

hogy a rekonstrukciós igény hatalmas már ahhoz is, hogy a jelenlegi határértékeknek továbbra is meg tudjanak felelni a tagállamok. Ez szintén lefektetésre került az értékelő dokumentumban, így a jövőben nagyobb figyelem fordulhat a támogatások ez irányú felhasználására. Fontosnak tartjuk, hogy megfelelő támogatási rendszer kerüljön meghirdetésre.

A gyógyszermaradványok és mikroműanyagok is egyre nagyobb figyelmet kapnak. Eltávolításukra igény jelentkezik, ugyanakkor folyamatosan hirdetjük, hogy hosszú távú megoldásként ez nem a szennyvíztisztítók feladata, látványos eredmény csak a szennyezés forrásának megszüntetésével, így a gyártás korlátozásával, az anyagok szennyvízbe jutásának megakadályozásával érhető el.

A körkörös gazdaság kialakítása és az EU klímapolitikájának való megfelelés szempontjából felszínre került a szennyvíztisztítók energiahatékonyság-növelésének szándéka. Itt figyelmet kell fordítanunk a támogatással még kihasználható területekre, mint az energiahatékony eszközök beszerzése vagy a biogáztermelés lehetőségének kiaknázása.

Tisztán látjuk, fel kell készülnünk arra, hogy az EU szabályozni szeret-

né a 2000 LE alatti települések szennyvizének kezelését, előtérbe helyezve az innovatív természetközeli alternatívákat és egyéb egyedi berendezések alkalmazását.

Végül, de nem utolsósorban szeretnénk elérni az ipari szennyvizekre vonatkozó határértékek szigorítását a várható felülvizsgálat során.

Összességében elmondható, hogy továbbra is fel kell hívunk a figyelmet a víziközmű-szolgáltatások értékére és arra a komplex, változó környezetre, amelyhez a víziközmű-szolgáltatóknak alkalmazkodniuk kell. Törekvéseink célja a víz és a vízszolgáltatások értékének feltárása a fogyasztók, a környezet, a közegészségügy és a természet vonatkozásában. Ebben a perspektívában folytatjuk a szennyező anyagok, a gyógyszermaradványok és a mikroműanyagok szigorú, forrásnál történő ellenőrzését célzó intézkedések megtételére irányuló kampányunkat mint a leghatékonyabb tevékenységet vízkincsünk megóvásának érdekében. Fenntartjuk a kiterjesztett gyártói felelősségvállalás bevezetésének fontosságát is mindenkor, ha a víziközmű-szolgáltatóknak kiegészítő kezelést kell bevezetniük a szennyező anyagok eltávolítása érdekében.

## „MISZTIKUS SZÁMOK”, ÉS AMI MÖGÖTTÜK VAN: MÉLYEBBEN A BEFOLYÓ SZENNYVÍZ C:N:P ARÁNYÁNAK SZEREPÉRŐL A BIOREAKTOR-ELRENDEZÉS OPTIMALIZÁLÁSÁBAN



**KIVONAT** A jellemző befolyó szennyvíz minőség alapvetően meghatározza az adott helyszínre adaptálható biotechnológiát. A bioreaktor-elrendezést a helyi adottságoknak megfelelően szükséges kialakítani, nincsen egységes kommunális szennyvíz minőség, és nincs mindenütt jól működő technológia. A befolyó szennyvíz C:N:P aránya igen fontos mutató a technológia megválasztásában, ugyanakkor körültekintően szükséges vele bánni, mivel egyrészt az adott helyre érvényes kritériumokat számos befolyásoló tényező módosíthatja (pl. a befolyó szennyvízben lévő szerves szénforrás összetétele, hozzáférhetősége és biodegradálhatósága), ami a szakirodalmi adatokhoz képest jelentős eltéréseket is eredményezhet. Másrészt meglévő rendszerrel az üzemelő technológia, újonnan létesítendőnél pedig a tervezett rendszer szerves szénforrás gazdálkodási hatékonysága meghatározó jelentőségű abban, hogy a szakirodalmi ajánlásokat milyen fenntartásokkal és módosításokkal vegyük figyelembe. Általános tapasztalat, hogy a vegyszeradagolás sok esetben méréselkelhető vagy teljesen elkerülhető lenne megfelelően megválasztott és a helyszínre adaptált korszerű biotechnológiai eljárásokkal.

**KULCSSZAVAK** eleveniszapos szennyvíztisztítás; C:N:P arány; szerves szénforrás hiány; tápanyaghiány; biológiai tápanyag-eltávolítás; fonalis iszappuffadás; viszkózus iszappuffadás

**DR. BAKOS VINCE** egy. adjunktus, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszék, vbakos@mail.bme.hu

### 1. Mi az a C:N arány? – avagy rövid (szenny)vízi túra a determinisztikus mérnökségből a sztochasztikus biotechnológiába a varázslat sziréneinek elkerülésével

Számos alkalommal hallható konferenciákon vagy szakmai egyeztetéseken, hogy a befolyó szennyvíz C:N aránya ennyi vagy annyi... Tapasztalatom szerint legtöbbször az sem derül ki ilyenkor, hogy az elhangzó számok pontosan mire vonatkoznak. Mi a „szén”, és mi a „nitrogén”, azaz milyen formában van kifejezve? Miről beszélünk? Márpedig a szerves szénforrás mennyiségét sokféle gyűjtőkomponenssel meg lehet adni (pl. kémiai oxigénigény – KOI; ötnapos biokémiai oxigénigény – BOI5; összes szerves széntartalom – TOC, Total Organic Carbon). Az sem mindegy,

hogy az adott komponens teljes, centrifugált és/vagy szűrt (és ha szűrt, milyen pórúsátmérőjű szűrőn szűrt) mintából lett meghatározva. Ugyanígy a nitrogéntartalom esetében széles körben alkalmaznak különböző komponenseket, pl. ammónia-N, összes-Kjeldahl-N, összes-N-koncentráció. Óriási különbség lehet az előálló arányszámokban, amennyiben más-más konkrét komponenspárral fejezzük ki a C:N arányt... A foszforra hasonlóképpen: nem mindegy, hogy foszfát-foszfor, vagy összesfoszfor-koncentrációban kerül megadásra. Ha ezt nem rögzíti az előadó, a mondandója ködössé, a gyakorlatban pedig az adott problémára javasolt megoldás egzakt műszaki eljárás helyett valamiféle „varázslattá” alakul át.

A bevezetőben nem az arányszámok ellen szeretnék felszólalni, sőt hangsúlyozom, hogy ezek a mutatók nagyon fontosak a tervezésben és

az üzemeltetésben. Nem a számokkal van a baj, csak tudni kell őket használni, és tisztában kell lenni a mögöttük húzódó bizonytalanságokkal! Különben üres számháború zajlik, aminek a végén általában veszítünk – időt, pénzt, energiát, hatékonyságot –, holott lehetséges, hogy ugyanennyi erővel elérhető lenne a korszerű, költséghatékony megoldás.

A biotechnológia (biokémiai folyamatok) sokkal sztochasztikusabb, mint más mérnöki területek determinisztikus alapjai (pl. matematika, fizika, de akár a kémia). Ezt bár – főleg mérnökként – nem könnyű, de el kell fogadni, még akkor is, ha az adott szakember az egész rendszernek nem a biotechnológiai részével foglalkozik, de a tevékenysége kapcsolódik hozzá. Ugyanakkor mégsem mágia, amennyiben tudunk körültekintően bánni a számokkal. Azokat sohasem szabad ökológiai szabályok, máshol jól bevált praktikák mentén automatikusan alkalmazni. Biotechnológiai eljárás esetében – mint például az eleveniszapos szennyvíztisztítás – az adott helyszínre és problémára való megfelelő adaptálás nagy fontosságú és elengedhetetlen, hogy elkerüljük az elégtelen hatékonyságot és az igen nagy pluszköltségeket okozó tervezési és üzemeltetési hibákat.





A cikkben bemutatott témát számos esettanulmánnyal igen részletesen tárgyalja doktori értekezésem (Bakos, 2016a), amely nyilvánosan elérhető a világhálón. Jelen írás célja, hogy felkeltse az olvasó szakmai érdeklődését, rámutasson a biológiai szennyvíztisztítás biokémiai folyamatmérnöki megközelítésének hasznosságára, nélkülözhetetlenségére és szépségeire, valamint a témához kapcsolható, széles körben előforduló problémákról, azok okairól és hatékony megoldási lehetőségekről adjon színes, közérthető villámképet.

## 2. Mi a megfelelő C:N és C:P arány? Mi az elegendő szerves szénforrás- és tápanyagmennyiség – avagy ki lehet a számháborúk nyertese?

A denitrifikációt és a biológiai többletfoszfor-eltávolítást heterotróf mikroorganizmusok végzik, így a biológiai tápanyag-eltávolításnak igen nagy a biodegradálható szerves szénforrás igénye. Annak érdekében, hogy ennek az igénynek minél nagyobb részét a befolyó szennyvíz szervesanyag-tartalmából lehessen biztosítani, azaz hogy elkerülhető/mérsékelhető legyen a pótszénforrás-adagolás, rengeteg hatékony technológiát fejlesztettek ki az elődenitrifikáló rendszerektől (Ludzak és Ettinger, 1962) a UCT-technológián (Ekama et al., 1983) át a Bardenpho-eljárásig (Barnard et al., 1985), nem is beszélve ezek módosított változatairól. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy ezek nem csodás erővel rendelkeznek, mindenhol alkalmazható technológiák, hatékonyságuk és alkalmazhatóságuk alapvetően függ a helyi szennyvízminőségtől, a befolyó szennyvízre jellemző C:N aránytól.




A tudományos irodalomban találkozunk irányadó számokkal a C:N:P arányra vonatkozóan. Ezek az értékek részben a biológiai tápanyag-eltávolítás biokémiai reakcióegyenleteinek sztöchiometriájából, részben pedig konkrét mérések, vizsgálatok, laboratóriumi és nagyüzemi tapasztalatok eredményeiből becsült mutatók. Irányadóak lehetnek, de körültekintően szükséges őket alkalmazni. Például a denitrifikáció biokémiai egyenleteiből sztöchiometriailag következik, hogy 1 g nitrát-nitrogén redukációjához 2,86 g biodegradálható KOI-ra van szükség (Henze et al., 1987; Grady et al., 1999). A sztöchiometria segítségül hívása azonban nem elegendő a tervezéshez, mert számos tényező nagymértékben befolyásolja és módosítja ezt az értéket. Ilyen tényezők például: a KOI biomasszához kötött frakciója a befolyó szennyvízben, hozzáférhetőség (lebegő, kolloid vagy oldott állapot), biodegradálhatóság, sejtananyagba épülő KOI hányada, bennfoglaló technológia, azaz van-e valahol „szénforrás-pazarlás”, esetleg versengés más heterotróf mikrobákkal. Ennek megfelelően, bár az 1. táblázat pontosan és árnyaltan tartalmazza a befo-

lyó C:N arány várható nitrogéneltávolítási hatékonyságra vonatkozó tartományait és azok minősítését, a gyakorlatban még ezeket az értékeket sem szabad ökológiai szabályként minden esetben iránymutatónak tekinteni. Mivel a befolyó C:N arány alapvetően meghatározza az elérhető maximális denitrifikációs hatékonyságot, így azt mondhatjuk, hogy ez a mutató a befolyó szennyvíz ún. denitrifikációs kapacitását jellemzi. Az 1. táblázat világosan szemlélteti, hogy befolyó BOI<sub>5</sub>/NH<sub>4</sub>N arányra nézve 4–6 között szénforrásszűkösség, 4 alatt súlyos szervesanyag-hiány jelentkezik. A táblázatban nem szerepel, de amennyiben az arány 20 feletti, akkor pedig nitrogénhiánnyal szembesülünk.

| Nitrogén eltávolítási hatékonyság   | KOI/TKN | BOI <sub>5</sub> /NH <sub>4</sub> N | BOI <sub>5</sub> /TKN |
|---|---------|-------------------------------------|-----------------------|
|  | <5      | <4                                  | <2.5                  |
|  | 5 - 7   | 4 - 6                               | 2,5 - 3,5             |
|  | 7 - 9   | 6 - 8                               | 3,5 - 5               |
|  | >9      | >8                                  | >5                    |

1. táblázat: A befolyó szennyvízre jellemző, különböző komponenspárokkal kifejezett C:N arányok és a várható biológiai nitrogéneltávolítási hatékonyság kapcsolata (Grady et al., 1999)

Hasonlóképpen a befolyó C:P arányra is vannak ajánlások a szakirodalomban. Ez esetben is fontos definiálni, hogy milyen komponensekre vonatkozó koncentrációkkal fejezzük ki az egyes tartományokat. A 2. táblázatból világosan kitűnik, hogy a bioreaktor-elrendezés, azaz a megválasztott technológia alapvetően módosíthatja ezeket a tartományokat, hiszen ez jelenti a pálya adottságait a mérkőzéshez. De kulcskérdés például az is, hogy a biológiai többletfoszfor-eltávolításért felelős ún. foszforakkumuláló mikroorganizmusoknak (PAOs: Phosphorus Accumulating Organisms) kell-e versengeni a denitrifikálókkal, azaz a befolyó szennyvízben van-e jelentékeny mennyiségű eltávolítandó nitrogén (vö. 2. táblázat 1. és 2. sora).

| BPR technológia       |   | BOI <sub>5</sub> /ΔP<br>(mg BOI <sub>5</sub> / mg ΔP) | KOI/ΔP<br>(mg KOI/<br>mg ΔP) |
|-----------------------|---|---|------------------------------|
| PI. UCT, A/O N nélkül |  | 15 - 20   | 26 - 34                      |
| PI. A/O, A2/O N-nel   |  | 20 - 25   | 34 - 43                      |
| PI. Bardenpho         |  | >25   | >43                          |

2. táblázat: A befolyó szennyvízre jellemző, különböző komponenspárokkal kifejezett C:P arányok és a várható biológiai többletfoszfor-eltávolítási hatékonyság kapcsolata (Grady et al., 1999) – BOI<sub>5</sub> és KOI: koncentrációk a befolyó szennyvízben; ΔP = TPbefolyó - oldottPbefolyó

A befolyó C:N:P arányra megadható egy olyan küszöbérték, amely elérése ahhoz szükséges, hogy elkerüljük a tápanyag (N és P) hiányát. Ez különösen bizonyos nagy szerves szénforrás-tartalmú élelmiszeripari szennyvizek esetében állhat elő. Ilyen küszöbindex a BOI<sub>5</sub>:TN:TP 100:5:1 arányszám, amennyiben a biomasszahozam 0,5 g VSS/g BOI<sub>5</sub>, 10%-os N- és 2%-os P-tartalom mellett biomassza-VSS-re nézve (Jenkins et al., 2004). Ennél nagyobb arányú N és P jelenléte általában tápanyag-eltávolítást követel, ha pedig ezekből arányában kevesebb van a BOI<sub>5</sub>-koncentrációhoz képest, az tápanyaghiányhoz vezethet. Ismét fontos megjegyezni,

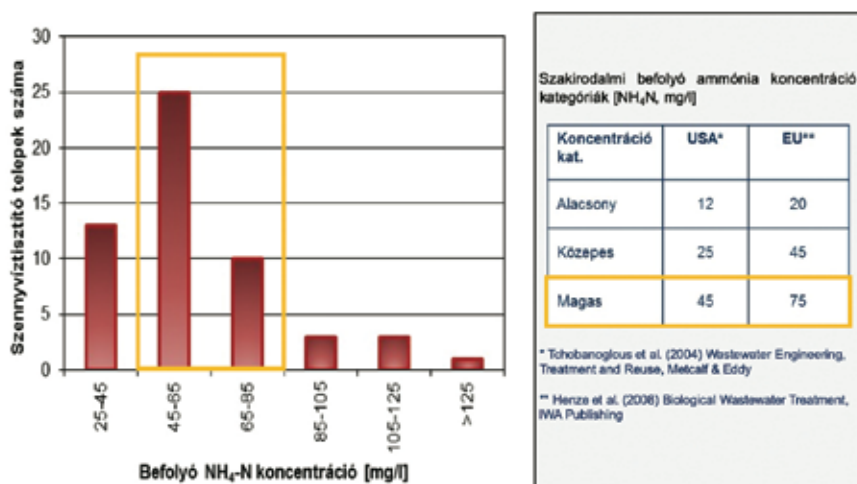
hogy ez az arányszám sem kőbe vésett, sok tényező módosíthatja (pl. a szerves szénforrás minősége, hozzáférhetősége, biodegradálhatósága).

A cikk a befolyó szennyvízre vonatkozó arányszámokról szól, azaz arra az anyagáramra, ami a telepre beérkezik. Egy mondat erejéig azonban fontos megjegyezni, hogy a C:N:P arány – pl. BOI5- vagy oldott-KOI-, összes-N- és összes-P-komponensek koncentrációival kifejezve – a csatornahálózatban a tisztítótelepre érkezést megelőzően nagymértékben változik: minél nagyobb a csatornabeli tartózkodási idő, a biodegradálható szerves szénforrás annál nagyobb része bomlik le, azaz denitrifikációs kapacitását tekintve a szennyvíz minősége kedvezőtlenül változik (a C:N arány nagymértékben csökkenhet). Ilyen aspektusból az eltúlzott méretű hálózat kialakítása, azaz a túlzott centralizáció komoly beruházási és üzemeltetési pluszkiadásokat eredményezhet a szennyvíztisztító telepeken, nem is beszélve a csatornahálózat fokozódó bűz- és korrózió-problémáinak veszélyéről.

Összegzésképpen a fejezet címében szereplő kérdésre a rövid válasz: az nyer a számháborúban, aki nemcsak leolvassa a számokat, hanem kideríti, hogy hol van a zászló elrejtve, és azt meg is szerzi, különben a sok erőfeszítésnek nem lesz meg a várt eredménye. Azaz aki pontosan tájékozódik a mutatószámokról, de azok háttérjelentéséről is, aki a befolyó szennyvíz minőségét reprezentatív mintázással, több alkalommal, részletes analitikai vizsgálatokkal feltérképezi, és nem (csak) irodalomból vagy szabványokból felkutatott szennyvízminőség-adatokra támaszkodik. Fontos tudatában lenni annak, hogy az irodalomból vett mutatószámok milyen körülmények között és milyen technológiák esetében mutatkoztak korábban érvényesnek, nem célravezető őket automatikusan bárhol alkalmazni (ld. később a 3-4. fejezetek).

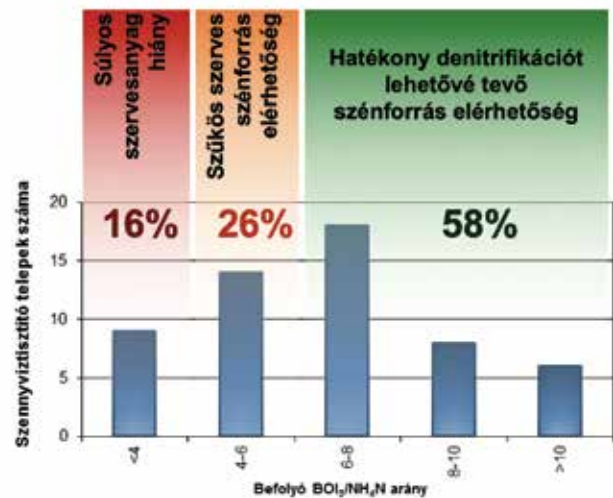
### 3. Biodegradálható szerves szénforrás szűkössége/hiánya a kommunális szennyvizekben és az ebből fakadó következmények

Hazánkban a kommunális szennyvíztisztító telepek befolyó szennyvizei igen nagy eltérést mutatnak az általánosan igen magas nitrogéntartalommal (Tardy et al., 2012). A Nyugat-Európában és Észak-Amerikában magasnak számító ammóniakoncentrációk nálunk általánosnak tekinthetők, kiterjedt vízgyűjtővel rendelkező regionális tisztítótelepek befolyó szennyvizében pedig nem ritkák akár a 100 mg/l körüli vagy afeletti összesnitrogén-koncentrációk sem (ld. 1. ábra).



1. ábra: Hazai szennyvíztisztító telepek jellemző befolyó-ammónia-N-koncentrációi nemzetközi összehasonlításban (Tardy et al., 2012)

A BME ABÉT Szennyvíztisztítási Biotechnológiák Kutatócsoport 55 hazai létesítményt megvizsgált átfogó felmérése szerint a hazai szennyvíztisztító telepek jelentős része biodegradálható szerves szénforrás szűkösségekben vagy -hiányban szenved, amint azt a 2. ábra diagramja szemlélteti (Tardy et al., 2012). Az eredmények azt mutatták, hogy a kommunális szennyvíz minősége helyről helyre is nagymértékben változik, az egységes kommunális szennyvíz-minőség fogalma meghaladott. A lakosegyenértéken alapuló tervezési gyakorlat nem tartható, a külföldről átvett technológiák pedig közvetlenül nem átvehetőek, mindez pedig súlyos tervezési és üzemeltetési hibákhoz és jelentős pluszkiadásokhoz vezethet. A kommunális szennyvizek biodegradálható szerves szénforrás hiánya egyébként egyre inkább kezd világtrenddé válni (Oleszkiewicz és Barnard, 2006; Somlyódy és Patziger, 2012; Barnard et al., 2015; Patziger, 2017).



2. ábra: Hazai szennyvíztisztító telepek jellemző befolyó-BOI<sub>5</sub>/NH<sub>4</sub>N-aránya (Tardy et al., 2012)

A szűkös befolyószénforrás-elérhetőség és az egyre szigorodó N- és P-határértékek miatt igen megelégnél a pótszénforrásként és/vagy foszforkicsapó szerként alkalmazható vegyszerek fejlesztése és eladása. Természetesen számos esetben nem (teljesen) kerülhető el a vegyszeradagolás, ugyanakkor a szennyvíztisztító telepek befolyó szennyvízből származó technológiai szerves szénforrás-„menedzsmentje” általában nem korszerű, a szerveszén-forrás jelentős része nem csak az anoxikus és anaerob heterotróf folyamatokra fordítódik, tehát ilyen értelemben pazarló a működés. A tagolatlan reaktorok, az egyidejű (egy térben zajló) nitrifikációt és denitrifikációt célzó alacsony oldottoxigén-szint mellett üzemelő (ún. low DO – Dissolved Oxygen) rendszerek vagy a ciklikusan üzemeltetett tagolatlan medencék a befolyó szennyvízből származó biodegradálható szerves szénforrás jelentős részét oxigénnel bontják le, így az nem válik elérhetővé a denitrifikáció, ill. a biológiai többletfoszfor-eltávolítás számára (Tardy et al., 2012; Bakos et al., 2020). Ezekben a szénforrást pazarló módon felhasználó rendszerekben nyilvánvalóan nem működnek, ill. sérülnek/módosulnak az előzőekben bemutatott befolyó C:N arányszámokra vonatkozó becslési tartományok is. Ugyanakkor még

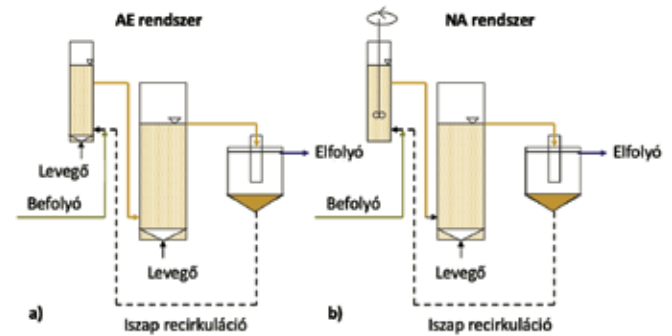


tagolt rendszerben, nem levegőztetett szelektorok alkalmazása esetén is jelentős mennyiségű szerves szénforrás veszíthető el, amennyiben az oxigén nem levegőztetett reaktorokból történő teljes kizárása nem megoldott (Jobbágy et al., 2000a; Plósz et al., 2003; Jobbágy et al., 2019).

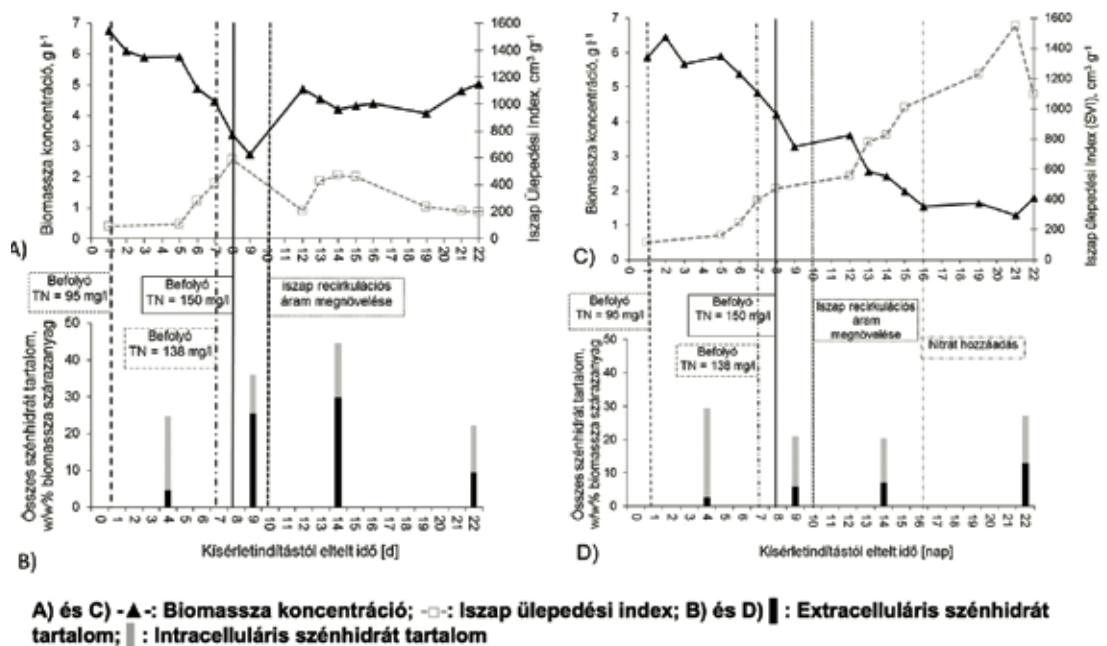
Alacsony befolyó C:N arány esetében, különösen a tagolatlan vagy nem megfelelően tagolt rendszerekben sokkal könnyebben állnak elő ún. low S – low DO körülmények (alacsony szubsztrát – alacsony oldottoxigén-koncentráció), amelyek a romló tápanyag-eltávolítási hatékonyság mellett az eleveniszap súlyos fonalásodásához vezethetnek, különösen a téli időszakban (Wanner és Jobbágy, 2014; Jobbágy et al., 2019). A befolyó szennyvíz biodegradálható szénforrásának biotechnológiai tudáson alapuló korszerű és szigorú technológiai gazdálkodásával nagyon sok esetben teljesen elkerülhető/megelőzhető vagy igen jelentős mértékben csökkenthető lenne a biológiai tápanyag-eltávolítás hatékonyságnövelését vagy a fonalások visszaszorítását korrekatív módon célzó – ráadásul nagyon sok esetben a gyakorlatban indokolatlanul túlzott mértékű – vegyszera-dagolás. (A vonatkozó lehetséges korszerű megoldások felsorolását ld. az 5. fejezetben.)

#### 4. Tápanyagszűkö-ség/hiány az ipari szennyvizekben és az ebből fakadó következmények

Bizonyos élelmiszeripari szennyvizekre (pl. borászati, szörpüzemi, üdítő- és szeszyári, édesség- és jégkrémgyártó üzemi szennyvizek stb.) rendkívül magas biodegradálható szerves szénforrás tartalom jellemző, miközben szinte egyáltalán nem tartalmaznak tápanyagokat (N- és P-vegyületeket). A súlyosan tápanyaghiányos szennyvizek kezelése során az iszapfolyók között ún. extracelluláris poliszacharidok halmozódnak fel nagy mennyiségben, ami ún. viszkózus iszap puffadáshoz és a kocsonyás állagúra változó eleveniszap ülepedetlenségéhez vezet (Jobbágy et al., 2002 és 2009). Hagyományos megoldást jelenthet tápanyaghiányos szennyvizek esetében a pót-N- és P-források adagolása. Ez esetben az üzemeltető érthető módon arra törekszik, hogy minimalizálja a beadagolandó vegyszerek mennyiségét, azaz pl. hogy a beadagolással éppen elérhető legyen a 100:5:1 (BOI5:TN:TP) arány, de ne kerüljön több tápanyag beadagolásra, egyrészt mert az is többletköltség, másrészt ha nagyobb mértékű a túladagolás, akkor tápanyag-eltávolításra lenne szükség, amire általában az ilyen célokra alkalmazott bioreaktor-elrendezések nem alkalmasak. A hagyományos póttápanyag-adagolásnak az a legnagyobb veszélye, hogy nagyon nehéz jól eltalálni vele a megfelelő dózist. Ha a fenti C:N:P arány elérésére törekszünk, de a szennyvízben levő szerves szénforrás igen jól hasznosítható (rendkívül jól biodegradálható, pl. nagyrészt szerves illósavakból áll), akkor könnyen előfordulhat, hogy a szakirodalmi arányok betartása mellett is tápanyaghiányba „csúszik” vissza a rendszer (Bakos et al., 2016b). A 3. ábrán látható két, azonos összesbioreaktor-térfogatú laboratóriumi modellrendszert tápanyaghiányos boripari



3. ábra: A laboratóriumi modellrendszerek technológiai sémája (Bakos et al., 2016b)



A) és C) ▲ - Biomassza koncentráció; ○ - Iszap ülepedési index; B) és D) ■ : Extracelluláris szénhidrát tartalom; ▨ : Intracelluláris szénhidrát tartalom

4. ábra: Az AE-modellrendszer mért a) iszapkoncentráció- és iszapülepedési indexe és b) sejtben belüli és kívüli szénhidráttartalom-értékei, valamint az NA-modellrendszer mért c) iszapkoncentráció- és iszapülepedési indexe és d) sejtben belüli és kívüli szénhidráttartalom-értékei (Bakos et al., 2016b)

műszennyvízzel tápláltuk 22 napon keresztül folyamatos üzemben. Az AE-rendszerben levegőztetett, az NA-rendszerben nem levegőztetett szelektort alkalmaztunk. A 4. ábra diagramjain látható eredmények azt mutatták, hogy a 100:5 (BOI5:TN) arányt célzó pót-N-adagolás ellenére az iszapülepedési index mindkét rendszerben jelentősen elkezdett emelkedni (ld. 4. a) és c) ábrák) mindjárt a kísérlet első hetében. Az AE (teljesen aerob) rendszerben elinduló viszkózus iszap puffadás (a sejtben kívüli poliszacharid-tartalom jelentős növekedése, ld. 4. b) ábra) a N-adagolás dózisének növelésével megfékezhető volt, az iszapülepedési index a következő 8-10 napon mérséklődött. Az NA-rendszerben azonban a kísérlet elején elindult fonalásodás a szűkös N- és P-forrás-elérhetőség mellett a N-dózis növelésével nem volt már megállítható, az eleveniszap a kísérlet végére teljesen ülepedetlenné vált, ami egyúttal a bioreaktor kimosódását is eredményezte (ld. 4. c) ábra).

Kísérletileg igazoltuk, hogy bizonyos jól biodegradálható szénforrások esetén a megszokottnál nagyobb biomasszahozam (0,7 g biomassza KOI / g szubsztrát KOI) állhat elő. Ez pedig a jól biodegradálható KOI:N arány 100:5-ről 100:7,2 értékre való tolódására utalt, azaz a vártnál jóval nagyobb N-igényt mutatott. Így tápanyaghiányos élelmiszeripari szennyvizek tisztításakor a minimális vegyszerfelhasználásra törekedő N- és P-adagolási stratégia szűkös tápanyag-elérhetőséghez, a biomassza

nemkívánatos szerkezetéhez és súlyos elválasztási problémákhoz vezethet (Bakos et al., 2016b). A hagyományos vegyszeradagolásnál biztonságosabb és célszerűbb megoldás korszerű biotechnológiával glikogénakkumuláló mikroorganizmusokat tenyészteni (Jobbágy et al., 2002; Kiss et al., 2011, Wanner és Jobbágy, 2014).

### 5. Korszerű, költségkímélő és megelőzést célzó megoldások a bioreaktor-elrendezés optimalizálására a befolyó C:N arány tükrében

Kommunális szennyvíztisztító telepeken a befolyó szerves szénforrás szűkössége vagy súlyos hiánya esetében a következő, a BME ABÉT Szennyvíztisztítási Biotechnológiai Kutatócsoport által Jobbágy Andrea vezetésével kidolgozott korszerű, alapvetően megelőzésen alapuló, költségkímélő biotechnológiai megoldások hoztak nagyüzemi referenciákkal igazolt és nemzetközileg elismert, kiemelkedő eredményeket a biológiai tápanyageltávolítás-hatékonyság növelésére és jól ülepedő eleveniszap-szerkezet elérésére (t.i. a fonalas iszappuffadás megelőzésére):

- Bioreaktorok tagolása, nem levegőztetett szelektorok alkalmazása (Chudoba et al., 1973; Jobbágy et al., 2000b; Bakos et al. 2020)
- Eleveniszapos – biofilm hibrid rendszerek integrált optimalizálása (Jobbágy et al., 2008; Bakos et al., 2013)
- Nem levegőztetett szelektorok úszó fedlappal történő lefedése az oxigén kizárására (világelső nagyüzemi alkalmazás – Jobbágy et al., 2019)
- Nagy biodegradálható szervesanyag tartalmú élelmiszeripari szennyvizek hasznosítása denitrifikációs szénforrásként a költséges pótszénforrás-adagolás elkerülésére (Weinpel et al., 2018; Bakos et al., 2020)
- Nagy szervesanyag tartalmú, vegyipari folyékony hulladékok ártalmatlanítása denitrifikációs szénforrásként való hasznosítással, egyúttal a költséges pótszénforrás-adagolás elkerülésére (Hosseini et al., 2011)

Regionális, kiterjedt csatornahálózattal rendelkező, ipari szennyvízhiánydot is fogadó kommunális szennyvíztisztító telepek esetében, ahol állandóan vagy szezonálisan és akár nagymértékben változó befolyó C:N arány mutatkozik:

- Tagolt, alternatív módon üzemeltethető reaktorokkal felszerelt, flexibilisen üzemeltethető rendszerek alkalmazása (Weinpel et al., 2018; Bakos et al., 2020)

Élelmiszeripari szennyvizek tisztítása során a befolyótápanyag-elérhetőség szűkössége vagy hiánya esetében a következő innovatív és költségkímélő megoldások hoztak nagyüzemi referenciákkal igazolt és nemzetközileg elismert, kiemelkedő eredményeket a szervesanyag tartalom hatékony csökkentésére, valamint jól ülepedő eleveniszap-szerkezet elérésére (t.i. a viszkózus iszappuffadás megelőzésére):

- Glikogénakkumuláló mikroorganizmusok elszaporítása anaerob szelektorok alkalmazásával (Jobbágy et al., 2002; Kiss et al., 2011; Jobbágy et al., 2017)

### 6. Összefoglalás

A helyi jellemző befolyószennyvíz-minőség feltérképezése és reprezentatív megismerése kulcsfontosságú a tervezési és üzemeltetési hibák megelőzésére. A befolyó C:N:P arányra vonatkozó mutatókat kizárólag átgondoltan és nagy körültekintéssel érdemes irányadónak vagy tervezést/üzemeltetést támogató információnak használni, a helyi technológia sajátosságait és szerves szénforrás gazdálkodási szorosságát, ill. korlátait és hiányosságait is elengedhetetlen pontosan megismerni. A hagyományos vegyszeradagolás nem mindig elkerülhető, ugyanakkor léteznek költségkímélő, megelőzést célzó korszerű biotechnológiai megoldások, amelyekkel a vegyszeradagolás nagymértékben mérsékelhető és sok esetben akár teljesen elhagyható volna. Regionális szennyvíztisztító

telepek esetében kiemelkedő jelentőségű volna az önkormányzat, az üzemeltető, az ipariszennyvíz-kibocsátók és a környezetvédelmi hatóság közötti intenzív, értelmes kommunikáció és együttgondolkodás, hogy egy-egy költséges beruházás eredményeképpen előáll – s végül a tenderkiírásban szereplőtől eltérően alakuló szennyvízminőséget produkáló – kudarck helyett egyedi, költséghatékony és jól működő megoldások születhessenek a települési szennyvíztisztítás területén.

### Köszönetnyilvánítás

A közlemény alapvetően a doktori munkám (Bakos, 2016a) eredményeire támaszkodva jött létre. Nem egyéni, hanem csapatmunkaként született, számos üzemeltető és ipari partner segítségével és finanszírozásával (külülük kiemelendő: FCsM Zrt., DMRV Zrt., DRV Zrt., FV Zrt.). Köszönet illeti mindenekelőtt kutatócsoportunk vezetőjét, egyúttal egykori PhD-téma-vezetőmet, Dr. Jobbágy Andrea c. egyetemi tanárt, a szennyvíztisztítási biotechnológiák területén számos világelső áttörést alkotó, nemzetközileg elismert kutatót, aki mesteremként ezt a tudományos és technológiai tématerületet velem megismertette, és akivel volt és van szerencsém annak kihívásait kutatni. A tudományos sikereken felül számos gyakorlati nagyüzemi innováció magas szintű megvalósulásában vehettem részt irányítása alatt. Köszönöm továbbá Simon József kollégámnak, a laboratóriumi és nagyüzemi kísérletek nélkülözhetetlen technikai szakemberének, hogy ötleteivel, kreatív és fáradhatatlan erőfeszítéseivel az eredményekhez vezető gyakorlati munkát megfelelőképpen hajthattuk végre, és annak fortélyait tőle elsajátíthattam.

### Irodalomjegyzék

- Bakos, V., Tardy, G., Palkó, Gy., Jobbágy, A. (2013): Pilot-Scale verification of efficient nitrifier backseeding in a combined activated sludge – biofilm system, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 57(1-2), 93–99.
- Bakos, V. (2016a): A szénforrás és a tápanyag elérhetőség szerepe az eleveniszap szerkezet kialakulásában és a bioreaktor elrendezés optimalizálásában, *Doktori értekezés, BME Alkalmazott Biotechnológia Tanszék, Budapest.*
- Bakos, V., Kiss, B. and Jobbágy, A. (2016b): Problems and causes of marginal nutrient availability in winery wastewater treatment, *Acta Alimentaria*, 45(4), 532–541.
- Bakos, V., Szombathy, P., Simon, J., Jobbágy, A. (2020): Implementing cost-effective co-treatment of domestic and food-industrial wastewater by novel methods for estimating industrial load, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, *Közlésre elfogadva: 2020. február.*
- Barnard, J., Stevens, G. M., and Leslie, P. J. (1985): Design strategies for nutrient removal plant, *Water Science and Technology*, 17, 233–242.
- Barnard, J. L., Yu, W., Steichen, M. T. and Dunlap, P. (2015): Design of large BNR plant for State Capital of California. In: 12th IWA Specialised Conference on LWWTs, 6–9 September, 2015, Prague, Czech Republic. Proc. 27–32.
- Chudoba, J., Grau, P., and Ottová, V. (1973): Control of activated sludge filamentous bulking – II. Selection of microorganisms by means of selector, *Water Research*, 7, 1389–1406.
- Ekama, G.A., Siebritz, I.P., Marais, G.V.R. (1983): Considerations in the process design of nutrient removal activated sludge processes, *Water Science and Technology*, 15(3/4), 283–318.
- Grady, C.P.L. Jr., Daigger, G.T., Lim, H.C. (1999): *Biological Wastewater Treatment*, 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel.
- Henze, M., Grady Jr, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.V.R. and Matsuo, T. (1987): A general model for single-sludge wastewater treatment systems, *Water Research*, 21(5), 505–515.
- Hosseini, A., M., Bakos, V., Jobbágy, A., Tardy, G., Mizsey, P., Makó, M., Tungler, A. (2011): Co-treatment and utilisation of liquid pharmaceutical wastes. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 55(1), 3–10.
- Jenkins, D., Richard, M.G., Daigger, G.T. (2004): *Manual on the causes and control of*

- activated sludge bulking and foaming, 3rd edition, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, US.
- Jobbágy, A., Simon, J., Plósz, B. Gy., (2000a): The impact of oxygen penetration on the estimation of denitrification rates in anoxic processes, *Water Research*, 34(9), 2606-2609.
- Jobbágy, A., Literáthy, B., Farkas, F., Garai, Gy. and Kovács, Gy. (2000b): Evolution of the Southpest Wastewater Treatment Plant, *Water Science and Technology*, 41(9), 7-14.
- Jobbágy, A., Literáthy, B., Tardy, G. (2002): Implementation of glycogen accumulating bacteria in treating nutrient-deficient wastewater, *Water Science and Technology*, 46, 185-190.
- Jobbágy, A., Tardy, G. M., Palkó, Gy., Benáková, A., Krhutková, O. and Wanner, J. (2008): Savings with upgraded performance through improved activated sludge denitrification in the combined activated sludge - biofilter system of the Southpest Wastewater Treatment Plant, *Water Science and Technology*, 57(8), 1287-1293.
- Jobbágy, A., Kiss, B., Bakos, V., Tardy, G. (2009): Activated sludge nuisances in a vegetable processing wastewater pretreatment plant, *Acta Alimentaria*, 38, 393-404.
- Jobbágy, A., Kiss, B. and Bakos, V. (2017): Conditions favoring proliferation of Glycogen Accumulating Organisms for excess biological carbon removal in treating nutrient deficient wastewater, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 61(3), 149-155.
- Jobbágy, A., Weinpel, T., Bakos, V. and Vánkos, Zs. (2019): Use of floating seals to exclude oxygen penetration in non-aerated selectors, *Water Science and Technology*, 80(2), 357-364.
- Kiss, B., Bakos, V., Liu, W. T., Jobbágy, A. (2011): Full-scale use of glycogen-accumulating organisms for excess biological carbon removal, *Water Environment Research*, 83(9), 855-864.
- Ludzack, F.J. and Ettinger, M.B. (1962): Controlling operation to minimize activated sludge effluent nitrogen, *Water Pollution Control Federation*, 34, 920-931.
- Oleszkiewicz, J.A. and Barnard, J.L. (2006): Nutrient removal technology in North America and the European Union: a review, *Water Quality Research Journal*, 41(4), 449-462.
- Patziger, M. (2017): Efficiency and development strategies of medium-sized wastewater treatment plants in Central and Eastern Europe: results of a long-term investigation program in Hungary, *Journal of Environmental Engineering*, 143(6), 04017008-1 - 7.
- Plósz, B. Gy., Jobbágy, A., Grady Jr., C.P.L. (2003): Factors influencing deterioration of denitrification by oxygen entering an anoxic reactor through the surface, *Water Research*, 37, 853-863.
- Somlyódy, L. and Patziger, M. (2012): Urban wastewater development in Central and Eastern Europe, *Water Science and Technology*, 66(5), 1081-1087.
- 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.
- Wanner, J. and Jobbágy, A. (2014) Activated sludge solids separations. Chapter 10 in *Activated sludge - 100 years and counting*, Eds. Jenkins, D. and Wanner, J., 2014 IWA Publishing, Glasgow, ISBN 9781780404936, 171-193.
- Weinpel, T., Bakos, V. and Jobbágy, A. (2018): Co-treatment of a carbon deficient domestic wastewater with a dairy process effluent for a cost-effective global solution. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(4), 432-440.

## FRISS EREDMÉNYEK A KLÓROZÁSOS IVÓVÍZKEZELÉS KÉMIÁJÁBAN



**KIVONAT** A klórozásos ivóvízkezelés során környezetszennyező, illetve egészségre káros vegyületek is megjelennek. Ezek minősége és mennyisége függ az aktuális antropogén hatásoktól. Az analitikai kémiai módszerek folyamatos fejlődése egyre pontosabb képet nyújt a nemkívánatos vegyületek koncentrációjáról és képződésük mechanizmusáról; mindez lehetővé teszi, hogy hatékonyabb technológiai és kontrollstratégiákat lehessen kidolgozni. A cikk néhány új eredményt mutat be a klórozásos ivóvízkezelés kémiájából, illusztrálva a szakterület folyamatos fejlődését. Bemutatunk új klórozási melléktermékeket és új mérési technikákat, valamint példát mutatunk arra, hogyan lehet pontos mérésekkel pontosabb reakciómodelleket felállítani.



**KULCSSZAVAK** vízkezelés, klórozási melléktermék, trihalometán, klóramin, reaktív köztitermék, reakciómechanizmus, melléktermék-analízis, oxidáció

**FEHÉR PÉTER PÁL** Természettudományi Kutatóközpont, Budapest, [feher.peter@ttk.mta.hu](mailto:feher.peter@ttk.mta.hu)  
**STIRLING ANDRÁS** Természettudományi Kutatóközpont, Budapest, [stirling.andras@ttk.mta.hu](mailto:stirling.andras@ttk.mta.hu)  
**FÁBIÁN ISTVÁN** Debreceni Egyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, [ifabian@science.unideb.hu](mailto:ifabian@science.unideb.hu)

### Bevezetés

Az ivóvíz tisztaságának biztosítása alapvető és kiemelten lényeges hatósági feladat. Fontossága miatt mind a szakma, mind pedig a nagyközönség figyelmének középpontjában áll. A minőségi követelmények és azok ellenőrzése szigorúan szabályozott.[1] A vízszennyezők azonban

változnak, annak megfelelően, hogy a mezőgazdasági, ipari, gyógyászati vagy éppen az orvosi diagnosztikai tevékenységekben milyen vegyszerek kerülnek előtérbe. Az analitika és mérés technika fejlődése egyre pontosabb és részletesebb vízminőség-monitorozást tesz lehetővé. Ennek köszönhetően mélyebb ismereteket szerezhetünk a vízben lejátszódó ké-