- Osorio E.D., Tanchuling M.A.N. and Diola M.B.L.D. (2021): Microplastics Occurrence in Surface Waters and Sediments in Five River Mouths of Manila Bay. *Frontiers in Environmental Science*, 9:719274. doi: 10.3389/fenvs.2021.719274
- Pérez-Guevara, Fermin, Priyadarsi D. Roy, Gurusamy Kuttralam-Muniasamy, V.C. Shruti (2021): A central role for fecal matter in the transport of microplastics: An updated analysis of new findings and persisting questions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, Volume 4, 2021, 100021, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100021>.
- Piehl, S., Leibner, A., Löder, M.G.J., Dris, R., Bogner, Ch., Lafrosch, Ch. (2018): Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 8, 17950 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>
- Rehse S, Kloas W, Zarfl C. (2018): Microplastics reduce short-term effects of environmental contaminants. Part I: effects of Bisphenol A on freshwater zooplankton are lower in presence of polyamide particles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15: 1–15
- Rillig MC, Ingrassia R, Machado AA. (2017a): Microplastic incorporation into soil in Agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 2017 Oct 18;8:1805. doi: 10.3389/fpls.2017.01805.

- Rillig MC, Ziersch L, Hempel S. (2017b): Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 7: 1362.
- Rillig MC. (2012): Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology*, 46: 6453–6454.
- Rillig MC. (2018): Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environmental Science & Technology*, 52: 6079–6080.
- Rillig, M.C., Lehmann, A., de Souza Machado, A.A., Yang, G. (2019): Microplastic effects on plants. *New Phytologist* 223 (3), 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>.
- Science of the Total Environment, 616–617 (2018), pp. 1620-1627, [10.1016/j.scitotenv.2017.10.150](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.150)
- Stock, V., Böhmert, L., Lisicki, E., Block, R., Cara-Carmona, J., Pack, L. K., Selb, R., Lichtenstein, D., Voss, L., Henderson, C. J., Zabinsky, E., Sieg, H., Braeuning, A., and Lampen, A. (2019): Uptake and effects of orally ingested polystyrene microplastic particles in vitro and in vivo, *Archives of Toxicology*, 93, 1817–1833, <https://doi.org/10.1007/s00204-019-02478-7>.
- TetraTech (2021): Uniform Size Classification and Concentration Unit Terminology for Broad Application in the Chesapeake Bay Watershed, US, EPA, # EP-C-17-031, p.21. Volume 331, 1-13 2022,129968, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129968>.
- Wan Y, Wu C, CXue Q, Hui X. (2019): Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment* 654: 576–582.
- Weithmann N, Möller JN, Löder MG, Piehl S, Laforsch C, Freitag R (2018:) Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances* 4 Apr 2018, Vol 4, Issue 4 [DOI: 10.1126/sciadv.aap8060](https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8060)
- Xu, Jiaping, Wanjuan Bi, Liting Hua, Zhipeng Cheng, Yu Wang, Dandan Li, Weitao Liu, Lei Wang, Hongwen Sun (2022): Wide occurrence of seven phthalate plasticizers and two typical microplastics in pig feed, *Chemosphere*, Volume 307, Part 2, 2022, 135847, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135847>.
- Yu L, Zhang J, Liu Y, Chen L, Tao S, Liu W. (2021): Distribution characteristics of microplastics in agricultural soils from the largest vegetable production base in China. *Science of the Total Environment*, 2021 Feb 20; 756:143860. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143860.
- Yang, Li, Jie Gao, Ying Liu, Guoqiang Zhuang, Xiawei Peng, Wei-Min Wu, Xuliang Zhuang (2021): Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence, *Chemosphere*, 262, 127818,

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127818>.

Zhang, G.S.; Liu, Y.F. (2018): The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12–20

Zhu F, Zhu C, Wang C, Gu C. (2019): Occurrence and Ecological Impacts of Microplastics in Soil Systems: A Review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 2019 Jun;102(6):741-749. doi: 10.1007/s00128-019-02623-z.

Zhu, D., Bi, Q.-F., Xiang, Q., Chen, Q.-L., Christie, P., Ke, X., Wu, L.-H., and Zhu, Y.-G. (2018): Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida*, *Environmental Pollution*, 235, 150–154, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.058>,

Internetes források

(http1) <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>

(http2) <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>

(http3) https://www.innoteka.hu/cikk/mikro_szennye_zok_hatasa_a_felszini_vizekben.2145.html

(http4) <https://laboratorium.hu/mikromuanyagok-a-szennyvizekben.html>

(http5) <https://mikromuanyag.hu/Mi-az-a-mikrom%C5%B1anyag>

(http6) https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/111126/7/Conesa_Iniguez_2020_Analysis-of-Microplastics-in-Food-Samples_preprint.pdf

(http7) <https://www.wired.com/story/plastic-rain-is-the-new-acid-rain/>

(http8) <https://assets.researchsquare.com/files/rs-257514/v1/94164295-6535-4d59-92c8-8c3357b1c82f.pdf?c=1631877588>

(http9) <https://tudatosvasarlo.hu/mennyi-mikromuanyag-van-a-csapvizben/>

(http10) <https://www.kfki.hu/~kocsonya/tura/Kis-Balaton/>

(http11) <https://core.ac.uk/download/pdf/154253205.pdf>

(http12) <https://jegyzo.hu/a-kis-balaton-vizvedelmi-rendszer-20094/>

(http13) https://physgeo.core.hu/mtafki/konyvtar/kiadv/FE2006/FE20061-2_37-51.pdf

(http14) <https://www.kisbalaton.hu/index.php/hu/a-vizvedelmi-rendszer-mukodese>

(http 15) <https://www.mezogazdasagikonyvtar.hu/assets/Hirvilag/AH2010/3/kisbalaton.htm>

- (http16) https://hidrologia.hu/vandorgyules/37/word/1405_mehes_nikoletta.pdf
- (http17) <https://ovf.hu/hu/esemenyek-2/kis-balaton-vizvedelmi-rendszer-2-utem-megvalositasa>
- (http18) <https://archivum.zalamedia.hu/khely/0302/kr.html>
- (http19) <https://www.zala.hu/Products/117/45/Kis-Balaton>
- (http20) https://real.mtak.hu/65990/1/EcoBalaton_2016_BOROS_etal.pdf
- (http21) <https://www.zalaviz.hu/index.php/rolunk/szennyviz-elvezetes>
- (http22) <https://simple-plastics.eu/>

KONZULTÁCIÓS NYILATKOZAT

BANGA TOMÁS (hallgató Neptun azonosítója: **G39P7T**) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfólió¹ áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom².

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*3}

Gödöllő, 2022. november 07.



Belső konzulens
Dr. Szoboszlay Sándor
egyetemi docens

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

³ A megfelelő aláhúzendő.

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréseiről és eredetiségéről

A hallgató neve: Banga Tomás
A Hallgató Neptun kódja: G39P71
A dolgozat címe: Mikroműanyagok környezeti hatásai
A megjelenés éve: 2022
A konzulens tanszék neve: Akvakultúra és Környezetbiztonsági Intézet Környezetbiztonsági Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe.

Kelt: 2022 év 11 hó 07 nap


Hallgató aláírása