

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Földtudományok Doktori Iskola
Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék

**A MIKROMŰANYAG SZENNYEZÉS TÉR- ÉS IDŐBELI DINAMIKÁJÁNAK
ELEMZÉSE A TISZA VIZÉBEN ÉS ÜLEDÉKÉBEN**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

BALLA ALEXIA

Témavezetők:
Dr. Kiss Tímea (DSc, PhD),
független kutató
Dr. Blanka-Végi Viktória (PhD),
tudományos munkatárs

**Szeged
2025**

1. Előzmények, célkitűzések

A mikroműanyagok, vagyis az 5 mm-nél kisebb műanyag szemcsék, globális környezeti problémát jelentenek, mivel ma már a Földön mindenhol megtalálhatóak és jelentős negatív hatást gyakorolnak a környezetre. A mikroműanyag szennyezés már nem csupán a városi környezet problémája, hanem lakott területektől távol is kimutatható. Eredetük szerint elsődleges és másodlagos mikroműanyagokra oszthatóak; előbbieket tudatosan mikroméretűre gyártják, míg utóbbiak makro- és mezoműanyagok aprózódásával keletkeznek.

A folyók a mikroműanyag szennyezések egyik legfőbb elnyelői és továbbítói, így a bennük található mikroműanyag koncentrációja jelentősen függ az emberi tevékenységtől. A folyókba jutó mikroműanyagok egyik fő forrása a szennyvíz, amely vagy kezeletlenül kerülhet a vizekbe, de még ha megtisztítják, akkor is jutnak mikroműanyagok a kifolyó vízbe az alkalmazott technológia hatékonyságától függően (Gere et al. 2024). A másik fő forrás a hulladéklerakókból és illegálisan elhelyezett hulladékokból származó szennyezés. Ezek mellett a mezőgazdasági területek, az ipari kibocsátás, az utak, építkezések és a turizmus is hozzájárul a folyók mikroműanyag terheléséhez. A természetes hordaléknál kisebb sűrűségű mikroműanyagok nagyobb mobilitással rendelkeznek (Waldschlager és Schüttrumpf 2019), ezért hosszan képesek a folyórendszerben mozogni, majd az áramlási sebességtől függően – de a hordalékoktól kissé eltérő körülmények között – rakódnak le a mederfenékre vagy az ártérre.

A mikroműanyag szennyezettség, mint környezeti probléma Magyarországon is jelen van. A Duna, a Tisza és mellékfolyóik a szennyezések fő hordozóközegei. Magyarországi vizsgálatok kimutatták, hogy a felszíni vizekben és az ártéri üledékekben is jelentős mennyiségű mikroműanyag található (Fórián és Kiss 2022). A Balatonban és a Tisza-tóban kimutatott mikroműanyag szennyeződés fő forrásaiként a turizmust, a közlekedést és a szennyvízkibocsátást jelölték meg (Bordós et al. 2019; Svigruha et al. 2023). A Szegedi Tudományegyetem kutatói a Tiszán 2019 óta végeznek mikroműanyag vizsgálatokat, amelyek kimutatták, hogy a folyó jelentős mértékben szennyezett. Az ártéri üledékekből vett minták azt mutatják, hogy a szennyezés még az 1960-as évekre is visszavezethető (Fórián és Kiss 2022). A folyórendszerben tapasztalható mikroműanyag mobilitása jelentős, ami évről-évre változó szennyezési mintákat eredményez.

A kutatás fő célkitűzése annak vizsgálata, hogy a Tisza vizében és hordalékában hogyan alakul a mikroműanyag szennyezés mértéke több év távlatában, és milyen környezeti tényezők befolyásolják a szennyezés

mértékét. A vizsgálatokat a Tisza teljes hosszán, illetve a főbb mellékfolyók torkolat-közelében szakaszain végeztem el.

A PhD dolgozatomban az alábbi részletes célokat tűztem ki:

A frissen lerakódott üledék mikroműanyag tartalmának időbeli változásai

- Hogyan változik a Tiszán folyásirányban és főbb mellékfolyói üledékében a mikroműanyag tartalom? A Tisza szakaszain különbözik-e a szennyezettség?
- Hogyan változik a mikroműanyag lerakódás időbeli mintázata az üledékében négy éven át ismételt mérés-sorozat alapján?
- Hol vannak olyan pontok, amelyek szennyezési gócpontnak tekinthetők? Ezek esetlegesen kiürülhetnek-e és újra formálódhatnak-e? Mely szakaszon a legváltozékonyabbak ezek a pontok?

A vízben lebegtetve szállítódó mikroműanyag tér- és időbeli változásai

- Hogyan változik a Tisza és főbb mellékfolyói vízében a mikroműanyag tartalom? Milyen különbségek vannak az egyes szakaszok mikroműanyag szállításában?
- Hogyan változott három év alatt az egyes mintavételi helyek és szakaszok vízének mikroműanyag szennyezettsége?
- Hogyan befolyásolják a mellékfolyók a Tisza vízének mikroműanyag szennyezettségét? Melyik mellékfolyó szállítja a legtöbb mikroműanyagot?

A mikroműanyagok eloszlását befolyásoló környezeti tényezők

- Van-e kapcsolat az üledékminták szemcseösszetétele és a leülepedett mikroműanyag mennyisége között? Milyen szemcseösszetételű üledékek mutatják a legnagyobb változatosságot? Milyen szemcseösszetételű anyagot lenne érdemes alkalmazni egy későbbi monitoring vizsgálat során?
- Az egyes folyóvízi formák anyagában hogyan változik a mikroműanyag tartalom? A különböző geomorfológiai helyzetekben az eltérő folyamatok hogyan hatnak a lerakódó szennyezésre? Mely formákon érdemes az esetleges későbbi monitoring vizsgálatokat megtervezni?
- Hogyan befolyásolja az üledék és a víz mikroműanyag tartalmát a mintavételezést megelőző hidrológiai helyzet?
- Van-e kapcsolat a lebegtetve szállított hordaléktartalom és a mikroműanyag tartalom között?
- Hogyan befolyásolják a mellékfolyók a tiszai üledék mikroműanyag szennyezettségét? Mely mellékfolyók a leginkább szennyezettek mikroműanyaggal?
- Hogyan befolyásolják a tiszai duzzasztók és a visszaduzzasztott tér az üledék és a víz mikroműanyag tartalmát?

A kutatásom alaphipotézise szerint jelentős lehet a mikroműanyag szennyezés a Tisza vízrendszerében, mivel a szennyvíztisztítás vagy hiányzik vagy nem megfelelő mértékű a vízgyűjtő egyes területein. Feltételeztem, hogy a lebegtetve szállított mikroműanyagok nagy része szál, amelyek valószínűsíthetően szintetikus textilek mosásából származhatnak. Úgy véltem, hogy lehet kapcsolat az üledék szemcsemérete és mikroműanyag tartalma között, mivel a lebegtetett hordalékhoz hasonló módon szállítódnak a mikroműanyagok is. Feltételeztem, hogy azok a becsatlakozó mellékfolyók, amelyek vízgyűjtőjén a szennyvíztisztítás jobb helyzetben van (pl. Zagyva), a tisztább vízszállítás miatt hígítják a főfolyó alap szennyezettségét. Ugyanakkor más, hagyományosan egyéb anyagokkal is szennyezett mellékfolyók (pl. Sajó, Szamos–Kraszna) kapcsán azt feltételeztem, hogy ha relatíve magasabb szennyezettségűk, akkor a Tisza szennyezettségét tovább növelik a torkolat alatti szakaszon. Mivel a Tisza vízjárását, vízsebességét és hordalékszállítását is befolyásolják a duzzasztók (Tiszalök, Kisköre és Törökbecse), ezért feltételeztem, hogy ezek elősegítik a mikroműanyag szemcsék leülepedését, hasonlóan a lebegtetve szállított hordalékhoz. Továbbá, azt is feltételeztem, hogy a gátak alatt a megnövekedett munkavégző képesség és tisztavíz erózió miatt a folyó mobilizálhatja a jóval régebbi és mikroműanyag mentes fenékküledéket, így a duzzasztók alatti szakaszon koncentrációjuk csökken.

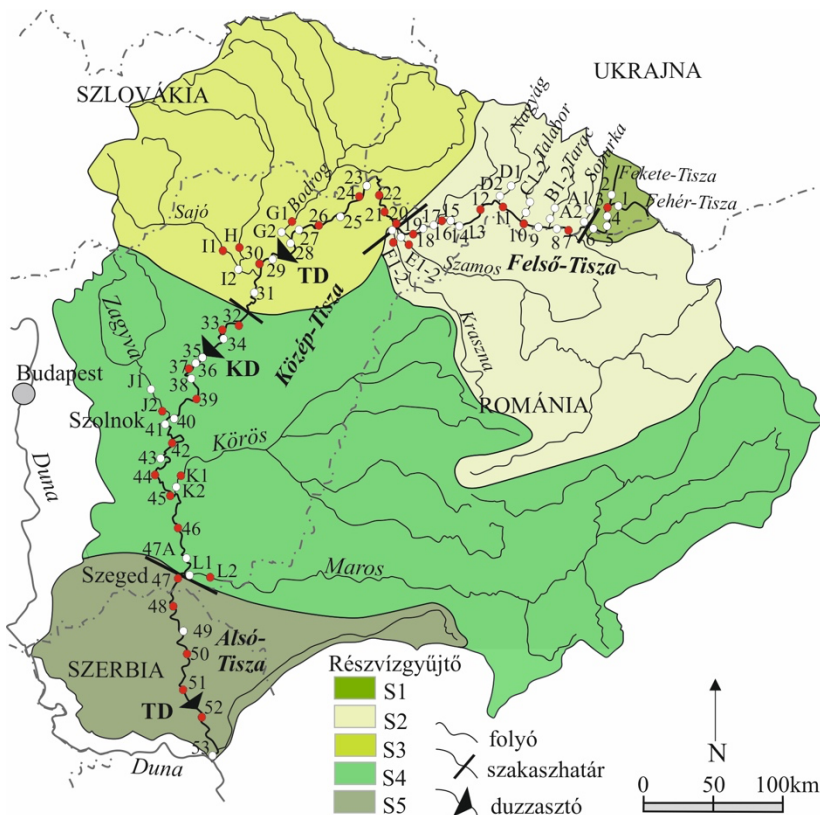
2. Mintaterület

Vizsgálataimat a Tisza forrásvidékétől a torkolatáig végeztem (1. ábra) (hossz: 946 km; vízgyűjtő terület: 157.200 km²; Lászlóffy 1982). A vízgyűjtőn öt ország, Ukrajna (8,1%), Szlovákia (9,7%), Románia (46,2%), Magyarország (29,4%) és Szerbia (6,6%) osztozik, amelyek eltérő természetföldrajzi jellemzőkkel, valamint hulladék- és szennyvízkezelési gyakorlattal rendelkeznek (Kiss et al. 2021).

A Tisza éves vízjárása és vízhozama nagy változékonyságot mutat. Az árhullámok gyakran egybeesnek a mellékfolyók árhullámaival, ami visszaduzzasztást eredményez.

A Tisza teljes hossza klasszikusan három szakaszra (Felső-, Középső és Alsó-Tisza) osztható (Lászlóffy 1982), azonban az elemzés megkönnyítése miatt a Felső- és a Közép-Tiszát kettéosztottam, így összesen öt szakaszt (S1-S5) és a hozzájuk tartozó részvízgyűjtőket különítettem el a hidrológiai és geomorfológiai jellemzők alapján (1. ábra).

A Tisza hordalékszállítása folyásirányban növekszik (Lászlóffy 1982), de a tározóterek (Tiszalök, Kisköre, Törökbecse) jelentős üledécsapkaként funkcionálnak. A lebegtetett hordalék mennyisége erősen változó, az áradások előtt a legmagasabb. A mellékfolyók alapvetően meghatározzák a főfolyó víz- és hordalékhozamát.



1. ábra: A Tisza vízrendszere és a mintavételi pontok helyzete. A Tisza öt szakaszra osztható, vízjárását a Tiszalöki duzzasztó (TD), a Kiskörei duzzasztó (KD) és a Törökbencei duzzasztó (BD) befolyásolja. Fehér jelölő: üledékmintavételi pont; piros jelölő: üledék és vízmintavételi pont.

A vízrendszer műanyag szennyezésének fő forrása a szennyvíz és a nem megfelelően elhelyezett hulladék. A csatornázottság és szennyvíztisztítás elmaradottsága különösen Kárpátalján, Romániában és Szerbiában jelentős.

A kutatás során évente 53 üledékmintát gyűjtöttünk négy éven át (2020–2023), illetve évente 29 vízmintát három éven át (2021–2023). A vizsgálati pontokat a folyó mentén egyenletes távolságokban jelöltük ki, figyelembe véve a hidrológiai és geomorfológiai tényezőket, valamint a mellékfolyók hatását a főfolyóra.

3. Alkalmazott módszerek

A vizsgálat során üledék- és vízmintákat gyűjtöttünk a Tisza mentén a nyári kisvízes időszakokban. Az adatokat összevettem a mintavételi helyek főbb jellemzőivel (pl. üledék szemcseösszetétele, üledéktest típusa, szakaszok, mellékfolyók és duzzasztók hatása), illetve a mintavételt megelőző hidrológiai viszonyokkal.

Az üledékminták a formák középvonalaiból, a frissen lerakódott üledék felső 1 mm-es rétegből származtak. A mintagyűjtés során mindegyik formán egyaránt vettünk frissen lerakódott durvaszemű (homokos) és finomszemű (agyagos-iszapos) mintákat. Az üledékmintákat kiszáritottam (60 °C), majd a kimért (50 g) mintákból vizes szitálással eltávolítottam az iszap és agyagfrakciót (90 µm). A nagyobb szervesetlen szemcséket sűrűség alapján cink-klorid (1,8 g/cm³) segítségével különítettem el, majd a felülúszóból a szerves anyagokat hidrogén-peroxiddal (30%) távolítottam el. A mintákat üveg Petri-csészékbe mostam és 60 °C-on szárítottam.

A vízmintavétel során szivattyúval 1,0 m³ vizet szivattyúztunk ki a vízvonaltól 2 méterre, 10–20 cm mélységből. A víz szűrését fémszítákon (200–90 µm) át végeztük. A vízmintákat 30 ml hidrogén-peroxiddal (30%) kezeltem (24 h), majd a mintát Petri-csészébe mostam, és szárítottam (60 °C).

A feltárás közbeni szennyeződés elkerülése érdekében csak üveg- és fémeszközöket használtam, valamint természetes anyagból készült laborköpenyt viseltem. Minden lépés előtt és után lefedtem a mintákat. Minden harmadik mintához tartozott egy vakminta a háttérszennyezés kimutatása érdekében. A vakminták átlagosan 4±2 db/minta mikroműanyagot tartalmaztak, amely értéket kivontam az éppen feldolgozott minták mikroműanyag tartalmából.

Az üledékminták szemcseméretét száraz szitálással és Fritsch Analysette 22 MicroTecPlus lézeres szemcseméret elemző készülékkel határoztam meg majd kiszámítottam az átlagos szemcseméretet (d₅₀). Az első év adatai alapján a következő években csak az agyagos mintákkal dolgoztam tovább, mivel (1) ezekben a mikroműanyag tartalom független a szemcsemérettől, miközben a homokos mintákban a szemcseméret növekedésével valamelyest nő az átlagos mikroműanyag tartalom; (2) agyagos üledékek a folyó teljes vizsgált hosszán megtalálhatók, míg homokos üledékek a szerbiai (S5) szakaszon egyáltalán nincsenek; továbbá (3) a homok szemcsemérete fokozatosan finomodik alvízi irányba, így a mikroműanyag tartalma is változhat. Tehát az agyagos minták így a teljes vízrendszer szennyezettségéről egységesebb képet adtak.

A kémiai összetétel meghatározással (FTIR) meghatároztam néhány műanyag szemcse anyagi összetételét. A vizsgált 206 szemcséből 193 darab volt valamilyen műanyag (pl. polietilén, polietilén tereftalát, polipropilén, poliamid, poliészter, polisztirol), míg 13 db egyéb összetételű volt (pl. cellulóz, emberi haj, üvegszál). Tehát az azonosításom pontossága 93%-osnak tekinthető.

4. Eredmények, tézisek

1. A Tisza vízrendszerében talált mikroműanyagok főként szennyvízből származnak.

Az azonosított mikroműanyagok szennyvízeredetét támasztja alá, hogy az üledékminták (89–97%) és a vízminták esetében (84–97,8%) is a szálak domináltak, azok közül is kétharmados többséggel a színes szálak (Balla et al. 2022; Balla et al. 2024a; Balla et al. 2024b). Az ilyen nagy mértékű mikroműanyag szál jelenlét – különösképpen a színes szálaké – egyértelműen szennyvíz eredetre utal. A szálak a szintetikus textíliák mosása során töredeznek le, majd akár a tisztított szennyvízzel is a folyókba juthatnak. A vízgyűjtő egyes régióiban (pl. Kárpátalja, Vajdaság) a hiányzó vagy nem megfelelő mértékű szennyvíztisztítás miatt közvetlenül, vagy közvetve jut a Tiszába a szennyvíz, hiszen, ha van is szennyvízelvezetés a meglévő víztisztítók is erősen korszerűsítésre szorulnak. Fontos megjegyezni, hogy ezek a mikroműanyag szálak – hasonlóan a makroműanyagokhoz – lassú lebomlásúak ezért sokáig a környezetben maradnak.

A mikroműanyag szennyeződés kisebb arányát képezik a gömb alakú szemcsék az üledékben (1–5%) és a vízben (0,1–8,7%). Ezek lehetnek ipari eredetűek (pl. súroló anyagok, festékek), de származhatnak kozmetikumokból vagy szépségipari termékekből is, amely ugyancsak a szennyvízzel juthat a folyóba. Mivel a makroműanyagok aprózódása nem gyorsan végbemenő folyamat így a foszlányok mennyisége alacsony volt az üledékben (0–7%) és a vízben (0,3–7,1%) is. Ezek egyértelműen a meder közelében illegális hulladék lerakásra utalnak, ahonnan a víz mobilizálhatja őket, és a makroműanyagok szállítódása közbeni összetöredezéssel keletkeztek.

2. Két felmérési időszak között jelentősen átrendeződik az üledék és a víz mikroműanyag tartalma is méretaránytól függetlenül, azaz szakasz és mintavételi hely szintjén is.

Az egyes szakaszokon az üledékmintákban mind a négy évben más volt a szennyezettség mértéke, és a szakaszok közötti térbeli mintázat is változott. Az első felmérési évben (2020) a szennyezettség fokozatosan nőtt a Közép-Tisza felső (S3) szakaszáig (1535 ± 684 db/kg), és az Alsó-Tisza (S5) volt a legkevésbé szennyezett (530 ± 169 db/kg). Ehhez képest 2021-ben a Felső-Tisza felső (S1) szakasza vált a legszennyezettebbé (1185 ± 748 db/kg) és innen fokozatosan csökkent a szennyezettség a Közép-Tisza alsó (S4) szakaszáig (608 ± 409 db/kg), majd az S5 szakaszon ismét nőni kezdett. A harmadik, 2022-es felmérési évben a pedig a Felső-Tisza alsó (S2) szakasza

vált a legszennyezettebbé (1420 ± 590 db/kg), a legkevésbé szennyezett pedig ismét az S4 szakasz volt (617 ± 274 db/kg). Az utolsó, 2023-as felmérési évben az S2 szakasz vált a legkevésbé szennyezetté (1270 ± 761 db/kg). Folyásirányban azonban gyors növekedést tapasztaltam, mivel az S3 szakasz (1748 ± 767 db/kg) vált a legszennyezettebbé (hasonlóan 2020-hoz). Véleményem szerint ezek a folyamatosan változó térbeli mintázatok azt mutatják, hogy a szennyeződés folyamatosan áttevődik, miközben egyes szakaszok kiürülnek és forrásként funkcionálnak, addig másokban intenzívebb a lerakódás és a szennyeződés nyelőiként működnek (Kiss et al. 2022; Balla et al. 2024a).

Nem csupán az egyes szakaszok üledékmintáiban, de a mintavételi helyek között is jelentős a mikroműanyag szennyezés tér- és időbeli változatossága, ami a szennyezési gócpontok (≥ 2000 db/kg) mobilizációjára és térbeli áttevődésére utal. Tehát nem csupán szakasz-szinten beszélhetünk a mikroműanyag éves kiürüléséről vagy felhalmozódásáról, de jóval nagyobb méretarányban is.

Ezek a különbségek a nyelő-forrás dinamikával magyarázhatók: a „nyelők” kialakulásakor mikroműanyagban gazdag víztöbblet játszik szerepet. Majd a korábbi nyelők mobilizálódhatnak, és „forrás” szerepet tölthetnek be a mikroműanyag szennyezésben. Így alakulhatnak ki és tevődhetnek át gócpontok időről-időre. Véleményem szerint az üledékben a mikroműanyag tartalom folyamatos átrendeződését az egymást követő árhullámok okozzák, amelyek mobilizálják a mikroműanyag mátrixaként szolgáló üledéket.

A három év alatt a szakaszok (S1-5) vizének szennyezettsége folyamatosan növekedett, és a legerőteljesebb növekedést 2023-ban mértem. Különösen nagymértékű volt a növekedés a Felső-Tisza alsó szakaszán (S2) és az Alsó-Tiszán (S5). Az első évben (2021) a Felső-Tisza felső (S1) szakasza volt a legszennyezettebb ($32,8 \pm 16,7$ db/m³), míg a Felső-Tisza alsó szakasza volt a legkevésbé szennyezett ($3,5 \pm 4,9$ db/m³) és innen folyásirányban nőtt a szennyezés. Ehhez képest a következő évben (2022) az S2 szakasz vált a legszennyezettebbé ($30,5 \pm 20,5$ db/m³) és ismét az egyel lentebbi szakasz a Közép-Tisza felső (S3) szakasz volt a legkevésbé szennyezett ($16,5 \pm 6,6$ db/m³) és innen ismét fokozatosan nőtt a szennyezés. Az utolsó (2023) évben az Alsó-Tisza (S5) vált a legszennyezettebb szakasszá, a legtisztább ($33,5 \pm 25,1$ db/m³) szakasz a Közép-Tisza alsó (S4) szakasz volt (Balla et al 2022; Balla et al. 2024b).

Mivel a Tisza vízrendszerében kisvízkor végeztük a mintavételezést, feltételezhető, hogy ilyenkor a mikroműanyag szennyeződés mértékét alapvetően a szennyvíz beeresztés befolyásolja. A vizsgált időszak alatt a mintavételi helyek 93%-án nőtt a mikroműanyag szennyezés, és csupán két

ponton maradt közel változatlan, és egyre több magas (≥ 30 db/m³) szennyezettségű gócpont alakult ki, bár vízminták esetében talán érdemesebb volna szennyezési felhőről beszélni. Ahol ez a szennyezési felhő minden évben jelen volt, ott – hasonlóan az üledékhez – a közelben feltételezhető a közeli szennyező forrás jelenléte, ami a mikroműanyag koncentrációt magasan tartja. Ugyanakkor ahol csupán egy-egy évben mértem kimagasló értékeket, ott valószínűsíthetően a mikroműanyag koncentráció a mintavételi helynél éppen áthaladó szennyezés hullámmal magyarázható, amit igen gyakran egy korábban áradó mellékfolyó mobilizálhatott.

3. A mellékfolyók jelentős mennyiségű mikroműanyagot szállítanak, ugyanakkor a torkolat-közeli szakaszokon a Tiszában lévő mikroműanyag tartalmat alig, vagy csak kis mértékben tudják befolyásolni.

A Tisza mellékfolyóinak vizében a mikroműanyag szennyezettség (2022: 27 ± 19 db/m³; 2023: $70,3 \pm 53,2$ db/m³) magasabb volt, mint a főfolyó szennyezettsége (2021: $15 \pm 10,9$ db/m³; 2022: $22,4 \pm 14,8$ db/m³; 2023: $52 \pm 41,6$ db/m³) (Balla et al 2022; Balla et al. 2024b). Ennek magyarázatát abban látom, hogy a mellékfolyók egyrészt kisebb vízhozamuk miatt kevésbé hígulnak fel és így magasabb szennyezést hordoznak, másrészt a potenciális szennyezőforrásaikkal szorosabb kapcsolat lehetséges a domb- és hegyvidéki területeken, ahol a települések közel fekszenek a folyókhoz.

A mellékfolyók a torkolathoz közel általában kimutathatóan magasabb lebegtetett hordalék és mikroműanyag koncentrációval rendelkeztek, mint a Tisza, aminek oka a Tisza visszaduzzasztó hatása lehet. A mellékfolyók Tiszára gyakorolt hatása csak egyes esetekben volt kimutatható, de más esetekben nem. Például a 2023-ban áradó mellékfolyókon (Sajó–Hernád, Bodrog) jelentősen magas volt a mikroműanyag koncentráció még az apadó ágban is. Azonban kis vízhozamuk miatt csak mérsékelten növelték vagy éppen fenntartották a Tisza mikroműanyag koncentrációját. Ebben szerepe lehet annak is, hogy ahhoz, hogy a mellékfolyó hatása kimutatható legyen, vizüknek össze kellene keveredni a torkolat alatti mintavételi pontig. Azonban ezek a pontok a vizsgálatom során eltérő távolságban (1–25 km) voltak, ráadásul a mellékfolyó és a fő folyó vizének keveredését a két folyó vízhozam aránya, vízállása, eséskülönbsége és víz sűrűsége is befolyásolja. Tehát egy mellékfolyó hatását érdemes volna a torkolat alatt egy távolabbi ponton vizsgálni, mert könnyen meglehet, hogy a keveredés nélküli főfolyó vizét vagy üledékét mintázzuk meg (Balla et al. 2024b).

4. A szemcseösszetétel és a mikroműanyag eloszlás között nincs szoros kapcsolat.

Az üledékek szemcsemérete és mikroműanyag tartalma között nem találtam egyértelmű kapcsolatot. Mivel a Tisza alsóbb szakaszain (S2–4) a durvaszemcsés (homokos) minták több mikroműanyagot tartalmaztak, így a folyószakaszok esésének csökkenésével, a két mintatípus (homokos vs. iszapos-agyagos) közötti különbség egyre nagyobb lett: a durvaszemcsés minták egyre több mikroműanyagot tartalmaztak. Az elemzést nehezíti, hogy az alsó szakaszon (S5) teljességgel hiányoznak a homokos üledéktestek (Kiss et al 2022; Balla et al 2024a).

A legnagyobb eltérés a durva- és finomszemcsés üledék mikroműanyag tartalma között az övzátonyok üledékeiben volt. Ezen a formán a durvaszemcsés mintákban a mikroműanyag koncentráció 34–55%-kal magasabb volt, mint ugyanazon helyszínen a finomszemcsés mintákban. Ezzel szemben az oldalzátonyokon és üledékpleken nem volt kimutatható jelentős különbség a két üledéktípus mikroműanyag tartalma között. Ez az eltérés egyrészt azzal magyarázható, hogy különböző áramlási feltételek érvényesülnek a három folyóvízi formán, másrészt a mikroműanyag részecskék más üledékszemcsékkel aggregátumokat képeznek, vagy biofilm alakul ki a felszínükön. Az aggregátumképződés következtében a mikroműanyagok a fenékhordalék szemcsékhez hasonlóan ülepednek le (Waldschlager és Schüttrumpf 2019), vagyis már közepes áramlási sebességű vízből is kiülepednek, és nem csupán az álló vízből, mint a lebegtetett hordalék. A fenékhordalék részecskék lerakódása jellemzően a durvaszemcsés üledéktesteken (pl. övzátony alsó sávja) figyelhető meg, tehát a nagyobb mikroműanyag aggregátumok miatt itt magasabb lehet a mikroműanyag tartalom is. Ezzel szemben a lebegtetett anyagú üledékplek apadó vízben rakódnak le, amikor már a mikroműanyag koncentráció is kisebb, így mikroműanyag tartalmuk erősen függ a vízben lévő aktuális mikroműanyag terheléstől (Balla et al. 2024b).

5. A különböző hidrológiai feltételek mellett képződő folyóvízi formákon a mikroműanyag lerakódás dinamikája és mértéke is eltérő.

A Tisza vízrendszerében megvizsgált három meder-formán (oldalzátony, üledékplek, övzátony) a mikroműanyag leülepedésének feltételei igen eltérőek lehetnek. A formák egészét nézve az első (2020) és az utolsó (2023) évben az üledékplek, míg 2021-ben és 2022-ben az övzátonyok mikroműanyag tartalma volt magas. Ugyanakkor, ha az egyes helyeken a mikroműanyag dinamikáját vizsgáljuk, akkor kiemelkedő, hogy a szennyezési gócpontok leggyakrabban az oldalzátonyokon fordultak elő, míg az üledékplek mutatták a legnagyobb változékonyságot (Balla et al. 2024a).

A formák eltérő mikroműanyag lerakódási folyamata a formák kialakulásának eltérő körülményeivel magyarázható. Az üledékleplek anyaga az egyenes meder oldal mentén rakódik le, rendszerint a levonuló árhullámok apadó ágában, amikor a csökkenő vízsebességből leülepednek a szemcsék. Az, hogy ezek a formák gyakran tartalmaznak sok mikroműanyagot és jelentős elnyelő-forrás dinamika is jellemzi őket azzal magyarázható, hogy (1) kialakulásukkor, azaz az árhullámok tetőzésekor és apadáskor sok mikroműanyag szállítható, illetve, (2) akár az üledékleplek egészét képes a folyó árvízkor mobilizálni a sodorvonal közelsége miatt. Ezzel szemben az oldalzatonyok és övzatonyok állandó akkumulációs formának tekinthetők, távolabb a sodorvonalától. Azonban ezekre a helyekre a közepes és kisvízekkor is kerülhet hordalék, amelyek igen eltérő mikroműanyag szennyezettséget mutathatnak. Tehát megállapítható, hogy a szennyezés mértéke függ az adott formán lévő áramlási viszonyoktól, a vízállástól és attól, hogy az üledék az árhullámnak melyik időszakában rakódott le, milyen szennyezettségű vízből (Balla et al. 2024b).

6. A mintavételt megelőző hidrológiai helyzet és a lebegtetve szállított hordalék koncentráció között erősebb a korreláció, mint a vízben mért mikroműanyag koncentráció esetében, ugyanakkor a mintavételt megelőző hidrológiai helyzetet is figyelembe kell venni.

A folyóvízi rendszerek összetettek, mivel a mellékvízgyűjtők eltérő térbeli és időbeli aktivitása miatt különböző árhullámok egyidejűleg létezhetnek és fokozatosan haladnak lefelé a vízrendszerben, majd a főfolyón. Nyári nagy esőzések során az árhullámok tér- és időbeli mintázata különösen bonyolult lehet, mivel egyes részvízgyűjtők rendkívül aktívak lehetnek a hirtelen zivatarok hatására, míg mások alacsony vízállással rendelkeznek. Így az alacsony vízállásokat a mellékfolyókon kialakuló kisebb árhullámok megszakíthatják, amelyek a főfolyón lassan ellapulnak, de a hordalékuk jelen van. Ez a mozaikszerű térbeli eloszlás bonyolult mikroműanyag és lebegtetett hordalék koncentráció mintázatokat eredményezett a vizsgálataim során.

A lebegtetve szállított hordalék és a mikroműanyag koncentráció és a mintavételt megelőző időszak hidrológiai paramétereinek eltérő erősségű korrelációja arra enged következtetni, hogy más időszakokban, illetve más kapcsolati rendszerben kell őket elképzelni.

Véleményem szerint, az eltérő erősségű korreláció oka az lehet, hogy a csapadékos és száraz időszakokban eltérő forrásból származik a folyók vize, és természetes vagy mesterséges hordaléka. Kisvízkor, a mérések idején a Tisza és mellékfolyói vízhozamának nagy része a felszín alatti vizekből származik, míg ugyanebben az időszakban a mikroműanyag a szennyvízből

juthat a vízfolyásba, tehát a két forrás egymástól független (Balla et al. 2024b).

A különbségeket tovább erősíti, hogy a lebegtetve szállított hordalék és a mikroműanyag forrása és szállításuk módja is eltérő. A lebegtetett hordalék vagy nagyobb csapadékesemény során kerül a folyóba a felszín leöblítése és a talajerózió révén, vagy a meder és a partok eróziójából eredhet, amely folyamatok erősen kapcsolódnak a hidrológiához (Mohsen et al. 2023). Ugyanakkor bár a mikroműanyag is lemosódhat a vízgyűjtőről például a szennyvíziszappal kezelt talajokról, vagy a szemétteltelepekből, de legfőbb forrása a vízfolyásokba közvetlenül beleengedett tisztított vagy tisztítatlan szennyvíz, mely mennyiségének tér- és időbelisége pedig (elvileg) független a csapadékvízviszonyoktól.

Továbbá a természetes lebegtetett hordalék és a mikroműanyag szemcsék alakja, szemcsemérete degradáltságuk és sűrűségük is eltérő (Waldschlager és Schütttrumpf 2019), ezért a lebegtetve vízoszlopban maradásuk ideje, az ülepedés sebessége és a későbbi mobilizálódásuk is különböző.

7. A duzzasztógátak alapvetően befolyásolják egy folyó mikroműanyag szállítását, mivel mesterséges akadályként rövidebb vagy hosszabb időre szétkapcsolják a víz- és hordalék szállítást.

A duzzasztógátak a felettük lévő szakaszon jelentősen lassítják a vízáramlást és segítik a hordalék lerakódását, miközben a gátak alatt a tisztavíz erózió miatt a meder vertikális és/vagy horizontális eróziója lehetséges. Tehát a gátak és víztározók megtörhetik a longitudinális, folyásiránybeli kapcsolatokat, így a természetes hordalék és a mikroműanyag szállítás térbeli trendjét is (Balla et al. 2024a).

A Tiszán épült duzzasztók jellegükben eltérnek egymástól. A Tiszalöki és Törökbecsei Duzzasztók a mederkitöltő vízszintig emelik a Tisza vízszintjét, míg a Kisköre feletti duzzasztott tér két részre osztható: felső része mederduzzasztást valósít meg, míg az alsó része egy sekély és széles tározó. Emiatt a hordalékdinamikájuk is különbözik.

Ez az áramlástan különbség magyarázhatja a duzzasztóművek felvízi szakaszán tapasztalt eltérő szennyezettségi mintázatokat az üledékekben. Míg a Tiszalöki és Törökbecsei Duzzasztók felé haladva a duzzasztott tér felétől az üledék magas mikroműanyag szennyezettsége fokozatosan csökkent, addig a Kiskörei Vízlépcső mögött az erőmű felé haladva egyre nőtt. Véleményem szerint a Tiszalöki és a Törökbecsei Duzzasztók fölötti szakaszon a zsilipkapuk árvízi kinyitásokor a természetes hordalékokkal együtt a mikroműanyag is mobilizálódhat és kiürülhet, ráadásul minél közelebb van egy pont a duzzasztóhoz, annál valószínűbb a hordalék újbóli mozgásba lendülése. Tehát a hatástávolság növekedésével a mobilizálódás

mérséklődik, és a természetes hordalékkal együtt a mikroműanyagok is felhalmozódnak. Ezzel szemben a Kiskörei Duzzasztó mögötti tóban ilyen típusú hordalék mobilizálódás és kiürülés nincs, viszont a tavi állapot felvízi határán fokozatosan egyre lejjebb tevődik a hordalék akkumulációja, és vele együtt a mikroműanyag koncentráció is (Balla et al. 2024a; Balla et al. 2024b).

A Kiskörei Vízlépcső alatt ugyanakkor tisztavíz erózió érvényesül, mivel a duzzasztó fölött a lebegtetve szállított hordalék és mikroműanyagok leülepedtek, így alvízi szakaszon hordalékhiány lép fel. Ennek következtében megnő a folyó munkavégző képessége is, mely újabb hordalék termelésre (vertikális vagy horizontális erózió) készíteti a vízfolyást. Ezért megfelelő hidrológiai feltételek mellett a tisztavíz erózió miatt mikroműanyagot nem vagy alig tartalmazó anyag erodálódik a mederfenékről. Mivel ez több ezeréves anyag is lehet, ezért egyre több mikroműanyaggal nem szennyezett agyagszemcse keveredik az üledékbe, ami egyre inkább hígítja az üledék mikroműanyag tartalmát.

5. Summary

The research aimed to analyze the spatio-temporal dynamism of microplastic pollution of the Tisza River and its tributaries and to reveal the environmental driving factors of microplastic pollution.

Based on the results it should be noted, that if someone wants to understand the microplastic pollution of a point or a section, it is essential to analyse the pollution pattern of the whole river system, and its influencing factors.

Microplastic contamination is also influenced by the activity of input sources (e.g., sewage discharges (illegal, untreated and also treated), and municipal waste streams, or plastic fragmentation) and the distance of these input sources from the river and the sampling sites. On the output side, some proportion of the microplastic particles are deposited during decreased flow conditions, which can occur in the bottom and sides of the channel in various channel forms, and also in the floodplain during floods. Depending on the amount of deposited sediments, some proportion of the microplastics and sediment will eventually leave the Tisza water system and continue to contaminate the Danube. The rate of material flux between input and output is mainly determined by the hydrological parameters of the river (e.g. slope, water level changes, flow rates of the river and tributaries, sediment transport characteristics) and special features like dams and tributaries. Thus, these factors can fundamentally change the pollution trends in the main river.

This research highlighted the importance of considering the river system as a whole and complex system when studying fluvial microplastic pollution.

This approach helps to identify cause-and-effect relationships and to understand the processes involved.

The research also proved that single snapshot measurements are not sufficient to measure the level of contamination, as the amount of microplastics varies in both spatial and temporal scales due to the dynamics of the contamination sources and hydro-geomorphological processes.

6. Irodalomjegyzék

- 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.
- Fórián Sz. és Kiss T. 2022: Ártéri üledékek mikroműanyag tartalma az alsó-tisza egy kanyarulata mentén. *Földrajzi Közlemények*. 146. 1. pp. 1–15.
- Gere, D.; Pomázi, F.; Szöllősi, A.; Jahanpeyma, P.; Ermilov, A. A.; Baranya, S.; Toldy, A. 2024: Mikroműanyag szennyezés vizsgálata a Duna budapesti szakaszán, Exploring microplastic contamination in the Budapest segment of the Danube River. *POLIMEREK*, 10 (2). pp. 66-72. ISSN 2415-9492
- Kiss, T.; Fórián, S.; Szatmári, G.; Sipos, G. 2021: Spatial distribution of microplastics in the fluvial sediments of a transboundary river—A case study of the Tisza River in Central Europe. *Science of The Total Environment*, 785, 147306.
- Lászlóffy, W. 1982: A Tisza: Vízi Munkálatok és Vízgazdálkodás a Tiszai Vízrendszerben; Akadémiai Kiadó: Budapest.
- Svigrúha R., Prikler B., Farkas A., Ács A., Fodor I., Tapoleczai K., Schmidt J., Bordós G., Háhn J., Harkai P., Kaszab E., Szoboszlai S., Pirger Zs. 2023: Presence, variation, and potential ecological impact of microplastics in the largest shallow lake of Central Europe, *Science of The Total Environment*, Volume 883, 163537
- Waldschlager K. and Schuttrumpf H. 2019: Erosion Behavior of Different Microplastic Particles in Comparison to Natural Sediments. *Environmental Science & Technology*, 53 (22), 13219-13227

Értekezéshez felhasznált publikációk

MTMT: 10079992

- BALLA A.**; MOHSEN A.; GÖNCZY S.; KISS T. 2022: Spatial Variations in Microfiber Transport in a Transnational River Basin. Appl. Sci. 2022, 12, 10852.
- BALLA A.**; TEOFILOVIC V.; KISS T. 2024a: Microplastic Contamination of Fine-Grained Sediments and Its Environmental Driving Factors along a Lowland River: Three-Year Monitoring of the Tisza River and Central Europe. Hydrology, 11, 11.
- BALLA A.**; MOHSEN A.; KISS T. 2024b: Microplastic clouds in rivers: spatiotemporal dynamics of microplastic pollution in a fluvial system. Environmental Sciences Europe (2024) 36:143

Egyéb publikációk:

- KISS T.; GÖNCZY S.; NAGY T.; MESAROŠ M.; **BALLA A.** 2022: Deposition and Mobilization of Microplastics in a Low-Energy Fluvial Environment from a Geomorphological Perspective. Applied Sciences, 12, 4367.
- MOHSEN A.; **BALLA A.**; KISS T. 2023: High spatiotemporal resolution analysis on suspended sediment and microplastic transport of a lowland river. Science of The Total Environment: 902 Paper: 166188
- MOHSEN A.; KISS T.; BARANYA S.; **BALLA A.**; KOVÁCS F. 2024: Thermal Profile Dynamics of a Central European River Based on Landsat Images: Natural and Anthropogenic Influencing Factors. Remote Sensing. 16(17): 3196.

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott Dr. Kiss Timea (*társszerző*) nyilatkozom, hogy a:

BALLA, A.; MOHSEN, A.; GÖNCZY, S.; KISS, T. 2022: Spatial Variations in Microfiber Transport in a Transnational River Basin. Appl. Sci. 2022, 12, 10852. doi.org/10.3390/app122110852

BALLA, A.; TEOFILOVIC, V.; KISS, T. 2024: Microplastic Contamination of Fine-Grained Sediments and Its Environmental Driving Factors along a Lowland River: Three-Year Monitoring of the Tisza River and Central Europe. Hydrology, 11, 11. doi.org/10.3390/hydrology11010011

BALLA, A.; MOHSEN, A.; KISS, T. 2024: Microplastic clouds in rivers: spatiotemporal dynamics of microplastic pollution in a fluvial system. Environmental Sciences Europe (2024) 36:143 doi.org/10.1186/s12302-024-00967-w

publikációkban a doktorjelölt szerepe meghatározó fontosságú, nem használtam fel tudományos fokozat megszerzésekor és ezt a jövőben sem teszem.

Mindszent, 2025.02.16.



Dr. Kiss Timea

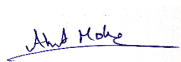
CO-AUTHOR STATEMENTS

I, Ahmed Mohsen Abdelsadek Metwaly, hereby declare that the role of the doctoral candidate in the publication of

BALLA, A.; MOHSEN, A.; GÖNCZY, S.; KISS, T. 2022 Spatial Variations in Microfiber Transport in a Transnational River Basin. Appl. Sci. 2022, 12, 10852. <https://doi.org/10.3390/app122110852>

BALLA, A.; MOHSEN, A.; KISS, T. 2024 Microplastic clouds in rivers: spatiotemporal dynamics of microplastic pollution in a fluvial system. Environmental Sciences Europe (2024) 36:143 <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00967-w>

were decisive that I have not used it to obtain a scientific degree and will not do so in the future.



Budapest, 14.02.2025.

Ahmed Mohsen Abdelsadek Metwaly

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott Dr. Gönczy Sándor (*társszerző*) nyilatkozom, hogy a:

BALLA, A.; MOHSEN, A.; GÖNCZY, S.; KISS, T. 2022 Spatial Variations in Microfiber Transport in a Transnational River Basin. Appl. Sci. 2022, 12, 10852. <https://doi.org/10.3390/app122110852>

publikációban a doktorjelölt szerepe meghatározó fontosságú, nem használtam fel tudományos fokozat megszerzésekor és ezt a jövőben sem teszem.

Eger, 2025.02.13.


.....
Gönczy Sándor

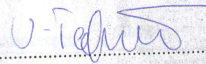
CO-AUTHOR STATEMENTS

I, Vesna Teofilovic, hereby declare that the role of the doctoral candidate in the publication of

BALLA, A.; TEOFILOVIC, V.; KISS, T. 2024: Microplastic Contamination of Fine-Grained Sediments and Its Environmental Driving Factors along a Lowland River: Three-Year Monitoring of the Tisza River and Central Europe. Hydrology, 11, 11.

was decisive that I have not used it to obtain a scientific degree and will not do so in the future.

Novi Sad, 14.02.2025.



Vesna Teofilovic