

MIKROBIÁLIS KÖZÖSSÉGEK SZEREPE A MODERN SZENNYVÍZTISZTÍTÁSBAN: ÁTTEKINTÉS ÉS PERSPEKTÍVÁK

HALÁSZ Judit

Nyíregyházi Egyetem Környezet- és Természettudományi Intézet, Biológia Intézeti Tanszék, H-4400 Nyíregyháza
Sóstói út 31/b, e-mail: halasz.judit@nyc.hu

Bevezetés

A globális vízválság és az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások következtében a szennyvíztisztítás szerepe kiemelt jelentőségűvé vált. A városi, ipari és mezőgazdasági szennyvizek kezelése során nemcsak a szerves anyagok, hanem a tápanyagok, mikroszennyezők és kórokozók eltávolítása is alapvető célkitűzés. E folyamatok sikeres megvalósítása túlnyomórészt mikroorganizmusok anyagcsere-tevékenységére épül.

A szennyvíztisztító rendszerek mikrobiális közösségei bonyolult ökológiai hálózatokat alkotnak, amelyek szoros kapcsolatban állnak a technológiai paraméterekkel és az eltávolítási hatékonysággal. Az omikai technológiák – különösen a metagenomika – fejlődése új lehetőségeket nyitott a közösségek pontosabb megismerésére, az irányított mikrobiális folyamatok fejlesztésére és a közegészségügyi kockázatok feltárására (Jankowski et al., 2022; Silvester et al., 2025).

A szennyvíztisztítás biológiai szakasza kulcsszerepet játszik a vízminőség fenntartásában és a környezeti terhelés csökkentésében. Az elmúlt évtizedekben jelentős előrelépések történtek a mikrobiális közösségek szerkezetének és működésének megismerésében, amely lehetővé tette a szennyvíztisztító rendszerek hatékonyabb és fenntarthatóbb üzemeltetését. Az áttekintő cikk célja, hogy bemutassa a szennyvíztisztításban részt vevő mikroorganizmusok szerepét, a lebontási folyamatokat, a különböző technológiai rendszerek mikrobiológiai vonatkozásait, valamint a modern metagenomikai és monitorozási módszereket. A tanulmány külön figyelmet fordít az aktuális kihívásokra, mint az antibiotikum-rezisztencia, a mikroszennyezők eltávolítása, az energiahasznosítás lehetőségei és a körforgásos gazdaságba való illeszkedés. A mikrobiális ökoszisztémák alaposabb megértése és irányítása elengedhetetlen a jövő klímareziliens és erőforrás-visszanyerő szennyvíztisztító rendszereihez (Federigi et al., 2024; Li et al., 2024; Tierny et al., 2024).

Irodalmi áttekintés

A szennyvíztisztítás mikrobiális ökológiája

A biológiai szennyvíztisztítás hatékonysága nagymértékben függ a mikrobiális közösség összetételét, működését és stabilitását befolyásoló tényezőktől. Az aktíviszapban és biofilm-alapú rendszerekben élő mikroorganizmusok összetett ökológiai hálózatokban működnek együtt, ahol a közösség szerkezetét a szubsztrátkoncentráció, az oldott oxigén, a pH és a hidraulikai paraméterek határozzák meg (Federigi et al., 2024; Yang et al., 2020).

A főbb mikroorganizmus-csoportok szerepe

Az aerob heterotróf baktériumok (pl. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Zooglea*) a szerves anyag oxidációjában vesznek részt, biomasszát építenek és extracelluláris polimereket (EPS) termelnek, amelyek elősegítik a pelyhesedést. A filamentosus baktériumok (pl. *Microthrix parvicella*, *Nocardia*, *Sphaerotilus*) a pelyhek morfológiai vázát alkotják, de túlbujánzásuk esetén habképződést és rossz ülepedést okoznak. A nitrifikáló baktériumok (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrospira*) és a denitrifikálók (*Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas stutzeri*) a nitrogénkörforgás kulcslépéseit hajtják végre. A foszforakkumuláló szervezetek (pl. *Candidatus accumulibacter*) váltakozó anaerob–aerob ciklusokban foszfátot raktároznak. Az archaéák (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*) a metanogenezis végső lépéseit végzik, a protozoák és metazoák a baktériumok fogyasztásával szabályozzák a biomasz mennyiségét.

A mikrobiális közösségek dinamikája

A szennyvíztisztítók mikrobiális közösségei rendkívül komplexek, és a közösség szerkezet, valamint a környezeti paraméterek közötti kapcsolat meghatározza a tisztítás hatékonyságát. A közösségek tagjai közötti szinergikus és kompetitív kölcsönhatások biztosítják a folyamatok stabilitását, ugyanakkor érzékennyé teszik a rendszert a terhelésingadozásokra és környezeti változásokra. A biofilmek és pelyhek mikrostrukturái lehetővé teszik aerob és anaerob mikrokörnyezetek kialakulását, amelyek párhuzamos anyagcsereutak működését teszik lehetővé (Yang et al., 2020).

Az utóbbi években a molekuláris és metagenomikai vizsgálatok forradalmasították a közösségek kutatását. A 16S rRNS szekvenálás segítségével feltárható a közösség szerkezet, míg a shotgun metagenomika és a metagenome-assembled genomes (MAGs) lehetőséget adnak a funkcionális gének és útvonalak azonosítására. A célzott monitorozási technikák, mint a qPCR és a fluoreszcens in situ hibridizáció (FISH), alkalmasak kulcsszereplő csoportok – például nitrifikálók vagy antibiotikum-rezisztencia géneket hordozó szervezetek – követésére.

Külön figyelmet kap a rezisztome elemzés, amely a szennyvíztisztítóknak jelenlévő antibiotikum-rezisztencia gének (ARG-k) és mobil genetikai elemek azonosítását teszi lehetővé. Ezek vizsgálata rávilágít arra, hogy a telepek potenciális rezervoárjai lehetnek a rezisztenciagének környezeti terjedésének (Jankowski et al., 2022). Európai kutatások szerint a szennyvíztisztítók közösségei szezonális dinamikát mutatnak: a nitrifikálók és denitrifikálók aránya jelentősen változik az évszakok függvényében (Li et al., 2018).

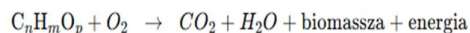
Magyarországi tapasztalatok is rámutatnak a közösségek összetételének és a technológiai paramétereknek a szoros kapcsolatára. Debrecenben és a Budapest-Csepel telepen – a *Microthrix parvicella* túlszaporodása jelentős habképződést okozott, amelyet az F/M arány szabályozásával és az iszapkor növelésével sikerült mérsékelni (Aib et al., 2024). A Nyíregyháza térségében vizsgált közepes kapacitású telepeken az iszapkor 8–20 nap között változik, ami közvetlen hatással van a nitrifikálók fennmaradására és a foszfor-eltávolítás hatékonyságára. Rövidebb iszapkor mellett a nitrifikáló baktériumok visszaszorulnak, míg a hosszabb iszapkor a szerves anyag hatékonyabb lebontása mellett elősegíti a foszforakkumuláló szervezetek stabil fennmaradását. Ezek az eredmények összhangban állnak a nemzetközi adatokkal, ugyanakkor hangsúlyozzák, hogy a kisebb, vidéki telepeken is kritikus a működési paraméterek pontos szabályozása (Szabó et al., 2001).

Biológiai lebontási folyamatok a szennyvíztisztításban

A szennyvíztisztítás biológiai szakaszában a szennyező anyagok döntő részét mikroorganizmusok bontják le különféle anyagcsereutakon keresztül. Ezek a folyamatok lehetnek aerob vagy anaerob jellegűek, attól függően, hogy rendelkezésre áll-e oxigén, illetve milyen elektronakceptorok vannak jelen. A szerves anyagok lebontása mellett a nitrogén- és foszforeltávolítás, valamint a mikroszennyezők biodegradációja is kulcsfontosságú mikrobiológiai folyamatokhoz kötődik (Tardy és mts, 2012; Federigi et al., 2024).

Szerves anyagok lebontása

Aerob körülmények között a heterotróf mikroorganizmusok oxidálják a szennyvízben található szerves anyagokat, amelyekből energia szabadul fel biomasszaépítés és sejtnövekedés céljából. A folyamat fő végtermékei a szén-dioxid és a víz:

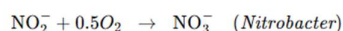
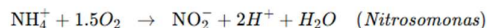


Anaerob környezetben a szerves anyagok lebontása több lépcsőben zajlik: a hidrolízis, acidogenezis, acetogenezis és végül a metanogenezis során a komplex szubsztrátok fokozatosan egyszerűbb vegyületekké alakulnak. A metanogén archaeák végső lépésként metánt és szén-dioxidot termelnek, amely biogáz formájában energetikai hasznosításra kerülhet.

Nitrogéntávoztítás mikrobiológiai folyamatai

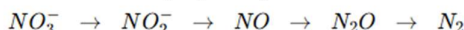
A szennyvíz nitrogéntartalmának eltávolítása több egymásra épülő biológiai folyamat eredménye. Az első lépés az ammonifikáció, amely során a szerves nitrogénvegyületek – például fehérjék és aminosavak – lebontásával ammónia (NH_3) vagy ammóniumion (NH_4^+) keletkezik. Ezt a folyamatot elsősorban heterotróf baktériumok végzik, többek között a *Bacillus*, *Pseudomonas* és *Clostridium* nemzetségek képviselői (Madigan et al., 2021).

Ezt követi a nitrifikáció, amely során autotróf baktériumok két lépésben oxidálják az ammóniumot: először nitritté, majd nitráttá. A folyamat fő szervezetei az ammónium-oxidáló baktériumok (AOB), például *Nitrosomonas* fajok, valamint a nitrit-oxidáló baktériumok (NOB), például *Nitrobacter*. Ezek együtt biztosítják a szennyvíz ammóniumterhelésének hatékony csökkentését.



Újabb kutatások szerint a *Nitrospira* nemzetséghez tartozó úgynevezett comammox törzsek képesek mindkét lépést önállóan elvégezni (Federighi et al., 2024).

A harmadik lépés a denitrifikáció, amikor fakultatív anaerob baktériumok – például *Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas stutzeri* vagy *Thauera* fajok – a nitrátot redukálják, és ennek végtermékeként nitrogéngáz képződik.



Ez a folyamat kulcsszerepet játszik az eutrofizáció megelőzésében (Tardy & Jobbágy, 2012).

Végül az anammox (anaerob ammónium-oxidáció) során az ammónium és a nitrit közvetlenül nitrogéngázzá alakul oxigénigény nélkül.



A folyamatot a *Brocadia* és *Kuenenia* nemzetségekhez tartozó baktériumok végzik, és jelentős energiamegtakarítást tesz lehetővé, mivel nincs szükség külső szénforrásra. Az eljárást Európában már több szennyvíztisztító telepen – például Strassban (Ausztria) és Rotterdamban (Hollandia) – részfolyamatként sikeresen bevezették (Kartal et al., 2010).

Foszforeltávolítás folyamata

A szennyvízben található foszfor eltávolítása kulcsfontosságú, mivel a felesleges foszfor a befogadó vizek eutrofizációjához vezethet. A foszforeltávolítás hagyományosan kémiai úton, például alumínium- vagy vaskoagulációval történhet, azonban az utóbbi években egyre inkább előtérbe került a biológiai foszfor-akkumuláció (enhanced biological phosphorus removal, EBPR).

Az EBPR során a foszfor-akkumuláló szervezetek (polyphosphate-accumulating organisms, PAO-k) képesek ciklikusan felhalmozni és leadni a polifoszfátokat. Anaerob körülmények között ezek a baktériumok a sejten belül tárolt polifoszfátokat hidrolizálják, miközben illékony zsírsavakat (VFA-kat) vesznek fel és polihidroxibutiráttá (PHB) alakítják. E folyamat során a polifoszfát lebomlása ortofoszfát formájában a vízbe kerül. Aerob körülmények között a PAO-k a korábban felhalmozott PHB-t oxidálják, amelyből energia szabadul fel a foszfátok újra polifoszfáttá történő beépítéséhez, így jelentős mennyiségű foszfort vonnak ki a vízből.

A folyamat sikerességét több tényező befolyásolja: az iszapkor (általában 8–20 nap), a szénforrás típusa, valamint a rendszer redox-körülményei. Rövidebb iszapkor mellett a PAO-k nem képesek stabilan fennmaradni, míg hosszabb iszapkor kedvez a polifoszfátok akkumulációjának.

Az utóbbi években a biológiai foszforeltávolítást gyakran egészítik ki a foszfor irányított kinyerésével. Ennek egyik formája a struvit-kiválás, amelynek részletes ismertetése a 4. fejezetben (Körforgásos gazdaság és fenntarthatóság) található.

Mikroszennyezők eltávolítása

A mikroszennyezők – köztük a gyógyszermaradványok, hormonok és peszticidek – eltávolítása egyre nagyobb kihívást jelent a szennyvíztisztításban, mivel a hagyományos biológiai rendszerek ezeknek a vegyületeknek gyakran csak részleges bontására képesek. Bizonyos baktériumok, például *Sphingomonas*, *Novosphingobium* és *Comamonas*, képesek lebontani egyes gyógyszermolekulákat és az endokrin rendszert károsító anyagokat (EDC-k), de hatásuk önmagukban nem elegendő.

A hatékonyabb eltávolítás érdekében a biológiai tisztítást gyakran kiegészítő technológiákkal kombinálják. Az összetett oxidációs eljárások (AOPs) közé tartozó eljárások – például az ózonizáció, az UV/H₂O₂ és a szulfát-radikális alapú rendszerek – számos gyógyszermaradvány és hormon oxidációjára képesek. Hübner és munkatársai (2024) kiemelik az UV/perszulfát kombináció és a fotokatalízis jelentőségét, amelyek a perzisztens szennyezők kezelésének egyik leghatékonyabb kiegészítő megoldását kínálják. Egy másik elterjedt módszer az adszorpció aktív szénrel (PAC), amelynek alkalmazásával Boehler és kollégái (2012) 10–20 g·m⁻³ PAC dózis mellett 10–50% kiegészítő eltávolítást értek el a másodlagos tisztításhoz képest. Hatékonyságát ugyanakkor nagymértékben befolyásolja a víz oldott szerves széntartalma (DOC).

Ezzel párhuzamosan a membrántechnológiák, különösen a nanofiltráció (NF) és a reverz ozmózis (RO), a legtöbb szerves mikroszennyezőt magas hatásfokkal képesek visszatartani, bár energiaigényük és a koncentrátum kezelése további kihívást jelent (Khoo et al., 2022). Új irányt képviselnek a bioelektrokémiai rendszerek (BES) és az elektrooxidációs megoldások, amelyek a biológiai és elektromos/kémiai folyamatok kombinációjával bizonyos perzisztens vegyületek eltávolításában is hatékonyak lehetnek. Poursat és munkatársai (2019) hangsúlyozzák a technológiák potenciálját, ugyanakkor rámutatnak költség- és stabilitási korlátokra is. Alternatív lehetőséget kínálnak a mikroalga-baktérium konzorciumok, amelyekben a mikroalgák biomasszájába történő bioadszorpció és ko-metabolizmus elősegíti a nehezen eltávolítható vegyületek kezelését. Fallahi és kollégái (2021) rámutattak, hogy ezek a rendszerek ígéretesek, bár jelenleg még főként kísérleti szinten működnek.

Összességében a kiegészítő eljárások a hagyományos biológiai szennyvíztisztítás mellett, integrált rendszerben nyújthatnak valóban hatékony megoldást a mikroszennyezők eltávolítására (El Hammoudani et al., 2024; Bilal et al., 2024).

Kihívások és jövőbeli kutatási irányok

Az egyik legsúlyosabb kihívás az antibiotikum-rezisztencia, mivel a szennyvíztisztítók jelentős rezervoárjai az ARG-knak, amelyek horizontális géntranszfer révén patogén baktériumokba is eljuthatnak (Federigi et al., 2024; Silvester et al., 2025). Emellett a szennyvíztisztítók energiaigénye is komoly kérdés: a mikrobiális üzemanyagcellák (*Geobacter*, *Shewanella*) és az anaerob rendszerek optimalizálása ígéretes lehetőség az energiafelhasználás csökkentésére (Li et al., 2024).

Az irányított mikrobiális közösségek és a szintetikus biológia új lehetőséget kínálnak a jövőben: az "intelligens iszapkezelés" (smart sludge) koncepció szerint célzottan kialakított konzorciumok alkalmazhatók meghatározott bontási funkciókra (Federigi et al., 2024). A klímaváltozás pedig újabb kihívásokat jelent: a hőmérséklet emelkedése, az oxigénoldhatóság csökkenése és a befolyó szennyvíz változó összetétele különösen érzékenyen érinti a nitrifikálókat, amelyek adaptív törzsek kiválasztásával és reaktorok áttervezésével tarthatók fenn (UNECE, 2022).

Körforgásos gazdaság és fenntarthatóság

A körforgásos szemlélet szerint a szennyvíz nem tekinthető hulladéknak, hanem másodlagos erőforrásnak. Ennek jegyében a szennyvíztisztítás célja nem csupán a szennyezőanyagok eltávolítása, hanem a bennük rejlő tápanyagok és energia visszanyerése is.

A foszforvisszanyerés kiemelt jelentőséggel bír, hiszen a foszforkészletek globálisan korlátozottak. A biológiai foszforeltávolítás (EBPR) mellett egyre elterjedtebb a foszfor irányított kinyerése struvit formájában. A struvit (kémiai képlete: $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) kristályosítása ipari

méretekben is alkalmazható, és lehetővé teszi a foszfor közvetlen hasznosítását műtrágyaként. A folyamat hatásfoka kedvező: akár 80–90%-os foszfor-visszanyerést is biztosíthat (Yan et al., 2024).

A szennyvíziszapból előállítható bioszén és biopolimerek új ipari és mezőgazdasági felhasználási lehetőségeket kínálnak. A szennyvíziszap anaerob lebontása szintén fontos pillére a körforgásos gazdasági modellnek. A metánban gazdag biogáz energiatermelésre fordítható, amellyel csökkenthető a telep külső energiaigénye. Magyarországi és nemzetközi tapasztalatok alapján a biogáz-hasznosítás a szennyvíztisztítók teljes energiaigényének 30–50%-át képes fedezni (Güven et al., 2021). Ez nemcsak gazdasági előnyökkel jár, hanem mérsékli az üvegházhatású gázok kibocsátását is.

A struvt és a biogáz példái jól mutatják, hogy a szennyvíztisztítás integrálható a körforgásos gazdaság modelljébe, ahol a tápanyag- és energia-visszanyerés egyaránt hozzájárul a fenntarthatóbb vízgazdálkodáshoz és az üzemeltetés költségeinek csökkentéséhez. A „Wastewater Factory of the Future” koncepció integrált megközelítést képvisel, ahol a szennyvíztisztító telepek egyszerre működnek vízkezelőként, energiatermelőként és nyersanyag-visszanyerő központként (Dauknys et al., 2023).

Következtetések

A szennyvíztisztítás mikrobiológiai alapjai nélkülözhetetlenek a kezelőrendszerek hatékony és fenntartható működtetéséhez. A mikroorganizmusok nem csupán szennyezőanyagokat bontanak le, hanem kulcsszerepet játszanak a nitrogén- és foszforeltávolításban, a mikroszennyezők biodegradációjában és az energiahasznosításban is. Az omikai módszerek – különösen a metagenomika – új távlatokat nyitottak a közösségek működésének megértésében, valamint az antibiotikum-rezisztencia és a mobil genetikai elemek monitorozásában.

A jövő szennyvíztisztító telepei nem pusztán szennyezőanyag-eltávolítók, hanem integrált erőforrás-központok lesznek, ahol a víz, az energia és a nyersanyagok visszanyerése egyaránt megvalósul. Ehhez a mikrobiális ökológiai ismeretek és a biotechnológiai innovációk szoros összekapcsolása szükséges. A közösségi működés rendszerszintű szemlélete és a körforgásos gazdaság elveinek alkalmazása biztosíthatja, hogy a szennyvíztisztítás aktívan hozzájáruljon egy fenntarthatóbb jövőhöz.

Összefoglalás

Az áttekintő tanulmány bemutatta a szennyvíztisztítás mikrobiológiai alapjait, a főbb lebontási folyamatokat és a közösségek szerepét a tápanyag- és mikroszennyező-eltávolításban. Kiemelésre kerültek az új technológiák, mint az anammox, a granulált aerob iszap és a mikrobiális üzemanyagcellák, amelyek hozzájárulhatnak az energiahatékonyság és az erőforrás-visszanyerés javításához. A molekuláris és metagenomikai módszerek lehetőséget adnak a közösségek pontosabb feltérképezésére és az antibiotikum-rezisztencia gének nyomon követésére. Hazai példák – Debrecen, Csepel és Nyíregyháza telepei – rámutattak arra, hogy a közösség szerkezet és a működési paraméterek közvetlenül befolyásolják a tisztítási hatékonyságot. A körforgásos gazdaság szemléletében a jövő szennyvíztisztító telepei nem pusztán szennyezőanyag-eltávolító, hanem víz-, energia- és tápanyag-visszanyerő központokként fognak működni. A mikrobiális ökológia, a biotechnológia és a fenntarthatóság szoros összekapcsolása elengedhetetlen ahhoz, hogy a szennyvíztisztítás a jövő klímareziliens és erőforrás-hatékony rendszereinek alappillére legyen.

Kulcsszavak: szennyvíztisztítás, mikrobiális közösségek, metagenomika, antibiotikum-rezisztencia gének (ARG), anammox, foszfor-visszanyerés, körforgásos gazdaság, fenntartható vízgazdálkodás

Irodalom

- Aib, B. – Kovács, R. – Nagy, D. – Tóth, Á.: 2024. Filamentous bacteria and process stability in Hungarian wastewater treatment plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(7), 3125–3138. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108598>
- Bilal, M. – Ihsanullah, I. – Hassan Shah, M. U. – Bhaskar Reddy, A. V. – Aminabhavi, T. M.: 2022. Recent advances in the removal of dyes from wastewater using low-cost adsorbents. *Journal of Environmental Management*, 321, Article 115981. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115981>
- Boehler, M. – Zwicknnpflug, B. – Hollender, J. – Ternes, T. – Joss, A. – Siegrist, H.: 2012. Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powdered activated carbon. *Water Science and Technology*, 66(10), 2115–2121. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.353>
- Daukny, R. – Morkvėnas, R. – Ražanskis, R. – Striūgas, N. – Gedgaudas, R.: 2023. Process improvement of biogas production from sewage sludge. *Energies*, 16(7), 3285. <https://doi.org/10.3390/en16073285>
- El Hammoudani, Y. – Dimane, F. – Haboubi, K. – Benaabidate, L. – Bourjila, A. – Achoukhi, I. – El Boudammoussi, M. – Faiz, H. – Touzani, A. – Moudou, M. – Esskifati, M.... et al.: 2024. Micropollutants in wastewater treatment plants: A bibliometric – bibliographic study. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100190>
- Fallahi, A. – Rezvani, F. – Asghamejad, H. – Khorshidi Nazloo, E. – Hajinajaf, N. – Higgins, B.: 2021. Interactions of microalgae–bacteria consortia for nutrient removal from wastewater: A review. *Chemosphere*, 272, 129878. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129878>
- Federigi, I. – Bonetta, S. – Tesaro, M. – De Giglio, O. – Oliveri Conti, G. – Atomsa, N. T.... Carducci, A.: 2024. A systematic scoping review of antibiotic-resistance in drinking tap water. *Environmental Research*, 263(Pt 1), 120075. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120075>
- Güven, H. – Ersahin, M. E. – Özgün, H.: 2021. Energy self-sufficiency in wastewater treatment plants: perspectives, challenges, and opportunities. In *Clean Energy and Resource Recovery: Wastewater Treatment Plants as Biorefineries*, Volume 2 (pp. 105–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00019-6>
- Hübner, U. – Spahr, S. – Lutze, H. – Wieland, A. – Rütting, S. – Gemjak, W. – Wenk, J.: 2024. *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research*. *Heliyon*, 10(9), e30402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>
- Jankowski, P. – Gan, J. – Le, T. – McKennitt, M. – Garcia, A. – Yanaç, K. – Yuan, Q. – Uyaguari-Diaz, M.: 2021. Metagenomic community composition and resistome analysis in a full-scale cold climate wastewater treatment plant. *Environmental Microbiome*, 17(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40793-022-00398-1>
- Kartal, B. – Kuenen, J. G. – Loosdrecht, M. C. M.: 2010. Sewage treatment with anammox. *Science*, 328(5979), 702–703. <https://doi.org/10.1126/science.1185941>
- Khoo, Y. S. – Goh, P. S. – Lau, W. J. – Ismail, A. F. – Abdullah, M. S. – Ghazali, N. H. M. – Yahaya, N. K. E. M. – Hashim, N. – Othman, A. R. – Mohammed, A. – Kerisnani, N. D. A. P. – Yusoff, M. A. M. – Hashim, N. H. F. – Karim, J. – Abdullah, N. S. ... et al.: 2022. Removal of emerging organic micropollutants via modified-reverse osmosis/nanofiltration membranes: A review. *Chemosphere*, 305, 135151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135151>
- Li, B. – Liu, C. – Bai, J. – Huang, Y. – Su, R. – Wei, Y.... Ma, B.: 2024. Strategy to mitigate substrate inhibition in wastewater treatment systems. *Nature Communications*, 15, 7920. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52364-9>
- Li, B. – Chen, J. – Wu, Z. – Wu, S. – Xie, S. – Liu, Y.: 2018. Seasonal and spatial dynamics of denitrification rate and denitrifier community in constructed wetland treating polluted river water. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 126, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.008>
- Madigan, M. T. – Bender, K. S. – Buckley, D. H. – Sattley, W. M. – Stahl, D. A.: 2021. *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Poursat, B.A.J. – van Spanning, R.J.M. – Braster, M. – Helmus, R. – de Voogt, P. – Parsons, J.R.: 2019. Biodegradation of Metformin and Its Transformation Product, Guanyurea, by Natural and Exposed Microbial Communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, Article ID: 109414. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109414>
- Silvester, R. – Perry, W. B. – Webster, G. – Rushton, L. – Baldwin, A. – Pass, D. A. – Byrnes, N. A. – Farkas, K. – Heginbotham, M. – Craine, N. – Cross, G. – Kille, P. – Kasprzyk-Hordern, B. – Weightman, A. J. – Jones, D. L.: 2025. Metagenomic profiling of hospital wastewater: A comprehensive national scale analysis of antimicrobial resistance genes and opportunistic pathogens. *Journal of Infection*, 90(6), 106503. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2025.106503>
- Szabó, A. – Osztoics, A. – Szilágyi, F.: 2001. Natural wastewater treatment in Hungary. *Water Science and Technology*, 44(11–12), 331–338. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0848>
- Tardy, G. M. – Bakos, V. – Jobbágy, A.: 2012. Conditions and technologies of biological wastewater treatment in Hungary. *Water Science and Technology*, 65(9), 1676–1683. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.062>
- Tierney, B. T. – Humphrey, G. – Johnson, A. J. – Eren, A. M. – Sharpton, T. J. – Shenav, L.... Mason, C. E.: 2024. Towards geospatially-resolved public-health surveillance via wastewater sequencing. *Nature Communications*, 15, 8386. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52427-x>
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): 2022. Impacts of climate change on water quality and treatment processes. *United Nations Economic Commission for Europe Report*. Retrieved from <https://unece.org>
- Yan, Y. – Kallikazarou, N. I. – Nisiforou, O. – Shang, Q. – Fu, D. – Antoniou, M. G. – Fotidis, I. A.: 2025. Phosphorus recovery through struvite crystallization from real wastewater: Bridging gaps from lab to market. *Bioresource Technology*, 417, 132408. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132408>

Yang, Y. – Wang, L. – Xiang, F. – Zhao, L. – Qiao, Z.: 2020. Activated sludge microbial community and treatment performance of wastewater treatment plants in industrial and municipal zones. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 436. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020436> treatment plants. *Environmental Microbiome*, 17(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s40793-022-00432-7>

THE ROLE OF MICROBIAL COMMUNITIES IN WASTEWATER TREATMENT: AN OVERVIEW AND PERSPECTIVES

Judit Halász

University of Nyíregyháza, Institute of Environmental and Natural Sciences, Department of Biology. H-4400 Nyíregyháza, Sóstói Str. 31/b.
halasz.judit@nye.hu

Summary

Microorganisms are central to the biological treatment of wastewater, driving the removal of organic matter, nitrogen, phosphorus, and micropollutants. Emerging technologies such as anammox, aerobic granular sludge, and microbial fuel cells enhance both energy efficiency and resource recovery. Metagenomic tools enable the monitoring of community dynamics and the spread of antibiotic resistance genes, providing critical insights for safe and effective treatment. Within the circular economy paradigm, future wastewater treatment plants will operate as integrated resource recovery centers, producing clean water, energy, and raw materials, thereby supporting sustainable water management and climate change adaptation.

Keywords: wastewater treatment, microbial communities, metagenomics, antibiotic resistance genes (ARGs), anammox