

A SZENNYVÍZTISZTÍTÁS KIALAKULÁSA ÉS JELENLEGI FEJLESZTÉSI IRÁNYAI II. RÉSZ

DR KÁRPÁTI ÁRPÁD
PANNON EGYETEM

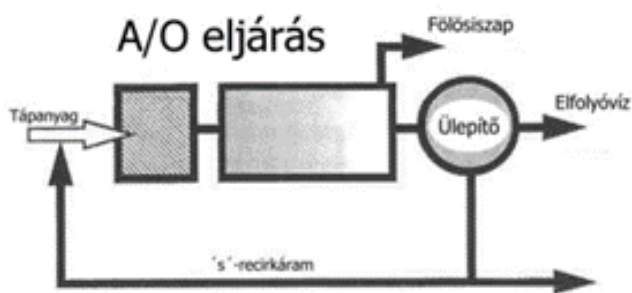
1. A NITROGÉNFORMÁK ÉS FOSZFÁT ELTÁVOLÍTÁSA TECHNOLÓGIÁINAK KIALAKÍTÁSA

A múlt század 60-as éveinek elejére a biológiai szennyvíztisztításnak, vagy eleveniszapos szennyvíztisztításnak, amely annak meghatározó részévé nőtt, az alapjai gyakorlatilag ismertté váltak és alkalmazásra, a technológiai fejlesztések során bevezetésre kerültek. Egy ideális kommunális szennyvíztisztító ennek megfelelően egy nagyterhelésű eleveniszapos lépcső, majd azt követő nitrifikációs rész együttese volt. A szerves anyag eltávolításához viszonylag rövid tartózkodási időt kellett csak biztosítani a levegőztető medencében. Egy utónitrifikációs medencetér, vagy csepegtetőtest ilyenkor a kis szerves anyag terhelés eredményeként nagyon hatékonyan biztosíthatta a nitrifikációt, valamint a maradék vagy nehezen bontható szerves anyagok utótisztítását. Tisztán eleveniszapos kialakításnál a levegőztető medencét viszont számtalan kisebb egységre lehetett osztani a levegőbevitel, illetőleg a nitrifikáció optimalizálására. Az üzem tisztítási hatékonysága és gazdaságossága érdekében ez világszerte általánossá vált. Az előülepítést hasonló célból nagyon sokszor szükségtelennek találták, és ezzel javították az eleveniszapos rész tápanyag

ellátottságát, illetőleg a denitrifikáció lehetőségét a rendszerben. Az utóbbihoz az eleveniszap mennyisége szükségszerűen módosult, mintegy másfélszeresére kellett növekedjen (hasonlóan az iszapkoré is) illetőleg a fajlagos fölösiszap hozam mennyisége csökkent valamelyest, de az iszap végső feldolgozására továbbra is az anaerob iszaprothasztó maradt, amely a metán révén a szerves anyaggal érkező energia egy részét ismételten hasznosíthatóvá tette a szennyvíztisztítóban.

A múlt század hatvanas éveire bebizonyosodott, hogy míg az szerves anyag és az ammónium oxidációjához elengedhetetlen az oxigén, míg az utóbbiból keletkező nitrát redukációjához éppen annak a hiánya, vagy korlátossága szükséges. A két különböző környezet biztosításához folyamatos szennyvíz betáplálásnál egyetlen levegőztetett medence elégtelen. A hatásos denitrifikációhoz tehát ilyenkor elkülönített iszapos térfogatokat kell biztosítani. Mivel a nitrát redukációját is a szerves anyag oxidációját végző mikroorganizmus csoportok (heterotrofok) végzik, az oxigénhiányos (anoxikus) medencetérnek meg kell előzni a levegőztetett medencetérrel.

Abban megfelelő keverést is kell biztosítani, ugyanakkor az utóbbiban keletkező nitrátot vissza kell vinni a nem levegőztetett első térrészbe (elődenitrifikáció) a redukcióhoz. A denitrifikáció szerves tápanyag igényének, sebességének a biztosítása a szerves anyag oxidáló heterotrófokkal így biztosítható optimálisan (1. ábra).



1. ábra. Folyamatos betáplálású eleveniszapos szennyvíztisztító elődenitrifikációval, nagykörös nitrárecirkulációval és nem hagyományos fülösiszap elvétellel (Fazekas et al., 2014).

Az ilyen megoldás szükségessé teszi az utóülepítőt. Megoldható ugyanakkor az utóülepítés a levegőztető medencében is, ha 2-3 párhuzamosan üzemelő, ciklikus betáplálású (SBR) egységgel kerül a szennyvíztisztítás kialakításra. Ráadásul ekkor a betáplálási szakasz hosszabb-rövidebb részében szükségtelen a levegőztetés (anoxikus szakasz), vagy akár több szakaszban is vihető be friss nyers szennyvíz a denitrifikáció fokozására. Az ilyen megoldások azonban a szabályozás fejletlensége miatt inkább csak a múlt század nyolcvanas éveit követően kerültek kiépítésre.

A denitrifikáció fejlesztési vonalát valamelyest megzavarta a század hetvenes éveitől a foszfát fokozottabb eltávolításának az igénye. A jelentősebb foszforkibocsátás hatására ugyanis az eutrofizáció erősen fokozódott olyan területeken is, amelyeken korábban ennek a kellemetlen

szerves anyag vagy algatermelésnek a hatásait még nem érzékelték. A Balti- és az Északi-tengeren, amely Angliából, Hollandiából, Németországból és Dániából kapta a vízszennyezését, nagyon jelentős algavirágzást vagy algarobbanást tapasztaltak, amely egyértelműen a szennyvizekkel megnövelt nitrogén terhelés eredménye volt. Ennek az új problémának a kiküszöbölésére, megszüntetésére szükségessé vált a szennyvíztisztítási technológiák további fejlesztése, valamint a foszfor eltávolításának olcsóbb, egyszerűbb módszerrel történő biztosítása.

A befogadók foszfor terhelésének csökkentésére szerencsés felismerés volt a szennyvíztisztításnál a múlt század hetvenes éveinek elején, hogy a viszonylagosan fülöslegben érkező foszfát megfelelő eltávolítása nem csak annak a vegyszeres kicsapásával lehetséges, hanem speciális rendszerkialakítással, többletfoszfor felvételére alkalmas ugyancsak heterotrof fajok elszaporításával is lehetséges. Ezek kis móltömegű illó savak (elsősorban ecetsav) oxigén és nitrátmentes környezetben történő felvételével, betárolásával kerülnek versenyelőnybe a nagyobb részarányt képviselő többi heterotrof fajokkal. Speciális tápanyag betárolásuk (poly-hydroxi-alkanoátok) energiaigényét a sejteikben (foszfor akkumuláló heterotrofok – PAH) felhalmozott polifoszfátok depolimerizációjából származó energiával fedezik. Természetesen ekkor a depolimerizált foszfát a vízfázisba kerül. Ezt követően viszont nitrátos, vagy oxigénese környezetbe kerülve képességük fokozására még több orto-foszfátot vesznek fel a sejteikbe, s polimerizálják azt a ciklus rendszeres folytatásához. A heterotrofok átlagos 1,5 %-nyi foszfor tartalmához képest a PAH fajok annak a 10-20 szorosát is képesek felvenni, s ezzel a kevert iszap foszfor tartalmát



2. ábra. Folyamatos betáplálású eleveniszapos szennyvíztisztító foszfor és nitrogéneltávolító technológia nagykörös iszapecirkulációval és belső körös nitrátrecirkulációval.

a 3-4-szeresre növelni. Ez viszont biztosíthatja a lakossági szennyvíz teljes foszfát tartalmának a főlérszapba vitelét. Ehhez azonban elengedhetetlen, hogy az anaerob környezetet biztosító eleveniszapos tér a medencesor első egysége legyen az érkező nyers szennyvíz fogadásával. A biológiai többletfoszfor eltávolító technológiák kiépítésére éppen ezért 1972-től, kombinálva a denitrifikációval számos több lépcsős kialakítással is sor került, melyeknek talán legegyszerűbbike a 2. ábrán látható (Fazekas et al., 2014).

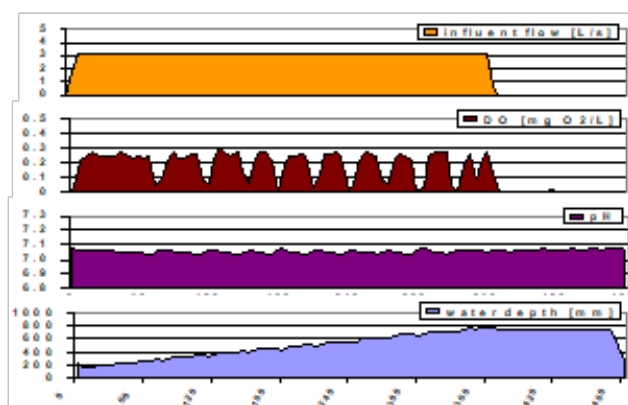
A fokozott nitrogén és foszfor eltávolításhoz azonban a biológiai tisztításnál fokozott mennyiségű szerves szén kell, ami egyértelművé tette, hogy a kommunális szennyvizek ilyen tisztítási folyamatait optimalizálni kell a szerves szén felhasználása tekintetében. Az erre vonatkozó kutatások jelenleg is folyamatban vannak. Emellett a fenti eleven működő reaktorkombinációk, vagy inkább cikluskialakítások szakaszos betáplálású megoldásokkal is megvalósításra kerültek.

Az SBR rendszerek időben ciklizált (betáplálású és levegőztetésű), szakaszos üzemű instacioner rendszerek melyeket több párhuzamos reaktoral kell kiépíteni. Egy időben rendszerint csak egy egységbe történik nyersvíz betáplálás. A reaktorokat valamilyen program szerint feltöltik, keverik,

levegőztetik, ülepítik, majd leürítik – hasonlóan a korai eleveniszapos rendszerekhez. Így biztosítottá válik, hogy a biológiai reakció szakasza és hogy az ülepítés után tiszta és megfelelő mértékben kezelt víz legyen elvehető a tisztítóból. Ezen fázisok időtartamával, illetőleg a felsorolt műveletek idejének, sorrendjének változtatásával optimalizálva a mikroorganizmusoknak szükséges körülményeket optimalizálható a tisztítás hatásfoka is. A laboratóriumi körülményektől kezdve egészen a nagy volumenű, városokat kiszolgálni képes üzemméretig az alkalmazások teljes skálájában működtethető az ilyen változatnál is a szennyvíztisztítás.

A korábban említett ammónium jobb hatásfokkal történő eltávolítása a nitrifikációs/denitrifikációs úton túl a rothasztás meleg iszapvizéből napjainkban már energiatakarékosabban is történhet. Erre viszont megint csak a nagy szennyvíztisztító esetében adódik lehetőség. Ennél a nitrogéneltávolítás csak autotrof mikroorganizmusokkal történik (nitritálók és anammoxok), melyekhez nem kell szerves anyag sem, viszont valamiből szükségük van szaporodásukhoz hidrogénkarbonátra. Ilyenkor két ammónium ion nitrogénje inertizálható másfél molekula oxigénnel, ami fele a nitrifikáció/denitrifikáció fajlagos oxigénigényének. Az Anammox fajok

elszaporítása ugyanakkor nagyon lassú, rendkívül szabályozásigényes. A megoldás jelentőségét az is csökkenti, hogy a szennyvíztisztítóba kerülő ammóniumnak csak alig valamivel több, mint 10 %-a kerül rögzítésre a szennyvíziszapba. A felének a metánná és széndioxiddá alakulása során így csak mintegy 5 %-a kerül be az iszapvízbe, hogy abból az említett, tengereinkben évmilliárdokkal ezelőtt bőségesen jelen volt Anammox mikroorganizmusokkal inertizálódjon elemi nitrogénné. Magát a technológia speciális iszapvíz betáplálással SBR üzemmódban sikerült megvalósítani 2004-2006 között Ausztriában, majd Hollandiában. Rendkívül kényes a mezofil hőmérsékletre, a pH-ra és a szabályozásra is, ezért hazánkban csak két szennyvíztisztítóban került eddig kiépítésre. Külön érdekessége, hogy az anammox iszap rózsaszín-piros színű apró golyócskába granulálódik. A világon elsőként kiépített Straas-i anammox egység és szabályozása a 3. ábrán látható.



A jelenlegi fejlesztések kívánatos eredménye lehet, ha ezt a megoldást a tisztítás főágán is alkalmazni lehetne, amihez azonban a ott a szennyvíz hőmérséklete, nagy szerves anyag, ugyan akkor kis ammónium tartalma, no meg a szabályozás szinte megoldhatatlan kivitelezése sem ad lehetőséget.

2. INTENZÍV ANAEROB SZENNYVÍZTISZTÍTÁS KIALAKÍTÁSA.

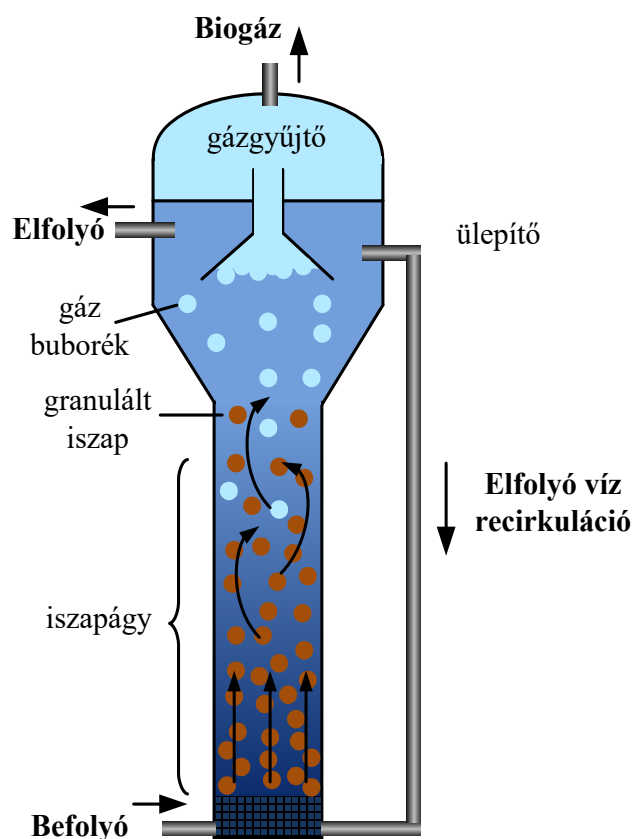
Az anaerob iszaprothasztás felismerését, kidolgozását követően hosszú ideig úgy tűnt, hogy ennek az iszap-feldolgozási vagy szennyvíztisztítási módszernek már nincs további fejlesztési lehetősége. A megfelelő fűtött anaerob iszaprothasztók szintjén megállt a fejlesztés. A 70-es évek elejétől azonban ez a terület is újra fejlődésnek indult. A lehetőségekre a korábbi vizsgálatoknál ugyan már voltak jelek, de az igazi áttörést a 70-es évek eredményei jelentették. Ekkor tisztázódott az anaerob iszaprothasztás többlépcsős mechanizmusa, melyben három kölcsönösen vagy szintropikusan együtt élő mikroorganizmus csoport végzi a nagy molekulatömegű szerves anyagok metánná és széndioxiddá történő alakítását. A három mikroorganizmus csoport tevékenységének, kölcsönhatásának pontosításával vált lehetővé olyan speciális iszapkezelési technika, majd később nagy koncentrációjú, elsősorban oldott természetes szerves tápanyagokat tartalmazó élelmiszeripari szennyvizek tisztítására alkalmas módszer kidolgozása, amely később más ipari szennyvizek tisztítását is jelentősen

3. ábra. Szeparált nitrogéneltávolítás az iszaprothasztás iszapvízéből a Straas-i (Ausztria) előülepítőből átalakított SBR üzemű deammonifikálóban. Grafikonok: iszapvíz feladás, oldott DO koncentráció, pH és folyadékmagasság alakulása a 8 órás ciklusnál.

átalakította. Korábban az ilyen szennyvizek tisztítása az eleveniszapos rendszerekre hárult és azokban nagyon sok esetben iszapduzzadást eredményezett. A csepegtetőtesteknél ezzel szemben a nagy terhelés eliszaposodást, eltömődést okozott. Az új megoldással az iszap, vagy tömény szennyvíz anaerob feldolgozása optimalizált körülmények között történt, sokkal nagyobb térfogati terheléssel, mint a korábbi rothasztóknál.

Az első ilyen megoldásoknál az iszap rothasztását jól, rosszabbul átkevert tankreaktorokban végezték. Esetenként az ilyen tisztításnál iszap-recirkulációt is alkalmaztak a jobb keverés, összetétel kiegyenlítés érdekében. A hetvenes évek elejétől ilyen, tömény (lebegőanyag mentes, 5000 mg KOI/liternél töményebb) élelmiszeripari szennyvizek gyors fermentációját lebegtetett vagy fluid iszapágyas reaktorokban végezték. Később továbbfejlesztésük az expandált ágyas megoldásokhoz vezetett (Lettinga et al., 1980, Winter, 1984), melyekben a kedvező hidrodinamikai körülmények, valamint a mikro-tápanyag ellátottság optimalizálásával a különböző mikro-organizmus fajok olyan együttese alakulhatott ki, melyek optimális lebontási sebességet, s egyidejűleg különösen sűrű (60 g/l), úgynevezett granulált iszapot eredményeztet. Ez tízszerese iszapkoncentráció az aerob eleveniszapos rendszerekének. Értelemszerűen térfogati teljesítményben is azokénak a tízszeresére lett képes. A kedvező, expandált ágyas reaktorkialakítás a 4. ábrán látható.

Valójában ez volt az első eset, amikor iszapgranuláció, s annak a kedvező hatása jelentkezett a szennyvíztisztításnál. Az ekkor keletkező iszapgolyócskák viszonylag nagyobb, stabil képződmények. Színük a környezetnek megfelelően



4. ábra. Expandált granulált iszap ágyas reaktor (EGSB) (5-10, de néha 20 m/h folyadék feláramlási sebesség mellett az ábráról leghagyott gázrecirkuláció is gyakorlat).

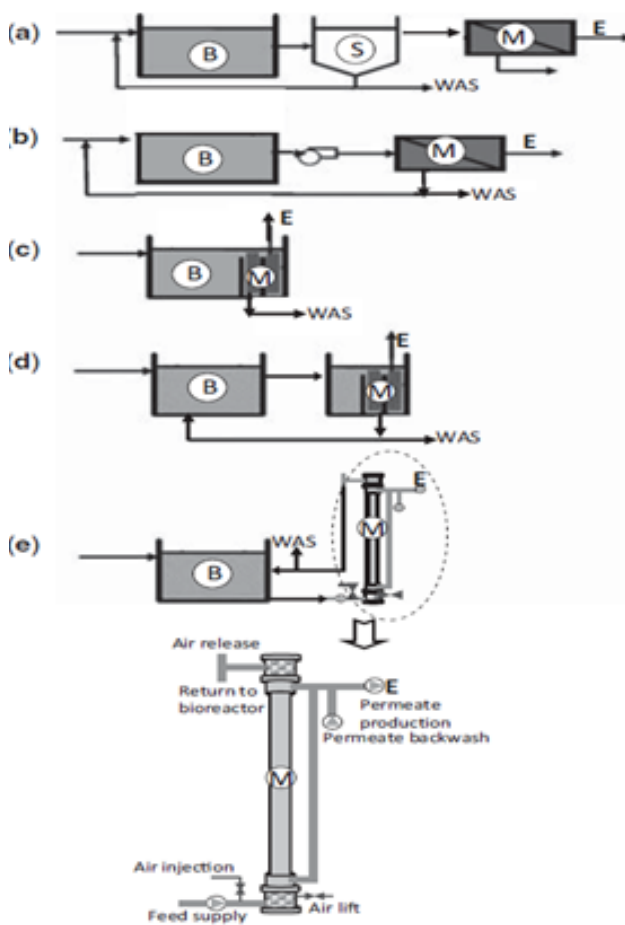
egyértelműen fekete. Egységeik térfogati terhelhetősége az eleveniszapos tisztítókének a tízszerese is lehet. Ennek megfelelően tömény élelmiszeripari szennyvizek intenzív anaerob előtisztítására bizonyultak elsősorban alkalmasnak. Egyéb ipari szennyvizeknél (bőr, papír, gyógyszeripar) sajnos érzékeny a granulum a lemergezésekre. A tisztított vizeikben maradó szerves anyag koncentrációja is elég jelentős, amiért arra további aerob tisztítás kiépítése elengedhetetlen (Fazekas et al., 2014).

3. ISZAPÜLEPÍTÉS CSERÉJE ULTRASZŰRÉSRE

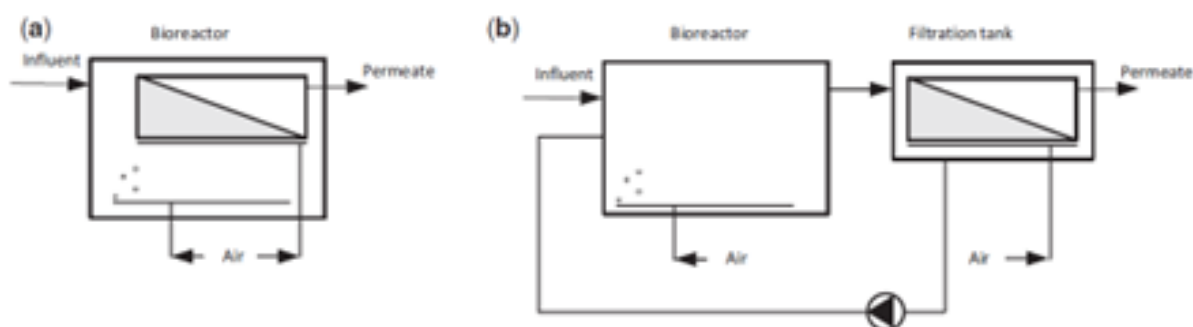
A korábbi évtizedekben kizárólagosan gravitációs ülepítéssel különítették el a tisztított vizet a szennyvíziszaptól. A múlt század kilencvenes éveinek elejére azonban a szűrőmembránok fejlődése révén már lehetőség adódott az ultraszűréssel történő iszapvisszatartásra is. Lévéen a szűrő résmérete 0,02-0,04 mikron közötti, jobb iszap és makromolekula szeparációt, s azzal jóval tisztább elfolyóvizet biztosít. Igaz ez a mikrobiális fertőző ágensek visszatartására is. Az ultraszűrőn keresztül már gyakorlatilag csak a vírusok juthatnak ki a szennyvíztisztítóból. A membránszűrős (ultraszűrős), iszap-szeparációs biológiai szennyvíztisztítókat általánosan membrán bioreaktoroknak (MBR) nevezik. Emellett azonban a membránok egyéb beépítési lehetősége is ismeretes a szennyvíztisztításba, például a gazdaságosabb levegőztetés érdekében, amely azonban ma még nem tekinthető általánosan alkalmazottnak (legutolsó fejlesztés).

Az eleveniszap membrános szeparációjának az öt ugrásszerű fejlődéséről, gyakorlati kiépítéséről mintegy három évtizede beszélhetünk (Yamamoto et al. 1989). A fejlődés menetét az ötödik ábra szemlélteti. Kezdetben a gravitációs ülepítés után további lebegőanyag eltávolításra (harmadfokú tisztítás) próbálták beépíteni a tisztításba (5.a ábra). Nagyjából egyidejűleg került beépítésre az utóülepítés helyére a membránszűrő (5.b ábra). A levegőztető medencébe történő behelyezése, s a tisztított víz membránszűrőből történő eltávolítása volt persze igazán forradalmi lépés (Yamamoto et al. 1989) (5.c ábra). Hamarosan kialakult ezután annak egy szeparált térben történő elhelyezési változata is (5.d ábra). Az első megoldás nagy

üzemméretnél, híg szennyvizek esetében költségtakarékosabb, míg a második a kisebb, töményebb vizeket tisztító egységeknél. Az utóbbi változat fejlesztésében jelenleg a membránfelület air-lift jellegű folyamatos felülettisztítása az egyik utolsó előrelépés (Pearce, 2008) (5. e ábra).



5. ábra. A szűrőmembránok beépítési lehetősége az eleveniszapos tisztítóba: a- hagyományos AS megoldás utólagos szűréssel (harmadfokú tisztítás), b- membránszűrés gravitációs ülepítés helyett, c- iszapos medencébe merülő membránszűrő, d- elkülönített térben történő iszapszűrés, e- levegőztetett szűrőcsöves, elkülönítetten kiépített membránszűrés. B = bioreaktor, S = gravitációs iszapülepítő, M=szűrőmembrán, E = tisztított víz (permeátum), WAS = eltávolított fölösiszap



6. ábra. A szűrőmembrán iszapos vízbe történő beépítésének a két változata.

Az MBR szennyvíztisztítás nagyarányú terjedése a jövőben a víz újrafelhasználása érdekében az elérhető előnyök eredménye (Bérubé, 2010). Különösen az utóbbi két évtizedben épültek nagy számban mind régi eleveniszapos üzemek felújítása, mind azok kapacitásnövelése során. Napjaink gyakorlata azt mutatja, hogy az aerob szennyvíztisztításnál az eleveniszap mikro-, vagy ultraszűrése (MF ill. UF) elsősorban a nagyobb telepeken kerül kiépítésre. Az 5. ábra az iszapos vízbe merülő ultraszűrők és a bioreaktor kombinációjának lehetőségeit mutatja be. Természetesen a bioreaktor egy teljes szerves anyag oxidációt és N és P tápanyag eltávolítást végző MBR tisztítóban a hagyományos eleveniszaposakéhoz hasonlóan több reaktortérből kell kiépülnön (A2/O rendszerben).

Az a megoldással kisebb medencetérfogat (alapterület igény) és nagyobb iszapkoncentráció érhető el. Ennél az iszapos víz recirkulációja sem jelent költséget. Kis telepeknél akár a membrán alsó levegőztetése is biztosíthatja a biológia oxigénigényét. Az ultraszűrő szeparált medencetérbe történő elhelyezése – b megoldás- viszont lehetővé teszi a nagymedence térrészekre osztását (anaerob, anoxikus), lehetővé téve a jó denitrifikációt és biológiai többletfoszfor eltávolítást is. Ekkor a szűrés és biológia

külön-külön is optimalizálható. Így a vízhozam ingadozása is valamivel jobban kompenzálható a szűrés tekintetében.

Az MBR tisztítóknál a durva darabos vagy szálas anyagrészek előzetes eltávolítása a szennyvízből elengedhetetlen. A nagyobb tisztítóknál ez egész műveletsort is jelenthet, de a közepesekeknél rendszerint csak egy mechanikus szűrés. A membrán előtt azonban az 1-3 mm részméretű szűrők beépítése mindenképpen ajánlatos. Leggyakrabban kettős szűrést is végeznek, amikor az első 2-6 mm részméretű, míg a második 0,5-3 mm-es. Rendszerint közöttük építik be a homok és zsírfogást. A zsír különösen hidegben blokkolhatja a szűrőfelületet. Ettől függetlenül a membránfelület folyamatos eltömődése, illetőleg megakadályozása az üzemeltetés meghatározója. A szűrés stabilizálására a membrán felületét folyamatosan durva levegőbuborékokkal történő folyadékkeveréssel tisztítják. Ezen túl a membrán eltömődését megakadályozandó rendszeres (ciklikus) membrán visszamosást, vegyszeres tisztításokat is kell az üzemeltetésnél alkalmazni.

A membránszűrés esetében a rendszerben kialakuló iszap mikrobiális összetétele hasonló a hagyományos eleveniszapéhoz, viszont annak

4. MOZGÓ ÁGYAS BIOFILMES REAKTOROK (MBBR), HIBRID RENDSZEREK KIALAKÍTÁSA

a pelyheinél sokkal finomabb szerkezetű kolloid rendszert képez. A szűréssel elérhető, hogy a medencék iszapkoncentrációját akár 20 g/l nagyságúra, tehát az eleveniszapénak a négy-szeresére is növeljék, ami elvileg a térfogati teljesítményt is így növelhetné. A gyakorlatban azonban 10-12 g/l körül megállnak a membrán eltömődésének csökkentése, valamint a jó levegőellátás (oxigén) érdekében. Ezzel is mintegy 1,5-2 kg KOI/m³d tisztítóteljesítményt lehet így elérni. Ez azt is jelenti, hogy az MBR kiépítés már mintegy 70 %-os területigénnyel megoldható, mint a hagyományos eleveniszapos. Ezzel szemben az ultraszűrők ára még napjainkban is elég jelentősre növeli az ilyen rendszerek beruházásigényét. Ehhez a levegőellátás eleveniszaposénál nagyobb fajlagos költsége, és egyéb üzemeltetési költségek is elég jelentősek. A membránszűrő ciklusában folyamatosan gondoskodni kell az iszapréteg vastagságának csökkentéséről, a szűrőteljesítmény minél hosszabb ideig történő fenntartásáról. A gyakorlatban legtöbbször alkalmazott megoldások a következők:

- Levegőárammal történő membránfelület tisztítás iszapoldalon,
- Időszakos szűrés leállítással levegőztetés mellett,
- Adsorbens/koaguláns bevitele az iszapba (aktívszén ajánlott),
- Membrán visszamosás, vegyszeres membrántisztítás, mechanikus tisztítás.

A membrános iszap-szeparációval ugyanakkor a lakossági szennyvizekből egy további újrafelhasználásra, sokkal kevesebb költséggel hasznosítható tisztított vizet lehet előállítani.

A biofilm nitrifikációt végző mikroorganizmusok koncentrálására történő hasznosítását már a csepegtetőtestes szennyvíztisztításnál is érzékelték. Később, amikor a műanyag hordozólemezeket mártottak be eleveniszapos medencékbe, ugyancsak tapasztalták ugyanezt. Célszerűnek látszott tehát olyan eleveniszapos – biofilmes hibrid rendszerek kialakítása, melyek mindkét változat előnyeit maximálisan érvényre tudják juttatni. A múlt század nyolcvanas éveiben végül norvég kutatóknak sikerült olyan kis méretű műanyag elemeket, hordozókat gyártani, melyek az eleveniszapos folyadékkeverékben mozogva, lebegve, jó oxigénellátást tudtak biztosítani a biofilmnek, s az eleveniszap résznek egyaránt (Fazekas et al., 2015). Lehetővé tették a maximális sebességű szerves anyag eltávolítást a mobil iszapréteg révén, valamint a hasonló nitrifikációt a biofilm révén. A biofilm részben a denitrifikációt is javította, de megfelelő anoxikus terek kialakításával és nitrátrecirkulációval az eleveniszap hagyományos A2/O rendszerű forgatásával még tovább csökkenthetnék a tisztított víz nitrát tartalmát. Anaerob/anoxikus/oxikus medencesor esetén az anaerob medencébe teljesen szükségtelen a biofilm hordozó, de akár az anoxikus medencéből is elhagyható az. A mozgó ágyas biofilmes reaktoroknak (MBBR) az alapvető előnye a rögzített filmes rendszerekkel szemben, hogy ez biztosítani tudja a biofilm és az eleveniszap előnyeit is, miközben a már említett gátló hatások sokkal kevésbé érvényesülnek, éppen a biofilm folyamatos mozgása következtében.

A biofilm hordozón kialakuló iszap arról ciklikusan le is mosódik, de jelentős hányadát

képezheti így is a reaktorterekben kialakuló iszaptömegnek. Ennek megfelelően az utóbbi iszaphányad nem terheli folyamatosan az utóülepítőt, ami ugyancsak kedvező annak az üzemeltetésénél. Általános, hogy a biofilm hordozókkal ilyenkor a reaktoroknak mintegy harmada – fele van megtöltve, míg a többi rész szabad folyadéktérfogat. A hordozó kihordásának, vagy kimosásának a megakadályozására azonban a reaktorok megfelelő felületein, tereiben valamilyen szűrő szerkezetet kell kialakítani. Emellett a biofilmnek a hordozó részecskék felületről történő megfelelő eltávolítását is biztosítani kell. Az elárasztott biofilmes rendszereknél és a mozgó ágyas rendszereknél is egyaránt érvényesül a biofilmnek az az előnye, hogy a biofilm különböző rétegeiben különböző környezeti feltételek kialakulása révén speciális mikroorganizmus csoportok tevékenységére, akkumulációjára ad ott lehetőséget. A mozgó biológiai töltet ugyanakkor lehetővé teszi a nagyobb fajlagos felület kialakítását a folyadéktérben, növelve ezzel a biofilm területét, és a biofilmes rendszer térfogati teljesítményét.

A mozgó biofilm-hordozó biofilm rétegének a környezetében sokkal nagyobb folyadékáramlás, turbulencia biztosítható, mint az egyszerű, elárasztott ágyas statikus (rögzített) biofilmes rendszer esetében. Ez azt eredményezi, hogy a mozgó biológiai hordozónál sokkal kisebb a túlvastagodás, és ezzel a reaktor visszamosási igényének a jelentkezése. Szükségszerű az is, hogy a mozgóágyas biológiai hordozóknál talán még a rögzített ágyasokéhoz képest is lényegesen kisebb a hidraulikus ellenállás, tehát a folyadék átfolyásának a nyomásvesztesége. Az ilyen biofilmes reaktorok legfőbb előnye az eleveniszapos rendszerekkel szemben ugyanakkor mégis csak az, hogy a biofilmben kialakuló

biomassza helyben marad a reaktorban. Annak az ülepítésére, szeparációjára nem kell külön ülepítő-térfogatot tervezni. Ez viszont azt is eredményezi, hogy a biofilmben kialakuló átlagos iszapkor lényegesen növekedik a közvetlen átfolyású (bár recirkuláltatott) eleveniszapéhoz képest. A biofilm így a nagyobb iszapkora révén mind a nitrifikációra, mind a nehezen bontható szerves anyagokhoz történő adaptációra is sokkal alkalmasabb. Mindezek eredményeként a mozgóágyas bioreaktorok nem csak a hagyományos utóülepítési technikával kombinálhatók, hanem az eleveniszapjuk szeparációja más, modernebb megoldással, ultraszűrővel is szóba jöhet.

A mozgóágyas biológiai reaktorok változatosságát éppen az teszi lehetővé, hogy a medence kialakítás nagyon sokféleképpen megoldható. De talán ennél is lényegesebb, hogy a korábban épített biológiai medencék minden nehézség nélkül átalakíthatók ilyen töltetes, mozgóágyas biológiai reaktorokká. Ilyen esetben azok iszaptömege, vagy együttes eleveniszap és biofilm tömege az eleveniszaphoz képest, a levegőztetett medencében lényegesen megnövelhető. Az utóülepítőt ugyanakkor csak az eleveniszapos rész, illetve a biofilmből leszakadó minimális iszaptömeg fogja terhelni. Ilyen értelemben megnövelhető egy utóülepítő medence hidraulikus terhelése különösebb térfogatnövelés, vagy konstrukciós átalakítás nélkül is.

A mozgó biológiai töltet előállításában és forgalmazásában kedvező adottságai miatt jelentős verseny alakult ki. Sokféle anyagból, formai kialakítással készítettek ilyen biofilm hordozót (töltőanyagot). Fontosnak bizonyult, hogy a sűrűségük, méretük ne legyen túlzottan nagy, tehát könnyen mozogjanak a folyadékfázisban.

Norvég kutatók a fejlesztést a 1980-as évek közepén kezdték, talán annak érdekében, hogy az Északi-tenger, Balti-tenger nitrogén terhelését tudják majd a biofilmes nitrifikációval, denitrifikációval csökkenteni. Felismerték, hogy az ammónium oxidációjára, s a nitrát eltávolításra a legegyszerűbb és leggazdaságosabb megoldás a kompakt, viszonylag kisméretű, de nagy fajlagos felülettel rendelkező biofilm hordozó kialakítása lehet (Odegaard et al., 1991). A 80-as évek végén Norvégiában azután megindult a különlegesen strukturált, egyidejűleg viszonylag kisméretű biofilm hordozók gyártása. A norvég hordozót a „Kaldnes” néven ismerte meg a világ, de ma már nagyon sok helyütt gyártanak ahhoz eléggé hasonló termékeket. A múlt század 80-as éveinek végén kialakított Kaldnes töltet eredményessége azután hamarosan a mozgóágyas biofilmes technológia szabadalmaztatását, majd sikeres gyakorlati megvalósítását is eredményezte 1989-ben. Hamarosan felismerték azt is, hogy ha az ilyen mozgó biofilmes rendszer sikeres lehet a lakossági szennyvizek tisztításánál, az ipariaknál is sikert érhet el. Azoknál a mikroorganizmusoknak még hosszabb adaptációs idő, vagy tartózkodási idő kell a szennyvíztisztító rendszerben a szerves anyag bontásához. Ilyennek bizonyultak a papíripar szennyvizei, melyekben a cellulóz és a rövidebb szénláncú fragmentumai jelentettek lebontási problémát a mikroorganizmusok részére. A norvég cég, illetőleg a világ különböző részein támadt versenytársai azután nagyon sokféle biofilm hordozót készítettek a következő időszakban. Természetesen a fajlagos biofilm hordozó felületet igyekeztek maximálni a belső strukturáltság növelésével, illetőleg ezeknél is finomabb szerkezetű vékony hordozólemezek kialakításával (6. ábra). A Kaldnes töltet fajlagos felülete 500-1000, míg a vékony pénzérméhez

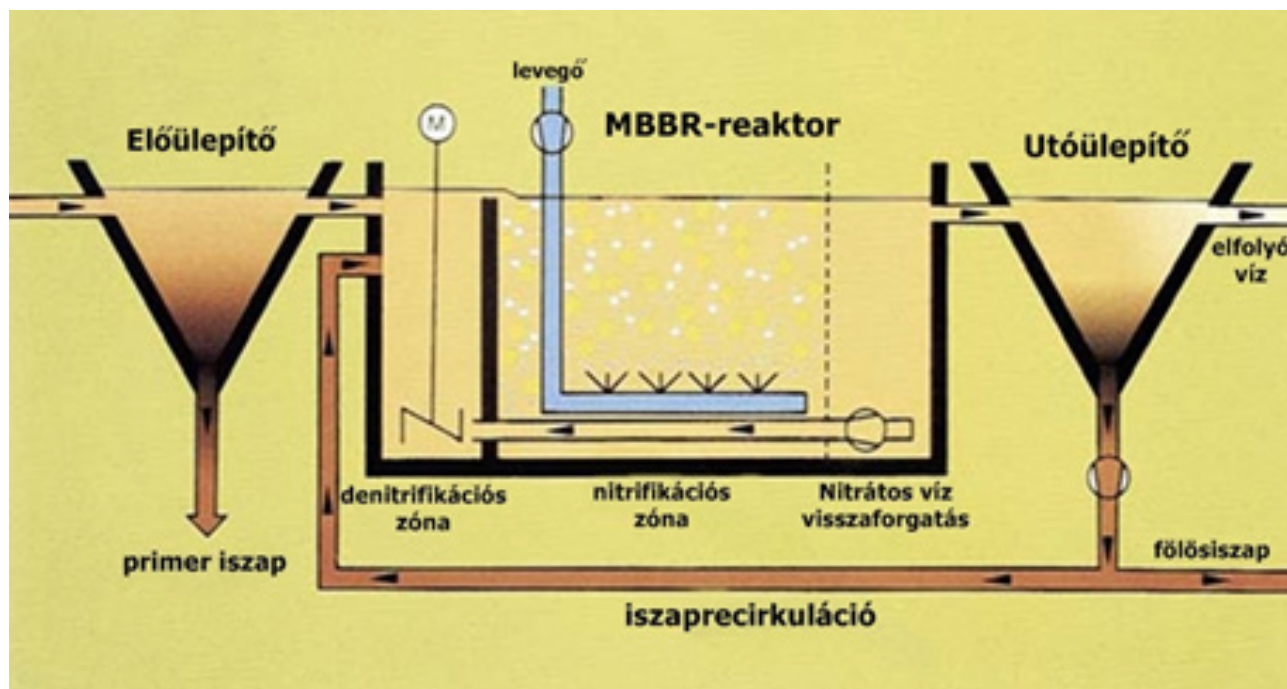
hasonlító, még strukturáltabb, vékony biochip lemezkévé $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.



7. ábra. Klasszikus Kaldnes töltet (fenti kép), valamint többretegű biofilm hordozó a legkorszerűbb biochip lemezekkel (bal oldali kép).

Az ilyen biofilm hordozóval működő hibrid rendszereknél a hordozó nagy fajlagos felülete ($500\text{-}1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), és viszonylagosan nagy töltet hányada (30-65 %) eredményeként jelentősen csökkenthető a lebegő szennyvíziszap koncentrációja is a levegőztetett medencékben. Napjainkra ez a korábbi 2500 mg/l -ről 1500 mg/l közelébe csökkent. Ezzel nőtt a biofilm hányad, a biofilm levegőellátása, s a nitrifikáló kapacitás is. A tisztító kiépítésének elve a 7. ábrán látható.

Az MBBR tisztítás a Kaldnes-3 töltettel mintegy 300 m^2 fajlagos felületet jelent a tisztító minden köbméter térfogatában. Teljes nitrifikáció az ilyen megoldásnál $5 \text{ g BOI}/\text{m}^2\text{d}$ szerves anyag terhelés esetén biztosítható. Ez azt jelenti, hogy $1,5 \text{ kg BOI}/\text{m}^3\text{d}$ terheléssel megfelelően működik a tisztítás, ami mintegy $2,25 \text{ kg KOI}/\text{m}^3\text{d}$ térfogati teljesítményt jelent, tehát nagyobb, mint amilyen a hagyományos



8. ábra. A mozgó ágyas hibrid bioreaktorok elvi kialakítása.

eleveniszapos tisztítás (Odegaard és társai, 2000).

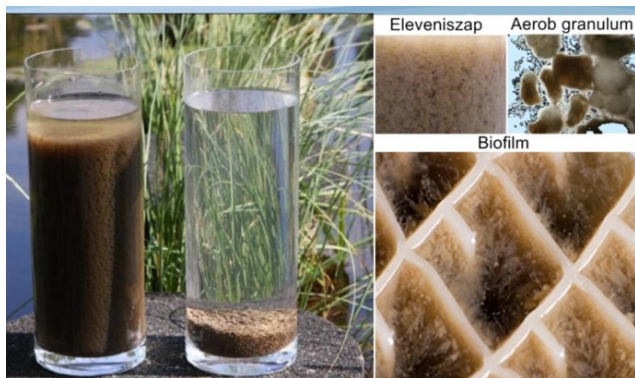
Hidegebb környezetben a biofilm jobb adaptációt biztosít, így a hidegtűrése is jobb. Az eleveniszapra jellemző nitrifikáció csökkenés a biofilmnél mérsékeltebb. Természetesen 10-12 fok Celsius alatt már a biofilmnél is rohamosan csökken a nitrifikáció sebessége, de ebben is jelentős eltérések adódnak a különböző biofilm hordozók alkalmazása esetén.

5. AAEROB GRANULÁLT ISZAPOS SZENNYVÍZTISZTÍTÁS

A 271/1991 EU ajánlás elég óvatos a nagyobb tisztítóknál elérendő maximális igény tekintetében (10-15 mg TN/l). Számos országban azonban 8-6-3 mg TN/l értékeket is megkövetelnek, ami a szimultán denitrifikáció jelentős fokozását követeli meg a technológiáktól. A tisztítással elérhető nitrát-tartalmat természetesen a nyersvíz TKN koncentrációja is befolyásolja. Ezért

a nagyobb fajlagos vízfogyasztású országokban, ahol a nyersvizek higabbak, sokkal könnyebb az előírt határértékek betartása. Európa országainak helyzete részben a viszonylagos vízhiány miatt, részben az ivóvíz magas értéken tartott ára miatt kedvezőtlen ilyen tekintetben. Biofilmes, vagy hibrid rendszerekben a denitrifikáció a biofilmek anoxikus tereiben, valamint megfelelő szűréssel, iszapvisszatartással kialakított eleveniszapos anoxikus térben is történhet. A biofilm denitrifikációja azonban a különböző tölteteken kialakuló biofilmek egyenetlen levegőztetése, oxigénellátása miatt nehezen szabályozható. Ilyen megoldásoknál a ciklikus levegőztetés, s annak a jó szabályozása ugyan javíthat a helyzeten, de egy egyenletes, kellően apró méretű, mégis jól üledő, hordozó nélküli granulummal alakuló biofilm (aerob granulált iszap) kialakítása, s annak az optimális levegőztetés szabályozása még jobb eredményt hozhat. Az 1/2 -1 mm méretű, gömbszerű tömör iszapgolyócskák

bizonyultak az ezredforduló vizsgálatait alapján az SBR üzemmódban legkönnyebben technológizálható ilyen szennyvíztisztítási változatnak (Pronk et al., 2015, Fazekas et al., 2015). A 8. ábra az eleveniszap, a biofilm és az aerob granulált iszap morfológiáját érzékelteti.



9. ábra. Az eleveniszap, a biofilm és az aerob granulált iszap szerkezete, valamint ülepedési, sűrűsödési képessége.

Ez eredményezte felfedezése után, az utóbbi két évtizedben az aerob granulált iszapos technológia ismeretanyagának a robbanásszerű bővülését. A granulált iszapos megoldás ugyan a lakossági szennyvizeknél valamelyest töményebb, döntően biológiailag jól bontható, oldott szennyezőket tartalmazó szennyvizek tisztítására igazán kedvező, azoknál rendszerint 100 nap alatti a granulum kifejlődési ideje. Ezért az élelmiszeripari szennyvizek tisztításában ért el hamarosan sikereket. A nagyon tömény ilyen szennyvizekre azonban energiatermelése miatt természetesen továbbra is az anaerob granulált iszapos intenzív anaerob tisztítás a célszerű. Az aerob granulált iszapos megoldásnak sok kedvező adottsága van, azonban esetében is kitétel a megfelelő szerves anyag, vagy iszapterhelés (granulum túlnövekedésének, szétrobbanásának megakadályozására), valamint a megfelelő KOI/

TKN arány a tisztítandó szennyvízben, hogy a nitrifikálók kellő mennyiségben, részarányban szaporodjanak és rögzüljenek a granulumok felszín alatti rétegében. A denitrifikációt ennél a megoldásnál is részben anoxikus környezet biztosításával lehet megoldani.

Az eleveniszapos medencékben az iszap-pelyhek mérete folyamatos keverés esetén 30-130 mikron között van. Ezen belül egy sejt mérete 1-2 mikron, mintegy fele ekkora, vagy akár hasonló vastagságú nyálkás exopolimer (EPS) réteggel körülvéve (kapszula). Az utóbbi részben a partikuláris tápanyagot ragasztja ebbe a rétegbe, részben a mikroorganizmusokat köti lazán egymáshoz. A pelyhek belseje meglehetősen kompakt a sejtek folyamatos szétszakadása, és ismétlődő összetapadásaik ellenére is. Az iszap-pelyhek környezető vízfázisban a tápanyagok (köztük az O_2) koncentrációja a keverés eredményeként, s így a folyamatos konvekció következtében gyakorlatilag homogén. A pelyhek belsejében ugyanakkor azok eljutása a sejtekhez döntően diffúzióval történik. Az utóbbi eredménye a fentiek függvényében kialakuló koncentráció-gradiens, ami az iszap-pelyhet folyamatosan változó környezettel bíró reaktorkaszkáddá alakítja. Az iszap-pelyhek anoxikus belső terének hányadát a külső vízfázis oldott oxigén koncentrációja, valamint a rendszer tápanyag-ellátottsága határozza meg. Az utóbbi a rendszer fajlagos iszapterhelése, ami nyilvánvalóan meghatározza a rendszerben kialakuló átlagos iszapkort is.

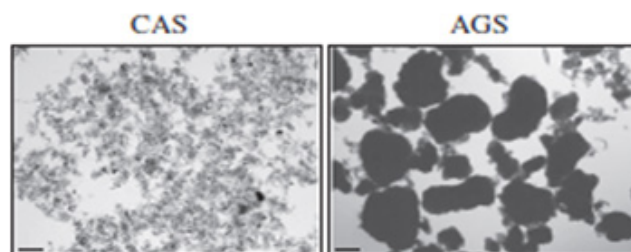
Megfelelő nitrifikáció/denitrifikáció csakis adott iszapkor fölött lehetséges. A heterotrof denitrifikáció viszont megfelelő szerves tápanyag igényt jelent, amire a szerves anyag túlzott előzetes (előüleptetés, CEPT) eltávolítása, vagy

a biológiában történő túlzott oxidációja kedvezőtlen. Nehéz tehát az ilyen eleveniszapos tisztítóknak a megfelelő tápanyagellátást és optimális oxigénszintet biztosítani, mivel az utóbbi túlzott csökkentése a nitrifikációt fékezheti be. A szerves anyagot oxidáló heterotrófok féltelési állandója az oldott oxigénre 0,2 mg/l, míg a nitrifikálóké 0,8-1 mg/l. A heterotrof/autotrof aktivitás tehát az iszap-pelyhekben mélységfüggő, amit ugyanakkor a mélyebb rétegek nitrátellátása is tovább bonyolít. Kijelenthető ezért, hogy az anoxikus/oxikus reaktorkialakítás mellett az iszap-pelyhek ciklikusan működő mikro-reaktorokként működnek. Hogy azokban a biológiai átalakítások sorozata a folyamatos betáplálású, valamint az SBR rendszerekben (netán ciklizált levegőztetés esetén) pontosan hogyan alakul, nehéz megbecsülni. Az oxigénkoncentráció szabályozásának az optimalizálása viszont mindenképpen növelheti a denitrifikáció mértékét az eleveniszapos, sőt a biofilmes, valamint az előbb említésre kerülő granulált iszapos megoldásoknál is.

Közismert, hogy a denitrifikáció sebessége mintegy 0,5 mg/l oldott oxigén koncentráció alatt gyorsul be az iszap-pelyhek belsejében. Évtizedek óta az is tudott, hogy a denitrifikáció a szennyvíz könnyen bontható szerves tápanyagával ötször olyan sebességű, mint az endogén tápanyaggal, de acetáttal még annak is az ötszöröse sebességgel megy végbe. A denitrifikáció (szimultán vagy utódenitrifikáció) sebességét tehát könnyű befolyásolni külső szerves anyag hozzáadásával. A szimultán denitrifikációt viszont a korábban elmondottak szerint külső tápanyag adagolása nélkül is fokozni lehet, ha az endogén tápanyag (szennyvíziszap) hidrolízisét sikerül valamiképpen megnövelni, gyorsítani. Ez iszapkezeléssel, vagy

anoxikus/anaerob tartózkodási idő növeléssel, DO csökkentéssel lehetséges. Ez történhet a hagyományos kaszkád kialakításnál, vagy ciklikusan levegőztetett környezetben is.

A granulált iszap hordozó nélkül kialakuló tömör iszapgolyócska, mikroorganizmus együttes, amely réteges belső mikroorganizmus szelekciója révén a biofilméhez hasonlóan, nagyobb nitrifikáló teljesítményre képes, mint az eleveniszap, sőt a belső tereiben speciális denitrifikáció és foszfor akkumuláció is létrejöhet. Ez annak az eredménye, hogy az iszap-pelyhely belső terének a tápanyag ellátottsága, környezeti feltételei, s ezzel a kialakuló mikroorganizmus konzorcium is jelentősen változik. Ennek megfelelően kialakíthatók így különböző vastagságú biofilmek, megnövelt tömörségű, sűrűségű iszapgolyók is (9. ábra). A felvételen a 0,6-0,7 mm méret alatti iszapgolyók dominálnak.

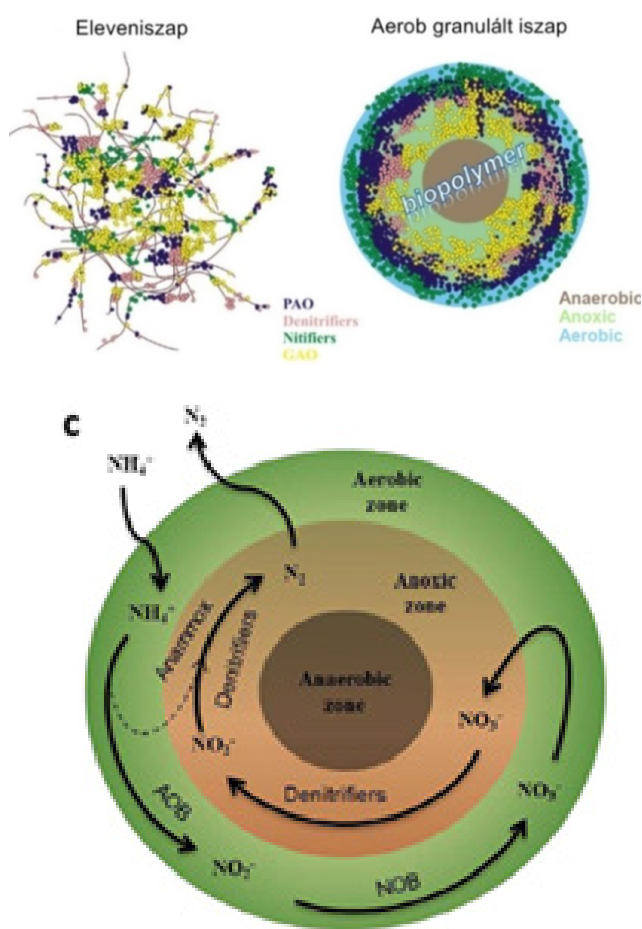


10. ábra. Hagyományos eleveniszap (CAS) és aerob granulált iszap (AGS) mikroszkópos képe 40-szeres nagyításban (a méretjelző vonalka 0,2 mm) (Franca et al., 2018).

A mechanikailag meglehetősen stabil granulálódott iszapban a környezet szelekciós hatására annak az egyes rétegeiben a mikroorganizmusok fajtánként térben elkülönülve, vagy eltérő koncentrációban, sűrűséggel helyezkednek el. A szelekció oka a tápanyag-diffúzió okozta eltérő tápanyag ellátottság. Ennek függvényében az egyes mikroorganizmus

fajok mintegy lemezesen, vagy gömbhéjszerű rétegekben helyezkednek el a tömörebb, szilárdabb mikroorganizmus konzorciumban. Az aerob granulált iszap kialakulását döntően a tápanyagok diffúziója, ciklikus ellátottsága, valamint a gyors üleptetés és ciklikusan intenzív levegőbevitel (nyíróhatás) eredményezi. Kialakulásában ezen túl az iszappelyhekre, majd kialakuló granulumokra ható, folyadékáramlásból adódó nyíróhatásnak is meghatározó szerepe van. A ciklikus tápanyag ellátás és vele a gyors iszapüleptési ciklusok (SBR kialakítás) is fontos szerepet játszanak (Nancharaiha és Kiran Kumar Reddy, 2018). Az eleveniszap és a granulált aerob iszap szerkezetét és anyag átalakításait a 9. ábra érzékelteti. Nem látható ugyan a 9. ábrán, de a gyakorlat bizonyította, hogy az aerob granulált iszap nem pirosas golyócskák halmaza, hanem világosabb, sötétebb szürkés golyócskáké, tömörebb részecskéké. A különbség a színükben is éppen a foszfor akkumuláló heterotrofok (PAH) és a glükogén akkumuláló heterotrof (GAH) mikroorganizmus fajok dominanciájának a következménye. Kialakulásuk, dominanciájuk a nyersvízminőség függvénye. Sűrűségük is eltérő, így elvileg lehetőség lehet a két iszapfajta szelektált elvételére is.

A granulált aerob iszap azonban csakis bonyolult reaktorteknikával alakítható ki, tápanyag és oxigénellátás szabályozással, s mindenképpen SBR üzemeltetéssel. Ugyan mára már a folyamatos betáplálását is megoldották, de a levegőztetésre, üleptetésre nagyon érzékeny a kialakuló iszapgranulum. A granulált iszap igen érzékeny a terhelés ingadozására is, s ez jelentősen korlátozza a terjedését a gyakorlatban (Franca et al., 2018).



11. ábra. A mikroorganizmus csoportok elhelyezkedése az átlagosan 30-130 mikron méretű, mechanikailag instabil eleveniszap pelyhekben és a csaknem tízszerese méretet is meghaladó, tömör, szilárd granulumokban (Winkler et al., 2013, Nancharaiha és Kiran Kumar Reddy 2018).

PAO- foszfor akkumuláló, *denitrifikáló*, *nitrifikáló*, GAO -glükogén akkumuláló mikroorganizmosok; anaerob, anoxikus, *oxikus* környezet

Kedvező adottsága az aerob granulumoknak, hogy a mindenkori levegőztetés mértéke függvényében ugyan, de a mélyebb (magbelső) térségeikben fejlődő heterotrof mikroorganizmusok az oda diffundáló nitrátot redukálják, sőt ezen nitrátredukció során ott foszfor akkumuláló (PAH) mikroorganizmusok

kifejlődését is lehetővé teszik. Ez a szennyvíz foszfát tartalmának az egyidejű eltávolítását is biztosíthatja. Az utóbbi mikroorganizmus szelekció azonban a PAH fajok mellett glükogén akkumuláló heterotrof fajok elszaporodásával is jár, ami a szerves anyag biomaszába épülésének a mértékét is növelheti, kisebb oxigénfelhasználást eredményezve a tisztítás során. Az iszapgolyók kialakulása részben a speciálisan ciklizált tápanyagellátás (SBR), részben a hasonló levegőztetés és ülepítés, a fokozott (intenzív) levegőztetéssel biztosított megnövelt nyíróhatás, valamint speciális extracelluláris polimer kötőanyag termelés iniciálása, valamint pozitív töltésű, kétértékű szerves ionoknak az EPS negatív töltését ellensúlyozó, stabilizáló hatásának tulajdonítható. A kedvező adottságú granulált iszapoknak mintegy 60-80 %-a mindezek eredményeként EPS, s annak is mintegy harmada EPS fehérje, ami feltehetően a hatásos sejt összekapcsolódást, granulum stabilitást biztosítja. A granulációnál keletkező EPS anyagok összetételében a fehérjék részaránya messze nagyobb, mint az eleveniszap mikroorganizmus kapszuláinál, s egyidejűleg jóval hidrofóbak is, azzal is segítve a granulum stabilitását. A granulumokban kialakuló EPS negatív töltésű szerves fragmentumai (poliszacharidok, fehérjék, zsírok, aminosavak, humusszerű polimerek) a kétértékű kationokkal (Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Fe^{2+}) destabilizálódnak, míg a foszforcserénél visszaoldódó foszfát ionok ugyanezekkel kicsapódnak, csökkentve a negatív töltésű foszfát-ion kolloid-destabilizáló hatását. Ennek eredményeként a granulumban jelentős lesz az inert foszfát csapadék részaránya (60-70 %), ami viszont a PAH tevékenység ellenében hat.

A granulum kialakulásában azonban alapvető a speciális EPS keletkezése és összekapcsoló hatása, együtt a hidrodinamika hasonló hatásával, illetőleg a fonalas szervezetek fokozott kimosásával, visszaszorításával. A ciklikus tápanyagellátásnak és levegőztetésnek is az az alapvető célja, hogy a gyorsan felvető szerves tápanyagok az anaerob szakaszban kerüljenek felvételre a mikroorganizmusokba (glikogén és poli-hidroxi-butirát), míg a lassan bomlók ugyanekkor kötődjenek, adszorbeálódnak, döntően a nyálkás, ragasztó extracelluláris polimer rétegek révén az iszapgolyócskába. Utóbbiak azután a levegőztetett ciklusban a hidrolízis révén lassúbb szerves tápanyaganyag ellátást eredményeznek heterotrofoknak. Különösen a gyorsan szaporodó, granulum legkülső felületén elhelyezkedő egyedeknek, megakadályozva az iszapgolyók túlnövekedését, dezintegrációját s biztosítva egyidejűleg a belső rétegek jó tapadását, sűrűsödését, tömörödését.

A granulumban a kis oxigénkoncentrációjú rétegben lehetséges nitrit-képződés is, ami csökkenti a fajlagos O_2 igényt, s a denitritálódásnál a szerves-C igény is. Kedvező, hogy a nitrit-redukció nitrogénné 1.5-2 – szerez sebességű, mint a nitráté, így kisebb a heterotrof iszaphozam is, sőt ha elszaporodnak a granulumokban anammox mikroorganizmusok is, az O_2 igény még kevesebb. Esetleg teljesen autotrof is lehet a nitrogéneltávolítás, minimális iszaphozammal.

Az EPS mikroorganizmusokat összekapcsoló szerepét ugyan ma már elég pontosan ismerik, összetételének alakulásáról, szabályozásáról azonban még kevés ismeret áll rendelkezésre. Ezzel szemben egyértelmű, hogy ez a nyálkás

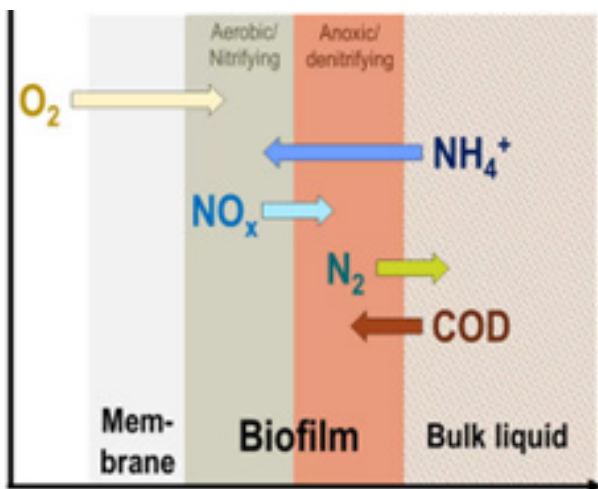
6. MEMBRÁNOS LEVEGŐZTETÉS

ragasztóanyag jelentősen növelheti a fémionok, továbbá lassan, vagy alig lebomló, többnyire nagy molekulaméretű szerves anyagok megkötését, adszorpcióját, s ezzel eltávolítását a tisztítás során. Kedvező ez a gyógyszermaradványok, háztartási segédvegyszerek eltávolításánál.

A granulált iszapos megoldások nehezen alakíthatók ki túlzottan híg szennyvizek esetében, mint amilyen egy közvetlen anaerob szennyvíz-metanizáció, vagy a két iszapkörös lépcsős (Böhnke, 1977) AB rendszerű eleveniszapos szennyvíztisztítás első lépcsőjének a terméke. Megfelelően adaptált biofilmmel viszont lehetőség nyílhat híg vizekből történő, újszerű, hatékony autotrof nitrogéneltávolításra is, netán anaerob metán oxidálókkal teljessé téve a nitrogéneltávolítást (Xie et al., 2018). Elképzelhető, hogy az utóbbihoz szükséges igen nagy iszapkorú (több száz nap) és igen lassan adaptálódó mikroorganizmus együttes kialakítása membrános iszapvisszatartásra is szükség lesz a biofilmes immobilizáció mellett. A Böhnke megoldás első lépcsője után a víz hideg, kis szerves anyag de jelentős ammónium tartalmú. Kérdés, hogy a ma még álomnak tűnő anaerob MBR után a víz hőmérséklet milyen. Ha az 15-20 fok fölött maradhatna, a főági nitrogéneltávolítás a második lépcsőben már MBR-el vagy biofilmes megoldással megoldhatónak tűnhet a megfelelő nitrogéneltávolítás (TN). Egy A/B rendszer második, eleveniszapos lépcsője üzemeltetésének a hazai tapasztalatai bizonyítani látszottak ezt (Thury et al. 2006; 2009). Sajnos annak az optimalizálására ugyanakkor több mint egy évtizede pénz és akarat hiányában nem került sor.

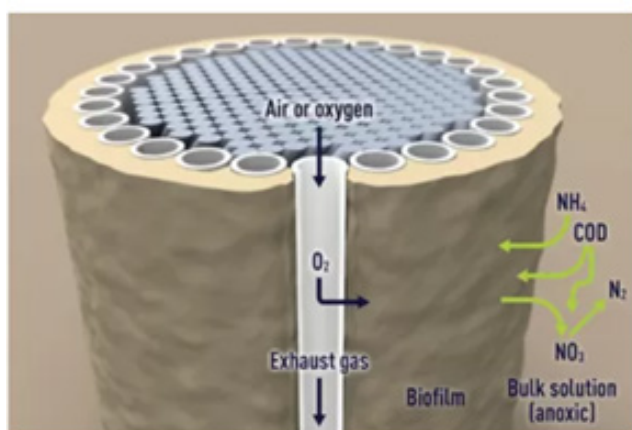
A biofilm kialakítás különleges esetét valósították meg az utóbbi évtizedben speciális gázmembrán felhasználásával (ZeeLung). A membránnal levegőztetett bioreaktorokat a membránszűrősektől eltérő névvel is illették eltérő működési elvüknek megfelelően (MABR - Membrane Aerated Bioreactors). A membrán nem az iszap kiszűrésére, hanem speciális biofilm kialakítására szolgál. Ennek megfelelően a membrán belső szerkezetében is lényegesen eltérő. Nem a szűrt víz szűrését és elvételét biztosítja, hanem a belülről levegőztetett membránszálak felületén kialakuló biofilm köpeny oxigénellátását. Ezt még azzal is fokozták, hogy a különlegesen finom gázmembrán csövecskéken keresztül csak az oxigén jut át a biofilmbe, részben javítva így az oxigénbevitel fajlagos költségét, részben a biofilm egyirányú oxigén konvekciója és diffúziója eredményeként nitrifikáló szervezetekben rendkívül gazdag membránfelületi réteget alakít így ki. Ennek eredménye a nitrifikációs teljesítmény nagymértékű növelése. További előnye az így kialakuló biofilmnek, hogy a folyadékoldaláról ugyanakkor megfelelő szerves tápanyagellátást is kap nitrit és nitrát denitrifikációjához. A filmet körülvevő folyadékfázisban ugyanakkor a biofilm külső felületéről leszakadó denitrifikáló heterotrófokban gazdagabb biofilm részek az ott kialakuló sokkal kisebb oxigénkoncentráció mellett is további szerves anyag oxidációt eredményezhetnek. Az így kialakuló biológiai folyamatokat a 11. ábra szemlélteti.

A membránnak természetesen a fenti oxigénátvitelhez nem csak anyagában kell megfelelőnek lenni, de strukturális kialakításában is. Erős szálakból kell kialakítani, melyek tartós



12. ábra. A membránszál belülről levegőztetett biofilmjében kialakuló átalakítások.

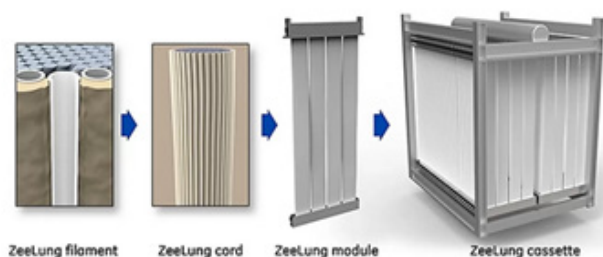
használatot tesznek lehetővé (10-12 év használati idő). A gázmembrán csövecskék központi részében ezt egy stabil hordozószál biztosítja. Emellett a külső felülete felől is kellő mechanikus védelemmel kell ellátni a gázmembrán csövecskéket (12. ábra).



13. ábra. A levegőztető membránszál speciális kialakítása.

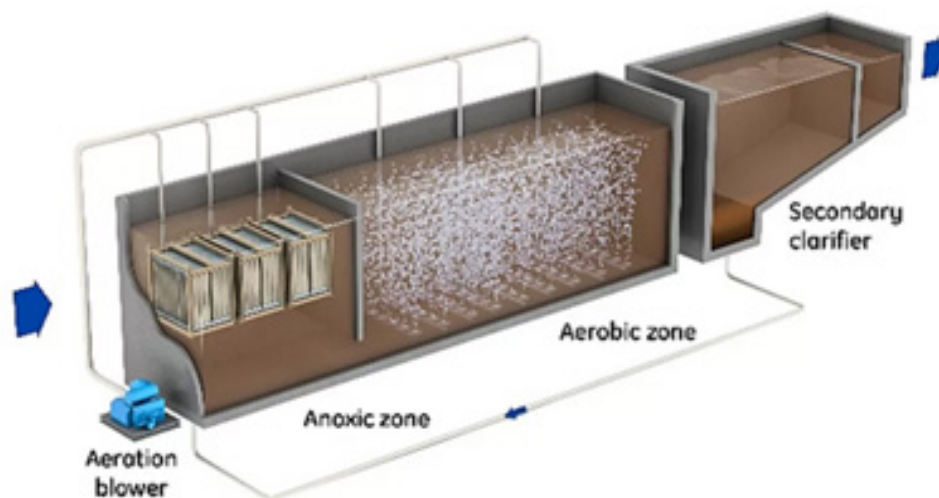
A membránszálakat membránszűrőkéhez teljesen hasonló speciális blokkokba, keretbe rögzítik, s azzal merítik be, építik be a MABR egységbe. Kézenfekvő lehetőség ugyanakkor a leszakadó biofilmrészek munkájának

a további javítására egy szeparált, klasszikusan levegőztetettmedencetér kialakítása is, amellyel a membrán levegőztető rendszert hibrid rendszerűvé is lehet alakítani, tovább tökéletesítve azzal a szerves anyag és nitrát eltávolítását is. A csak iszapos reaktortér gondos levegőztetés szabályozásával, szimultán utó denitrifikációnál a levegőztetés energiaigényét tovább lehet minimalizálni. Nagyon kedvezően csökkenthető ilyenkor a rendszerben kialakítandó iszapkoncentráció és iszapkor is, ami jó iszapüledést és iszapszűrést is biztosít, lehetővé téve egyszerű, gravitációs iszap utóülepítés alkalmazását, ami a tisztító kiépítési költségeit tovább csökkenti. A Membrán levegőztető szerkezeti egységeit, annak kiépítését a 13. ábra mutatja be.



14. ábra. A membrán levegőztetés részegységei és tisztítóba meríthető kazettája

Fontos eredménye a kiépítéseket végző cégnek, hogy a teljes levegőztető blokk kiépítésére a membránszűrő (ZEEWEED 500) gyakorlati beépítésben jól bevált kazettájában került sor. Természetesen a levegő hozzávezetéséhez szükséges apróbb módosításokkal. A biológiai szennyvíztisztító rendszerkiépítésének a teljessége a 14. ábrán látható. Ma már az ilyen szennyvíztisztító típusból is több tízezer egység üzemel ipari méreteken.



15. ábra. Jellemző hibrid MABR kialakítás.

7. JELENLEGI PROBLÉMÁK, TOVÁBBI LEHETŐSÉGEK.

Összegezve a szennyvíztisztítás napjainkig vezető történetét, folyamatait mindig a bonyolultság, az összetettség jellemezte. A kezdeti időszakában a szükséges elméleti háttér-ismeret szinte teljesen hiányzott. Az üzemek ennek ellenére sikeresen működtek. Üzemeltetőik nem igen tudták, hogy eredményeiknek mi is a magyarázata – a mikroorganizmusok tették, amire képesek voltak. Ebben az időszakban a kultúrmérnökök feladata volt a szennyvíztisztítók tervezése, építése, és ők ki is alakították a megfelelő módszereket, amivel megfelelő tapasztalatra tettek szert. Az eredmények a legtöbbször kielégítették az elvárásokat. A szennyvíztisztítás ebben a kezdeti időszakban erősen szakmaorientált tevékenység volt különösebb tudományos háttér vagy magyarázat nélkül. Természetesen ezt követően a mérnökök fejlesztették a szükséges ismereteiket, és sikeresen átalakították a szennyvíztisztítás technológiáját. A szennyvíztisztítás igényei, követelményei azonban egyre tökéletesebb tisztítási

hatékonyságot és ennek megfelelően a biológiai folyamatok mind részletesebb megismerését követelték a fejlesztőktől. A biológiai szennyvíztisztítás tudományos ismeretei ennek megfelelően az utóbbi 20-30 évben igen rohamosan bővültek, ami elsősorban vegyészmérnökök és biológusok fejlesztő munkájának az eredménye. A fejlődés napjainkban is igen gyors, de szükség is van arra a különlegesen veszélyes szennyezőanyag lehetőség szerinti maximális inertizálása, eltávolítása érdekében. A jelenlegi helyzetet a korábbival szemben az a tény jellemzi, hogy az elméleti ismeretek mögött messze elmarad azok gyakorlati hasznosítása. Nem minden tisztázott technológiai lehetőséget lehet bevezetni a gyakorlatban, ha nincs hozzá gazdasági fedezet.

Legtöbb esetben a szennyvíz, valamint a benne lejátszódó, végbemenő reakciók is egy kémiai rendszertől eltérően nem kellően pontosíthatóak. A biológiai tisztításnál egy tápanyag

felvételi lánc sorozata a folyamat, melynek a szereplői (mikroorganizmusok) is folyamatosan változó dinamikus rendszert alkotnak. Ezek a leghatékonyabban állandó környezeti feltételek mellett, optimalizált rendszerben tudnának dolgozni. A baktériumoknak ennek megfelelően optimális fizikai, kémiai környezetet és tápanyag ellátást kellene biztosítani. Ilyen feltételek azonban a szennyvíztisztítás esetében teljesen kizártak. A lakossági szennyvíz állandóan változó összetételű, hozamú, tápanyag és toxikus anyag tartalmú, sőt még hőmérsékletű. Ennek megfelelően optimális tisztítást ilyen rendszerrel elérni gyakorlatilag szinte lehetetlen.

A szennyvíz összetételének a problémáját talán elég azzal érzékeltetni, hogy az átlagos szennyvíz összetétel is messze van a szennyvíztisztítást végző mikroorganizmusok számára optimális tápanyag aránytól. Ez a tápanyag arány C/N hányaddal jellemezve, mintegy 12 lenne. A gyakorlatban a C/N arány a kommunális szennyvizeknél közelítőleg 4. Ez is mutatja, hogy az ammónium-nitrogén mennyisége a rendelkezésre álló szénhez képest túlzott. Ugyanez igaz a foszfátra is. Az új és folyamatosan szigorodó nitrogén- és foszforeltávolítási igényeket ilyen szerves anyag szegény környezetben nagyon nehéz kielégíteni. Számos esetben éppen külső szerves tápanyag adagolásával lehet valamelyest javítani a nitrifikáló és denitrifikáló és többletfoszfor eltávolító folyamatok végbemenetelét. A szennyvíz tisztítása a lakossági telepen, mintegy végponti szennyvíztisztításként szükségszerűen nem lehet folyamatosan optimális. A károsító anyagokat szükséges valahol a szennyvíztisztítót megelőzően eltávolítani a szennyvizekből, ahol azok koncentrációja még elég nagy ahhoz, hogy

netán gazdaságosan eltávolíthatók, visszanyerhetők legyenek a folyadékáramból. Csak az elkerülhetetlen folyadékszennyezést szabad ezután az iparból a kommunális szennyvíztisztítóba beengedni a befejező tisztításra.

Rendkívüli fontosságú az említett kritikus szennyezők eltávolításában a biológiában egyidejűleg alkalmazható aktívszenes adszorpció hasznosítása. Ez döntően annak az ilyen szennyezőket történő megkötése révén érvényesül, de egyidejűleg növelve ezeknek a komponenseknek a tartózkodási idejét a tisztítóban, lehetővé teszi az ott dolgozó mikroorganizmusok célirányos adaptálódását is azoknak a lebontására, hasznosítására, természetes sejtanyagként a fölösiszapba történő beépítésére. Az ilyen szennyezők maradékainak az eltávolítását a már tisztított szennyvízből kémiai módszerekkel, elsősorban ózonos oxidációval is növelhetjük. Ezt követően azonban ugyancsak szükséges lehet egy aktív szenes adszorpció, de már nem az iszapos vízből, hanem a megfelelően tisztított, gyakorlatilag a befogadóba kerülő vízből. Hasonló szerepe lehet még az ilyen tisztításnál a különböző molekulaszűrési, ozmózis és elektrokémiai megoldásoknak is (Rout et al., 2021).

► IRODALOMJEGYZÉK