ELÁRASZTOTT, RÖGZÍTETT-ÁGYAS SZENNYVÍZTISZTÍTÓK

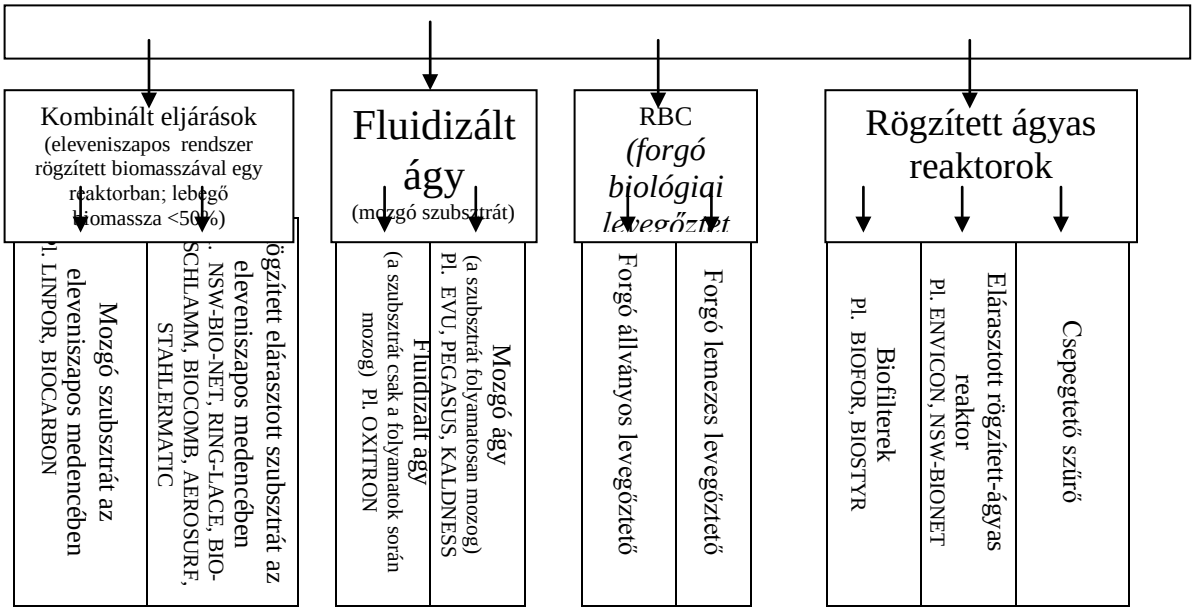
Mérnyei Judit

Schultz, J. M gennant Menningmann: „Submerged Fixed-Bed Reactors” (Rehm, H. J. and Reed G.: Biotechnology, V. 11a. p. 366-371) című cikke alapján

1. Folyamatleírás

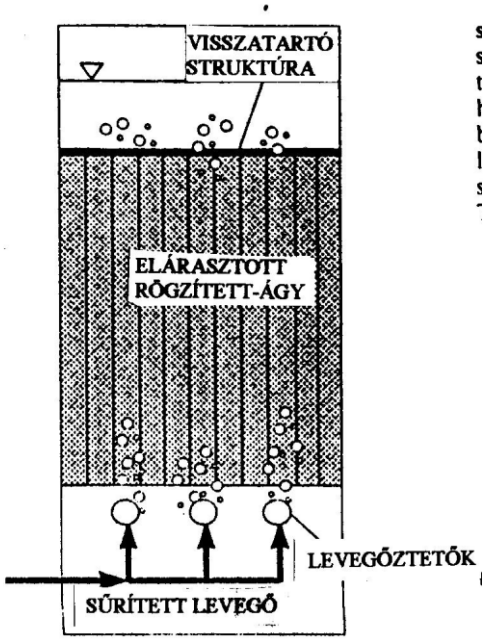
A biofilm formájában kialakuló mikroorganizmus tömeg –biomassza- segítségével történő biológiai tisztítás meghatározója a film felszíni rétegében lévő baktérium és protozoák intenzív szaporodása, anyagcseréje. A biofilmes tisztítás a szennyvíztisztítás egyik legősibb formája (BISHOP és KINNER, 1986).

A szennyvíztisztítás újkori követelményei, a helymegtakarításra való törekvés, valamint az üzemeltetés egyszerűsége miatt mintegy 10-15 éve egyre gyakrabban alkalmazzák a biofilmes eljárásokat, vagy un. „rögzített-ágyas reaktorokat” a szennyvíztisztításban. Mivel ezeknél a tisztítás részben, vagy döntően a biofilm tevékenységének eredménye, ezért az EN 1085 Európai Szabvány „biofilm reaktoroknak” nevezi őket. Ezen a csoporton belül megkülönböztethetők az elárasztott rögzített-ágyas reaktorok, melyek rögzített hordozófelülettel, és elméletileg több, mint 85 % szabad, jól átkeverhető kitöltetlen résszel rendelkező, állandóan elárasztott medencék. Az 1. ábrán láthatóak a biofilm eljárások különböző csoportjai, köztük a SEYFRIED (1997) nevéhez fűződő elárasztott, rögzített-ágyas reaktor. Ez az ismertető a továbbiakban kizárólag a fent említett csoportosítás szerinti „elárasztott” típusú rögzített-ágyas reaktorral foglalkozik.



1. ábra: Biofilm reaktorok

A 2. ábra a szennyvíztisztítás területén alkalmazott elárasztott rögzített-ágy elvét illusztrálja. A reaktorban vannak levegőztetők (általában membrán típusú, csöves levegőztetők), melyeket a medencefeneken a rögzített filmes hordozó alá helyeznek el, hogy oda jutassák az oxigént, cirkuláltassák a folyadékot, illetőleg biztosítható legyen azokkal a folyamatos, tápanyagellátás. Ha denitrifikáció is szükséges, azt megfelelő tér kialakításával, s abban a levegőztetés kizárásával, valamint a nyers szennyvíz és nitrátos víz oda történő bevezetésével, kényszer-konvekciójával (hagyományos fúvóka segítségével), esetleges keverésével biztosítják. Meghatározó, hogy nincs iszaprecirkuláció. A fölösiszapot az utóülepítő medencében választják el a víztől, és onnét veszik el.



2. ábra: Elárasztott rögzített-ágyas reaktor

Ideális felhasználása esetén legalább három lényeges előnye lehet a biofilmes eljárásoknak, s különösen az elárasztott rögzített-ágyas reaktoroknak az eleveniszapos rendszerekkel szemben:

- kicsi a helyigénye,
- alacsony az üzemeltetési költsége, mind a kezelőszemélyzet, mind a tisztítás időtartamának kisebb igénye révén,
- rugalmas a nagy terhelésekkel szemben.

A működtetési tapasztalatok azt mutatják, hogy mind a jó térfogati kapacitás, mind a kisebb üzemeltetési költség meghatározó. A biofilmes rendszerek vagy kompaktabbak, nagyobb a térfogategységre adódó fajlagos felületük, és így jó a lebontási hatásfokuk, de ekkor a kezelés több odafigyelést igényel („biofilter”), vagy nagyobb szabad térfogathányaddal kialakítottak, amikor viszont kisebb a kezelési igényük, de nagyobb helyszükségletük. Mivel az utóbbiaknak is reaktortérfogat és a tartózkodási idő a meghatározó jellemzőik, az itt bemutatásra kerülő elárasztott rögzített-ágyas reaktor sokkal szorosabban kapcsolódik az eleveniszapos rendszerekhez, mint a biofilterekhez. A magasabb költséget, mely magában foglalja a rögzített-ágyas reaktor üzembe helyezését is, kompenzálja az, hogy kisebb tér kell adott biomassza-tömeg

„munkába fogásához”, és nem szükséges iszaprecirkuláció sem. Ezért az ilyen tisztítók általában alkalmasak:

- a kommunális szennyvíz teljes decentralizált biológiai tisztítására 4 és 8.000 LE (lakosegyenérték) között éppúgy, mint speciális szolgáltatói és ipari szennyvíz tisztítására,
- erősen szennyezett ipari szennyvíz előkezelésére (pl. eleveniszapos rendszer előtt),
- végső tisztításra, például egy nitrifikációs lépcső formájában.

2 Az elárasztott, rögzített ágyas reaktorok alkalmazása

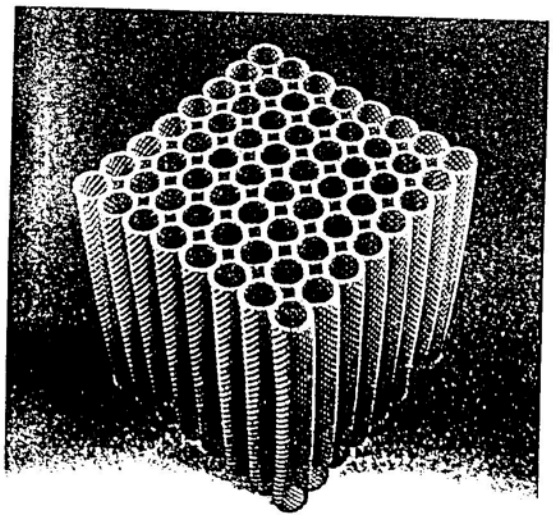
Mint ahogy a 2. ábrából látható, a folyamatnak három meghatározó eleme van:

- hordozó (hordozóanyag, rögzített ágy),
- levegőztetők
- reaktor.

Mind a három döntően befolyásolja a lebontás hatásfokát. Megfelelő módon kell igazodniuk egymáshoz, hogy a befolyó szennyvizet kezelni tudják. Mivel az iszap nem recirkuláltatható a folyamatban, ezért az adott egységben a tápanyag-eltávolítás hatásfoka csak kismértékben befolyásolható. Csak a levegőztetés intenzitását lehet szabályozni és/vagy az elfolyó vizet lehet recirkuláltatni. A fentiek miatt minden paramétert a tervezett érték közelében kell tartani, figyelembe véve az egymáshoz való viszonyaikat is.

2.1. A biofilm hordozója

A specifikus alkalmazásoknak megfelelő hordozó, vagy töltet a tisztításnál különös fontossággal bír. A hordozó az ilyen tisztítóknál (rögzített-ágyas reaktorok) műanyag rács-, vagy laminált műanyaglemez-köteg, melyek fajlagos felülete 100-400 m^2m^{-3} között van. Anyaga lehet például extrudált HDPE (ENVICON, NSW rács), mint a 3. ábrán látható BIOPAC egységnél, vagy laminált PVC lemezekből is készülhet (MUNTERS, RICHTER).



3. ábra: BIOPAC (ENVICON, Germany): extrudált rács biofimhordozó

A biofilmhordozó töltetet általában szabályosan elrendezett blokkokban helyezik a levegőztetők fölé és rögzítik, megfelelő térfogategységekben (tartó szerkezet). Különösen fontos, hogy amikor

vastagabb filmréteg alakul is ki a hordozó felületén, a folyadék és gázáramlás változatlanul biztosítva legyen. Ez nemcsak azt biztosítja, hogy az áramlási ellenállás megfelelően kicsi maradjon, de megelőzi az eltömődést is. A gáz- és folyadékfázis intenzív átkeverése a biofilm jó tápanyagellátását teszi lehetővé, s megakadályozza légzsákok, csatornák kialakulását (ATV, 1996).

A töltet sima vagy durva felületű is lehet. A sima felületek kevésbé tartják meg a biofilmet, mint a hasított, durva felületek, mert kevesebb lehetőséget adnak a biofilm mikroorganizmusainak a megtapadásra. Minél simább a hordozó felülete, annál nagyobb a veszélye, hogy nagyobb turbulenciánál a biofilm szétesik, leválik a hordozó felületéről, s ugyanakkor más helyeken eltömődés jelentkezik. Ezért, amikor a biológiai terhelés megnő, s főleg ha az nagy hullámmal (lökésszerű hidraulikus terheléssel) érkezik, különös figyelmet kell fordítani a hordozó mikro-szerkezetére (VAN LOOSDRECHT és társai, 1995).

Nem szabad megfeledkezni arról, hogy a hordozó anyaga, annak komponensei, felületi festékanyaga gátolhatják a biofilm növekedését is. Hosszabb idő szükséges ezért az ilyen hordozóknál a stabil film kialakulásához. A különösen érzékeny baktériumok, mint a nitrifikálók fokozott hátrányba kerülhetnek a biofilmben. Az ilyen fizikai, kémiai és biológiai kölcsönhatásokkal, melyek baktériumok és felületek között kialakulhatnak, BERKELEY és társai (1980) foglalkoztak részletesebben. A technológiai szempontokat (hidraulikus ellenállást, illetve a biofilmre kifejtett nyíróhatást már a töltet anyagának a kiválasztásánál tervezni kell. Az inert anyagok, mint a polietilén, semlegesek és elvileg alkalmasabbak biofilm hordozónak, mint ahogy a német ATV is javasolja (ATV, 1996).

A 4. ábrán látható egy olyan hordozó látható, melyen egy későbbi ábrán bemutatásra kerülő, úgynevezett gomba-típusú biofilm települt meg.

A biofilm hordozóanyagát megfelelő tartószerkezettel a medence behatárolt terében kell pozicionálni, hogy a levegőztetés miatt „felúszása” ne következzen be. A biofilm hordozója ezért támasztó szerkezethez van rögzítve. A biofilm súlya az 1. táblázat alapján számolható. A kisterhelésű biofilmek súlya 70 és 150 kg m^{-3} között van, míg a nagyterhelésűeknek, valamint amelyek szálakból állnak, a súlyuk 350 kg m^{-3} felett is lehet. A hordozó súlya a típustól, anyagtól és a felülettől függően 40-80 kg m^{-3} között változik. Az eddigi tapasztalatok szerint a biofilmes töltet magassága nem haladhatja meg a 4 métert. Az ideális magasság a töltet (hordozó) mechanikai stabilitásától, továbbá a tisztított víz recirkulációs arányától (hígítás) függ.

4. ábra: Gomba-típusú biofilm HDPE-rácson (BIOPAC)

1. táblázat: A biofilm vastagsága és a terhelés közötti kapcsolat

B_F	B_L	W	Alkalmazás
< 3	1,5	0,015	ves anyag eltávolítás teljes nitrifikációval
3-6	1-4	0,017	zerves anyag eltávolítás szimultán nitrifikációval
6-12	4-10	0,02	zerves anyag eltávolítás részleges nitrifikációval
12-30	10-20	0,03	zerves anyag eltávolítás

B_F: BOI_5 terhelés (g BOI_5 $m^{-2}d^{-1}$)
B_L: biofilm vastagsága vagy a biofilm szálak hossza (mm)
W: súly-faktor (kN m^{-2}) a Deutscher Normenausschuss Wasserwesem szerint, 1989

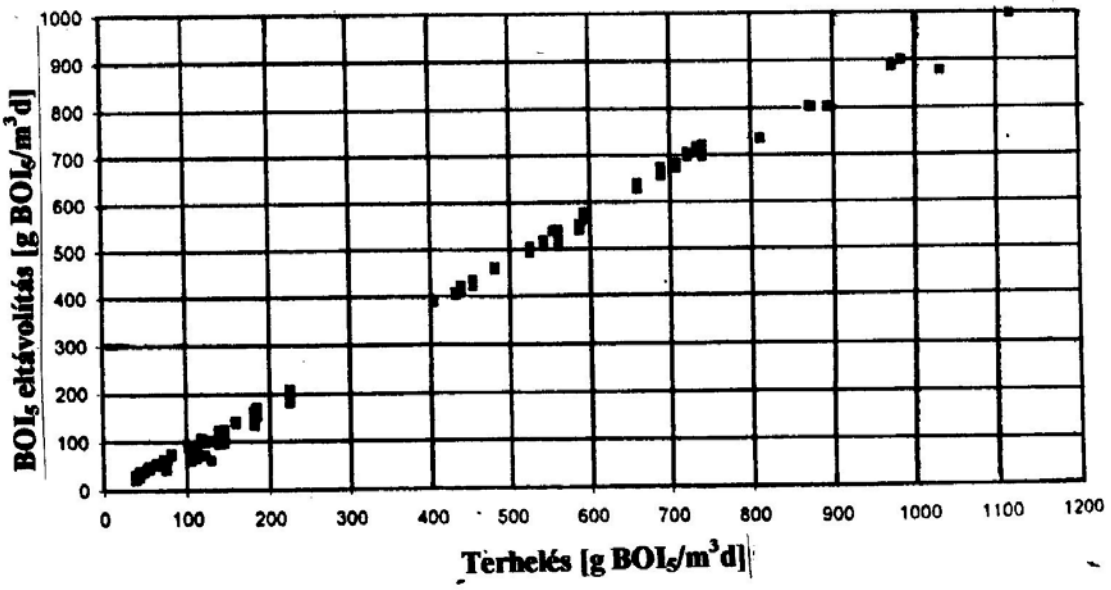
A biofilmes reaktorok többségét (biofilterek, csepegtető szűrők) a szerves anyag terhelés alapján tervezik (kg BOI_5 m^{-3} rögzített-ágy térfogat d^{-1}). Az elárasztott rögzített-ágyas reaktorok hagyományos tervezése, melynek alapja kizárólag a ténylegesen elérhető hordozó felülete (növekedési felület), a forgatott biológiai tárcsás reaktorok (Rotating Biological Disk – RBD) tervezésével kezdődött. Ezeknél a térfogategységben elérhető biomassza tömeg növekedése kizárólag a biofilm vastagságától függ. A terhelés felületre számított fajlagosa ezért nem közvetlenül arányos a biofilm tömeg, csupán a biofilm felület terhelésével. Az elárasztott

rögzített-ágyas reaktor rácstípusú biofilmhordozó blokkjának a felületigénye hasonlóan alakul, illetőleg tervezhető. Ugyanakkor azt sem szabad elfelejteni, hogy az aktív felület is a bolyhos biofilm növekedése miatt kezdetben (vékonyabb film) növekedni fog. Nem megfelelő áramlás esetén, túlterhelésnél vagy túl nagy fajlagos felületi terhelésnél csökkenhet is a felület, a hordozó felületén történő túlburjánzás következtében. Ilyenkor csak a lecsökkent felület érhető el, tehát a felületi terhelés az eredetinél sokkal nagyobb lesz. Ha ezt nem veszik figyelembe, a túlterhelés következtében üzemzavar léphet fel. A mikroorganizmusok a lebegő iszaprész mennyiségének, vagy részarányának a növelésével reagálnak. A lebegő iszap zavarosságot okoz a vízben, továbbá nagyobb lesz az elfolyó víz lebegőanyag tartalma is. Egyidejűleg a biofilm oxigénellátása is romlik a kisebb felület/tömeg arány miatt, mely a mélyebb filmrétegben az anoxikus, anaerob folyamatok dominanciáját is eredményezheti a megfelelő biológiai folyamatok kialakulásával. Ezért nagyon fontos az elárasztott rögzített-ágy térfogatának, illetőleg a biofilm fajlagos felületének a helyes tervezése (kg BOI_5 m^{-3} rögzített-ágy térfogat d^{-1}) Ehhez az 2. táblázat nyújthat segítséget.

2. táblázat: A BOI terhelés és a hordozó felületének kapcsolata

BOI terhelés	**A hordozó felülete (m^2 m^{-3})**
Alacsony (nitrifikáció)	$\geq$ 200
közepes	~ 150
nagy	~ 100

Kaszkád medencekiépítés esetén lehet biofilm hordozót úgy is telepíteni, hogy a fajlagos felület növekedjen, s ezzel a fajlagos biofilm terhelés csökkenjen az áramlási irányában a egymást követő medencékben. Az 5. ábrán a terhelés és a lebontás hatásfoka közötti kapcsolat látható, melyet kommunális szennyvízzel, laboratóriumi körülmények között mértek ki 60 literes reaktorban.



5. ábra: BOI-eltávolítás a terhelés függvényében

2.2. Levegőztetés

A levegőztetést általában egyenletesen elosztott, finombuborékos membrán levegőztetéssel valósítják meg. Fontos, hogy a rendszerben keletkező, úgynevezett szekunder biológiai iszap (leszakadó biofilm) a levegőztetés és folyadékáramoltatás eredményeképpen a rögzített ágyból (biofilmes töltet) folyamatosan felússzon és az utóülepítőbe kerüljön. Nem megfelelő levegőztetés (lemezes levegőztetők), vagy helytelen reaktortervezés (nem megfelelő tervezett, illetve rosszul irányított folyadékáramlás) ellenőrizhetetlen iszaplerakódáshoz vezet a rögzített ágyas reaktorban (BISHOP és KINNER, 1986).
Az ilyen rendszerű elárasztott rögzített-ágyas reaktorok levegőztetése két egyenlő fontosságú feladatot lát el. A levegőztetők egyrészt a biológiai folyamatokhoz szükséges atmoszférikus oxigént viszik be, másrészt ezek idézik elő az áramlást, ami biztosítja, hogy a reaktor ne álljon le. Ugyanakkor a rögzített-ágyas reaktor egy áramlási akadályként működik. Minél durvább a rács, annál több a hasonlóság a teljesen kevert medence áramlásához. A szubsztrát fajlagos felületétől függően 5-15 $Nm^3\ h^{-1}\ m^{-2}$ levegőt kell bevezetni. SCHLEGEL (1988) szerint az oxigénbevitelt a rögzített ágy azáltal fokozza, hogy a nagy buborékok szétpukkadnak és a buborékok tartózkodási ideje hosszabb lesz. Ezért általában nagyon könnyű a meglévő eleveniszapos rendszerekhez hozzáilleszteni a levegőztetők számának növelésével, ugyanakkor a reaktor geometriájának megváltoztatása nélkül.
A gyakorlat igazolta, hogy a mindennapi működés során, a rövid indítási szakasz után a költségek miatt a levegőztetést minimalizálni kell. Ha a folyamatos levegőztetés helyett szakaszosan levegőztetnek, akkor az üzemek energia-bevitele jelentősen lecsökkenthető. A rövid intervallumok előnyösebbek. Ráadásul alacsony terhelési időszakban, például éjszaka, az oxigénbevitel tovább csökkenthető, feltéve, hogy nem alakulnak ki anaerob körülmények és az alapvető követelmények is teljesülnek. Elsősorban nagy terhelésű üzemek esetén, ha az oxigénbevitelt szabályos időközönként még több bevitellel egészítik ki, akkor a folyamat stabilitása növelhető és ez az elfolyó víz tisztaságára is pozitívan hat.

2.3. Reaktor térfogat/tervezés

Köztudott tény, hogy a hidraulikus áramlás erősen befolyásolja az egész rendszert (BISHOP és KINNER, 1986). A teljes hidraulikus eljárás kiegészítheti a kevert dugóáramú rendszert, vagy a kettő másfajta hibridjét, mint pl. a kaszkád reaktorokat. Az elárasztott rögzített-ágyas reaktorok tervezésénél nemcsak a szubsztrátot, hanem a reaktor méreteit is igazítani kell a szerves rögzített ágy terheléséhez. Mivel a biofilm vastagságát és szerkezetét nagymértékben befolyásolja a biológiailag lebontható anyagok koncentrációja, a hígítás mértéke, ami a medence térfogatának függvénye, hasonlóan fontos üzemeltetési tényező. Semmilyen körülmények között nem szabad megkísérelni a nagy szennyvíz koncentrációk kiegyenlítését egy kis reaktorban, nagy fajlagos

felületű töltet, vagy biofilm hordozó beépítésével ellensúlyozni. A másik fontos tényező a szennyvízáram töltet előtti elosztásának, szabályozásának a kérdése. Ezek a töltetben kialakuló tápanyag gradiensekkel együtt a rögzített ágy maximális magasságát 4 méterre korlátozzák.

Elvileg minden típusú hagyományos medencébe lehet rögzített ágyat telepíteni. Ebből a szempontból a legfontosabb dolog annak tisztázása, hogy egy adott esetben egy tökéletesen kevert medence, egy csőreaktor, vagy egy kaszkád rendszer jelenthet-e a jobb hatásfokot. Ez a mindenkori tisztítási igénytől (befogadó határértékek) is függ.

Kommunális szennyvíz esetén a szokásos tisztítási igényt rendszerint a hatásos szerves anyag eltávolítás jelenti szimultán nitrifikációval. Ennek a megvalósításához a rögzített-ágyas reaktorokat általában 4-6 g BOI_5 m^{-2} d^{-1} terheléssel szabad csak üzemeltetni. A nitrogén megfelelő eltávolításához számba kell venni, hogy a terhelési hullámok kedvezőtlenül hatnak a nitrifikációra, s ugyanakkor a befolyó szennyvíz koncentrációja, különösen vegyes csatornarendszer esetén, igen széles határok között ingadozik. Ilyenkor ajánlott a reaktorokat egymást követő egységekként, kaszkádszerűen elrendezni, kialakítani. A kaszkádsoron az első egységben lesz legnagyobb a szerves anyag terhelés, majd lépcsőzetesen csökken. Ilyenkor a nitrifikáció nagyobb átlagos üzemi terhelésnél is biztosítható, ha egyébként az egyes reaktorterek oxigénellátottsága, hidrodinamikája megfelelő.

Mivel a csepegtetőtesteknél a biológiai lebontás különböző folyamatai függőleges irányban tagozódnak a szűrű különböző, csőreaktorszerűen működő rétegeiben (WANNER és GUIJER, 1984), az elárasztott filmes rendszereknél a 3-6 kaszkádra történő felosztás ugyanúgy pozitívan hat a biológiai folyamatok optimalizálására. Az egyes kaszkádokban kialakuló, elég jelentősen eltérő mikroorganizmus együttesek ilyenkor az áramlási irányban tagolódnak. Nagyobb lesz ilyen kialakításnál a működés megbízhatósága és a lebontási hatásfok is. Az ilyen típusú elrendezés a hidraulikus és tápanyagterhelési hullámokra rugalmasabban reagál. Ez lehetővé teszi, hogy az egyesített csatornarendszerekre jellemző terhelési hullámokat is megfelelően kompenzálhassa a tisztító a nitrifikáció tekintetében is.

A nagyobb szerves anyag terhelések elkerülése érdekében persze fokozottan ajánlatos az ilyen tisztítóknál az ipari szennyvizek előkezelése, lebegő anyag tartalmának elválasztása. Nem szabad ugyanakkor megfeledkezni arról, hogy éppen a biológiailag könnyen bontható, többnyire oldott anyagok okozhatnak gyors filmszaporulatot, túlburjánzást, eltömődést. Ha egy ipari szennyvíz olyan komponenseket is tartalmaz, amelyeknek adott koncentráció felett gátló hatása lehet a mikroorganizmusok szaporodására, biztosítani kell, hogy a reaktorban ez ne haladja meg a kritikus értéket. A reaktort tehát megfelelően nagy térfogattal kell tervezni, illetőleg tisztított víz visszaforgatással lehet ilyenkor az érkező szennyvizet hígítani.

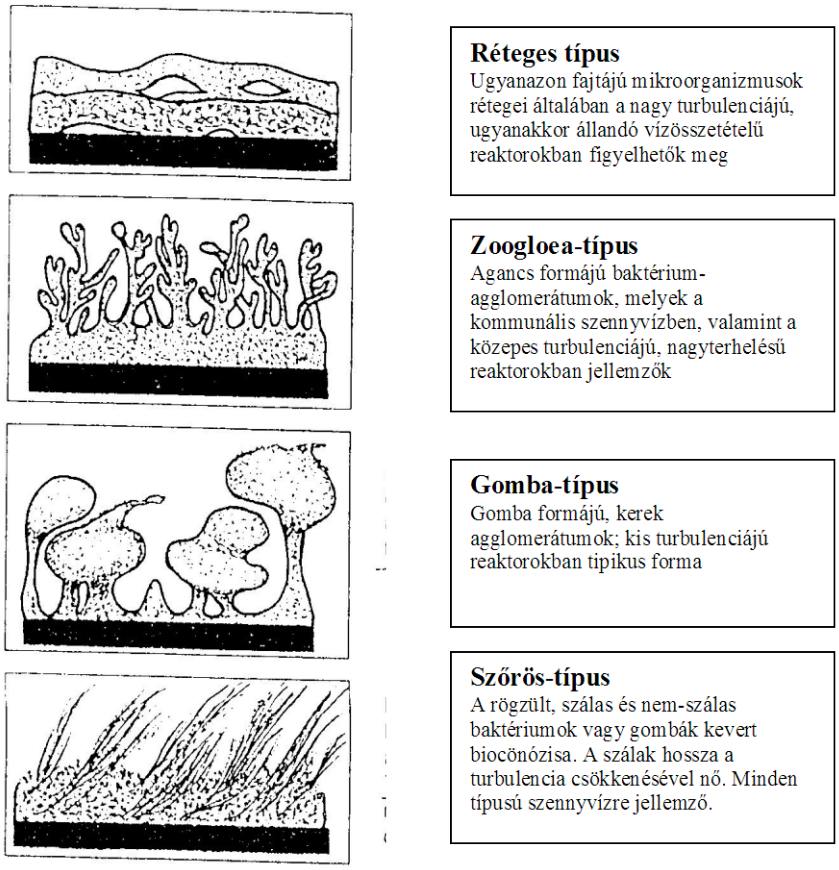
3. A biofilm fejlődése és szerkezete az elárasztott rögzített-ágyas reaktorban

A biofilm hordozón lezajló kolonizációs folyamatokat részletezésére itt nem térünk ki, azokat más jellegű áttekintők részletezik.

Számos szakember (IAWA, 1993), közöttük TOETTRUP és társai (1993), BOLLER és társai (1993), BISHOP és KINNER (1986) és MOSER (1985) az aerob biofilmes rendszereknél a vékony

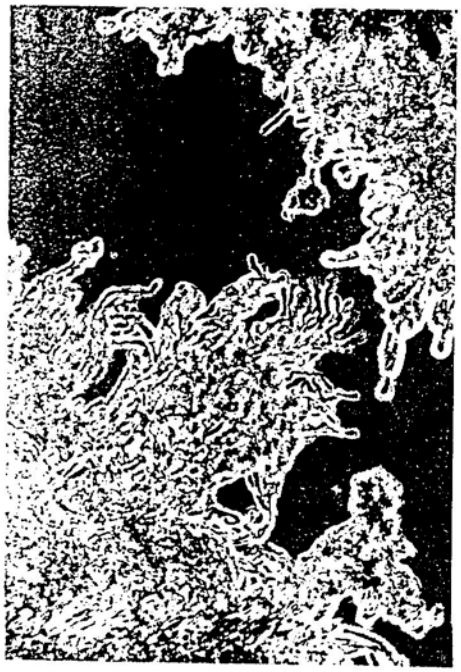
biofilm fenntartását (<100 µm) javasolták. Ezzel a technológiával jobb lebontási hatásfokot értek el, mint vastagabb biofilmekkel (1500 µm felettiekkel). Mikroszkóp alatt vizsgálva, a vastagabb biofilmek láthatóan bolyhosak és repedezettek (LEWANDOWSKI és társai, 1994; HAMILTON és CHARACKLIS, 1989) és így ténylegesen sokkal nagyobb filmfelületet alkotnak, mint a vékony biofilmek, a táplálék azonban mégis alig jut mélyebbre a hordozón megtapadó biofilmben, mint 200 µm. A biofilm és a folyadék határfelülete természetesen egyik esetben sem sima, síklap szerű (BISHOP és KINNER, 1986). Logikusnak tűnik, hogy ehhez a típusú folyamathoz is szükség van azonban minimális mennyiségű biomasszára, mint az eleveniszapos rendszerek esetében. Mint ahogyan a 1. táblázat is mutatja, a szerves anyag terhelés és a kialakuló biomassza tömeg között szoros összefüggés van. Az iszap szerves anyag hányada kb. 65-85 %. A biofilm vastagságának növekedésével rendkívül módon nő a porozitás, a jellegzetes rostok keletkezése miatt. Ezt mutatja a 6. ábra.

Ez biztosítja, hogy a vastagabb biofilmben is megfelelő lehessen a tápanyagellátás és még az olyan érzékeny folyamatokat se gátolja, mint a nitrifikáció. Ezzel ellentétben a biofilm felületén gyorsabb növekedés megy végbe, ami mind annak az adszorpciós potenciálján, mind a lebontó hatékonyságán érezhető. A rögzített-ágyas reaktorokról szerzett tapasztalatok szerint a gyakorlatban a vastagabb biofilmeket is sikeresen lehet használni káros következmények nélkül. A 7. ábra egy Zoogloea-típusú biofilm mikroszkopikus felvétele.



6. ábra: Az elárasztott felületeken kialakuló baktériumos biofilm

A biofilmeket „természetes populációként” lehet jellemezni, hiszen természetes szelekció útján választódik ki, melyik organizmus marad életben (MOSER, 1985). Tulajdonképpen három típusú organizmus alkotja a biofilmet, mint ahogy azt más rendszerekből is tudjuk: baktérium, protozoa és metazoa. MOSER leírta egyik cikkében (1985) ezeknek a csoportoknak a tevékenységét, tisztításban betöltött szerepét



7.ábra: Egy Zoogloea-típusú biofilm mikroszkopikus képe

A tartósan elárasztott felületeken kialakuló biofilmek néhány dologban különböznek a csepegtetőtesteken és a forgó tárcsás kontaktorokon kialakuló filmektől. Pszychoda legyeket (Psychodidae) vagy más rovarokat nem lehet azoknál megfigyelni, mivel alig van lehetőségük tojásaik lerakására. A Peritricha fajnak viszont nagy kolóniái fordulnak elő a kommunális szennyvízek elárasztott-ágyas biofilmes tisztítóinál mérsékelt turbulencia esetén, megfelelő oxigén ellátás esetén. Különösen a Carchesium, Zoothamnium, Epistylis, Opercularia és Vorticella a található a filmekben nagy mennyiségben, melyek általában fogyasztják, stabilizálják a keletkező biofilmet. A szálas baktériumok vagy gombák néhány faja is betöltheti ezt a szerepet. Ezeket a szálakat baktérium telepek veszi körül, és extracelluláris polimer anyaggal (EPS) kapcsolódnak, kötődnek azokhoz. A biofilm felületén más protozoák is előfordulhatnak, elsősorban a legelő fajok, mint a kerekes féreg (Rotaria, Cephalobdella) és egyéb férgek (Nais, Chaetogaster, Tubificidae, Nematoda sp.), melyek a baktérium-mátrixon élnek, mintegy újrahasznosítva azt. Hasonló biocönotikus telepeket írt le BISHOP és KINNER (1986) a forgó biológiai kontaktoroknál (RBC), valamint CURDS és COCKBURN (1970) az eleveniszapos rendszereknél.

Bár ezek az organizmusok az iszap egy részét eltávolítják, csak ritkán rombolják szét a biofilmet, inkább pozitív hatásuk érvényesül az iszap lebontása, feldolgozása révén. Ha ezek az organizmusok túlzott arányban figyelhetők meg a biomasszában, akkor a terhelés és a nem-levegőztetett intervallumok gyakoriságai is növelhető. A baktériumok az elárasztott biofilmben különböző formában növekednek. Ennek legjelentősebb formái láthatók a 6. ábrán. Gyakran jelentkeznek az

ábrán látható filmszerkezetek keverten is. A növekedés formáját és a biofilm szerkezetét meghatározó tényezők a baktériumfajok típusa, domi8nanciája, a turbulencia mértéke és a szennyvíz összetétele (6. ábra). Az 1. táblázat a kialakuló biofilm vastagságáról nyújt áttekintést, ami meghatározóan a terhelés és a turbulencia függvénye a visszamosás nélkül üzemeltetett biofilmes rendszereknél.

Az elárasztott biofilmek fölösiszap termelését nagymértékben befolyásolja az iszapágy relatív biológiai terhelése. Az iszaptermelés ugyanakkora térfogati terhelésnél rendszerint lényegesen kisebb, mint az eleveniszapos rendszereknél. A 4-6 g BOI_5 m^{-2} d^{-1} terhelésű, kaszkád rendszerű kiépítésű lakossági tisztítóknál általában 0,01-0,1 kg MLVSS / kg BOI_5 a fajlagos iszaphozam Ipari szennyvizek nagyterhelésű (20-30 g BIO_5 m^{-2} d^{-1}) tisztítóiban 0,6 kg MLVSS / kg BOI_5 iszaphozamot is mértek (SCHLIEGEL, 1998). Megfigyelhető volt ugyanakkor, hogy az iszap mennyisége határozottan csökken a rögzített-ágyas reaktorban az előkezelés eredményeképpen. A mikrobiológiai és ökológiai szempontokat is figyelembe véve, ezt elsősorban talán a következőknek lehet tulajdonítani:

- makro-gerinctelenek általi iszap eltávolítás (Rotaria, férgek),
- rögzült baktériumok alacsonyabb iszaphozama (AUDIC és társai, 1984),
- gyorsan növekvő baktériumok hátrányba szorulása a lassabban növekvő fajokkal szemben (HAMILTON és CHARACKLIS, 1989)
- teljesebb mineralizáció a jó oxigénellátottság eredményeként (ABBASSI és társai, 1996).

4. Példák a gyakorlati alkalmazásokra

A gyakorlati alkalmazás háromrészes derítőmedencétől a nagy, néhány ezer köbméteres rögzített-ágyas, megfelelően méretezett betonmedencékből kiépített elárasztott biofilmes reaktorokig terjed.

A kommunális és ipari alkalmazásoktól eltekintve, melyeket a következő példák részleteznek, a rögzített-ágyas reaktorok a biológiailag lebontható szennyezők bármely típusának az eltávolítására használhatók. Ilyen célra a rögzített ágyas reaktorok sokféle típusa alkalmazható. Nem csak nagy terhelésű rendszerekként szennyvíz előkezelésre, de teljes biológiai tisztításra, sőt utótisztításként különlegesen nagy hatásfokú utótisztítás elérésére is.

4.1 Kommunális szennyvizek tisztítása

Fontos a szennyvíz in situ kezelésének vonatkozásában mind központi mind kistérségi telepeknél, hogy a rögzített-ágyas biofilmes szennyvíztisztítókat bármiféle szennyvízhozam esetén jól lehet alkalmazni, ami ideális módszert jelent a jövőre szennyvíztisztítására. Amikor kis agglomerációk szennyvízének a tisztítására építik ki, gondot jelent a nagy terhelésingadozás az egyes napokon belül, a szélsőséges szezonális szennyvízhőmérséklet, és a szakképzett kezelőszemélyzet hiánya. 4 és 1000 LE közti kapacitású telepeknél különösen előnyös az ilyen megoldás, amelynek minimális az üzemeltetés ellenőrzési, szabályozási igénye.

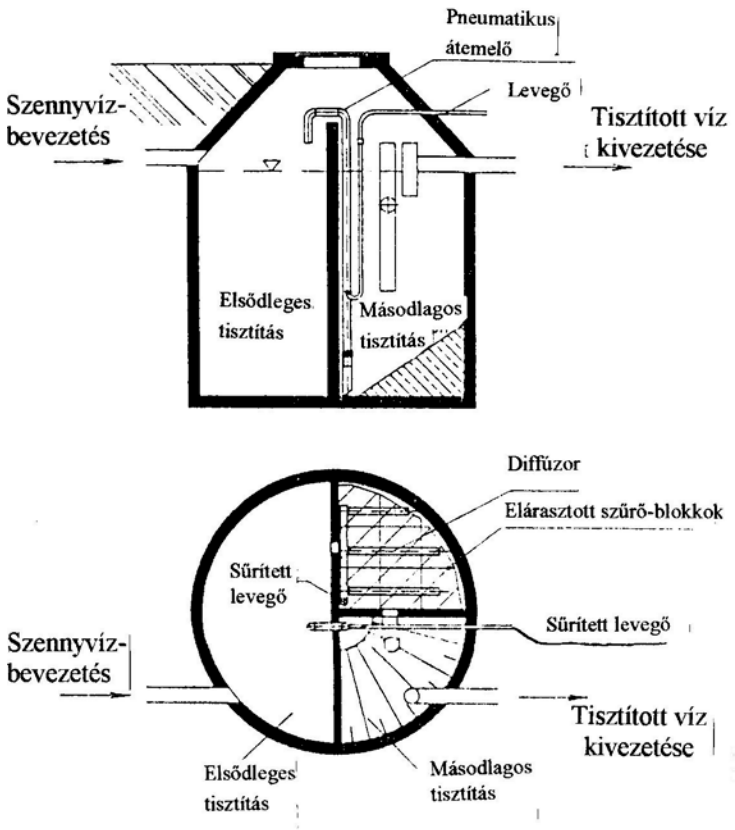
A mintegy 4-6 g BOI_5 m^{-2} d^{-1} terhelésű rögzített-ágyas reaktorok a szerves anyagokat és a nitrogént szimultán el tudják távolítani a szennyvízből. A KOI redukciója 90 %-os, a BOI_5 redukciója 95 %-os lehet. Rendes körülmények között az ammónium – N nitrifikációja 95 % feletti (t>12 ^oC), (BOI terhelés < 4 g m^{-2} d^{-1}).
A biofilmes rendszerek nitrifikációs különösen alkalmasnak bizonyultak. SCHLEGEL már 1988-ban közreadta egy rögzített-ágyas tisztító működési eredményeit, mely szerint hozzávetőleg 1,5 g m^{-2} d^{-1} NH_4-N-t lehet ilyen üzemmel megbízhatóan nitrifikálni. Az 1991-ben Münchenben publikált tanulmányok eredményei (Műszaki Egyetem, München, 1991), valamint az 1995-ben KUGEL és HELLFEIER fluidizált ágyakkal kapcsolatos mérései is igazolták, hogy a rögzült nitrifikáló mikroorganizmusokkal működő rendszerek az ingadozó terhelésnél és kis vízhőmérsékletnél is rendkívül üzembiztosak. Szakaszos levegőztetéssel, nitrát tartalmú víz recirkulációjával, vagy külső forrásból adagolt szerves tápanyaggal jó denitrifikációs arány is elérhető volt. Ha más típusú üzemekkel hasonlítjuk össze az ilyen tisztítókat, a bifilm tömegét behatároló felület nagyságát mindig figyelembe kell venni. Folyamatos levegőztetésnél vastag biofilmmel a szimultán denitrifikáció 40 %-körüli a biofilm rétegen belüli részleges anoxikus körülmények, szimultán denitrifikáció eredményeként. 70 %-os nitrogén-eltávolítást is el lehet azonban érni az ilyen rendszerrel 100 %-os vízrecirkulációval. Így teljesíteni lehet a sokkal nagyobb kommunális szennyvíztisztító üzemekre előírt összes nitrogén határértéket is, ami 18 mg/l (SCHULZ és társai, 1998).

A 20-50 %-os szimultán foszforeltávolítás általában megvalósítható a biofilmmel, amit nem csak belső mérések igazoltak, hanem az 1991-ben a Müncheni Technológiai Intézet által kivitelezett vizsgálatsorozat is (Müncheni Műszak Egyetem, 1991). A tisztán biológiai foszforeltávolítás valószínűleg lehetetlen az iszaprecirkuláció hiánya, valamint az aerob és anaerob körülmények célirányos váltogatásának a hiánya miatt. Kisebb mértékű szimultán többletfoszfor eltávolítást azonban sok üzemből jeleztek. További kutatások szükségesek ennek a pontos tisztázásához. A foszfátrészecskék esetleges kristályosodásának is szerepe lehet a foszfor eltávolításánál, hiszen ilyen kristályokat sokszor megfigyeltek a biofilmekben.

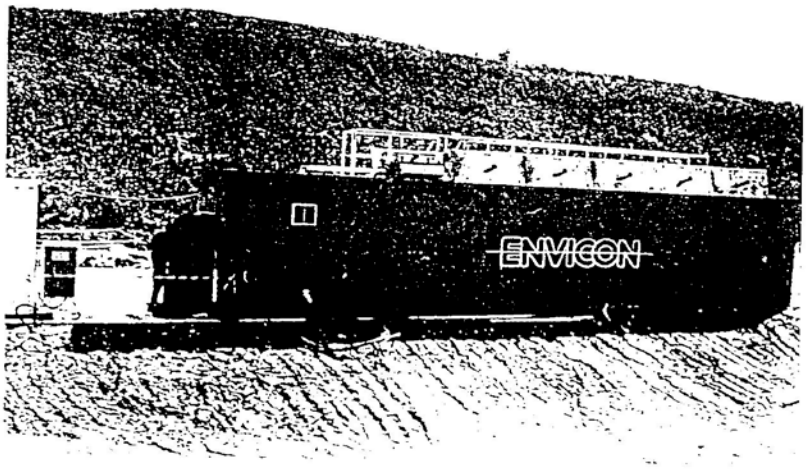
A 8. ábrán látható az ENVICON 3 K PLUS, a nagyon kicsi rögzített-ágyas reaktorok egy példája (4-200 LE) háromrészes oldómedéncéből kialakítva. A 9. ábra egy elárasztott rögzített-ágyas reaktor elven működő mobil szennyvíztisztítót mutat.

4.2. Ipari alkalmazások

Az elárasztott rögzített-ágyas reaktor technológia sikeresen alkalmazható különböző típusú ipari szennyvizek kezelésére, pl. toluollal szennyezett talajvíz, latexes és tenzides szennyvizek, halfeldolgozásból, üdítőital és sörgyártásból, textil- és szőnyeggyártásból, amidok és aromák előállításából származó szennyvizek tisztítására.. Az elárasztott rögzített-ágyas eljárás minden típusú biológiailag bontható szennyvíz tisztítására alkalmas, még akkor is, ha a KOI:BOI arány nem túl jó, vagy a befolyó szennyvíz hozama jelentősebben ingadozó is. A mikrobiológiai magyarázat erre a jellegzetesen lassan növekvő rögzült mikroorganizmusok agglomerációja. A következőkben néhány lehetséges alkalmazás kerül részletesebb bemutatásra.



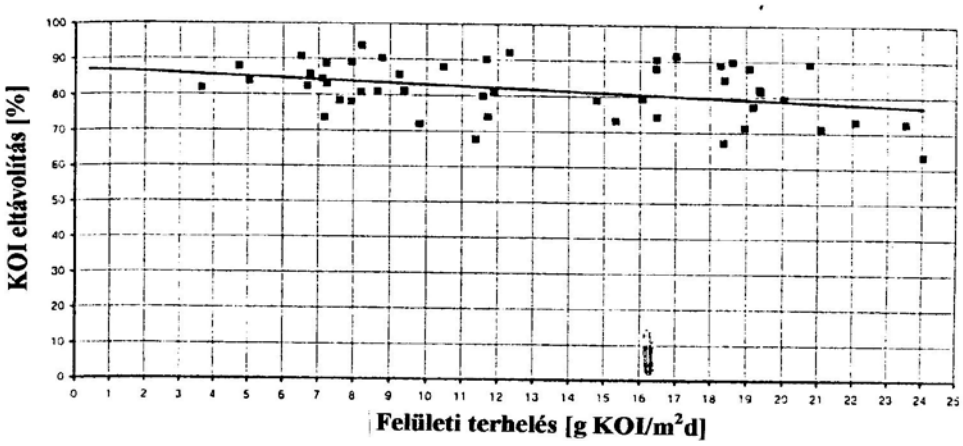
8. ábra: ENVICON 3K PLUS egy háromszakaszos ülepítő medencében



9. ábra: Egy konténer-típusú szennyvíztisztító üzem

4.2.1. Elárasztott rögzített ágyas reaktor előtisztítási lépcsőként – zöldség- és jégkrémelőállító üzem szennyvizének a kezelésére

Egy 25.000 LE-re tervezett, zöldségfeldolgozó és jégkrémgyártó üzemből származó szennyvíz előtisztítását végző üzemnek hatékonyabb módszerre van szüksége a szerves anyag hatásos eltávolításához. Ehhez, valamint a nitrifikáció javítására a szennyvíztisztító kapacitását 30.000 LE-re kellett növelni. A költséganalízis szerint egy rögzített-ágyas reaktor beruházása 50 %-kal kevesebbe került, mint a meglévő eleveniszapos rendszer hagyományos módon történő bővítése. A 10. ábrán látható a KOI-eltávolítás hatékonysága, ami a SCHLEGEL által javasolt rögzített-ágyas reaktorral elérhető lett (1998).



10. ábra: KOI-eltávolítás egy zöldséget és jégkrémet előállító üzem szennyvizéből

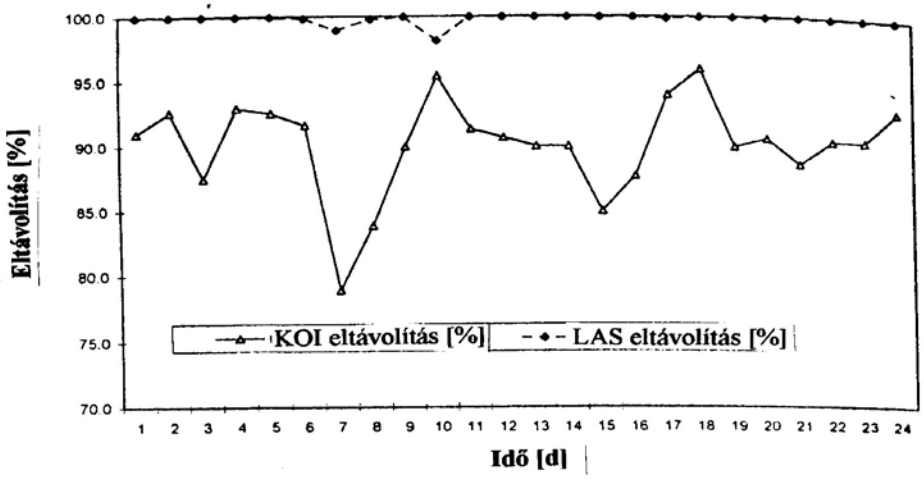
4.2.2. Rögzített ágyas biofilmreaktor egyedüli biológiai lépcsőként – detergenseket és kozmetikai cikkeket gyártó üzem szennyvízének a tisztításánál

A detergensek, tisztítószerek, kozmetikumok előállításából származó, tenzidekkel szennyezett szennyvíz teljes biológiai tisztítása nem egyszerű feladat. Az adott esetben a célra rögzített-ágyas reaktort építettek ki az alábbi fő méretekkel:

- előülepítő 3,5 m^3
- rögzített filmes ágy 6,5 m^3
- utóülepítő 3,5 m^3
- rögzített hordozó felülete 975 m^2.

A reaktorba befolyó szennyvíz KOI-je kb. 5000 mg/l volt, a tenzid koncentráció pedig átlagosan kb. 2000 mg/l (metilénkék aktív alkotók, MBAS). Antispumint folyamatosan adagoltak a szennyvízhez a habképződés csökkentésére.

A 11. ábrán látható a KOI és tenzid (MBAS) eltávolítás hatékonysága a rögzített ágyas reaktorban. Az adatokból jól látható, hogy ilyen típusú ipari szennyvizek teljes biológiai tisztítására a rögzített-ágyas biofilmes rendszer jó hatásfokot biztosít kis fenntartási költség mellett. Az eleveniszapos üzemekhez képest az iszaphozam is csak azokénak a töredéke lett.

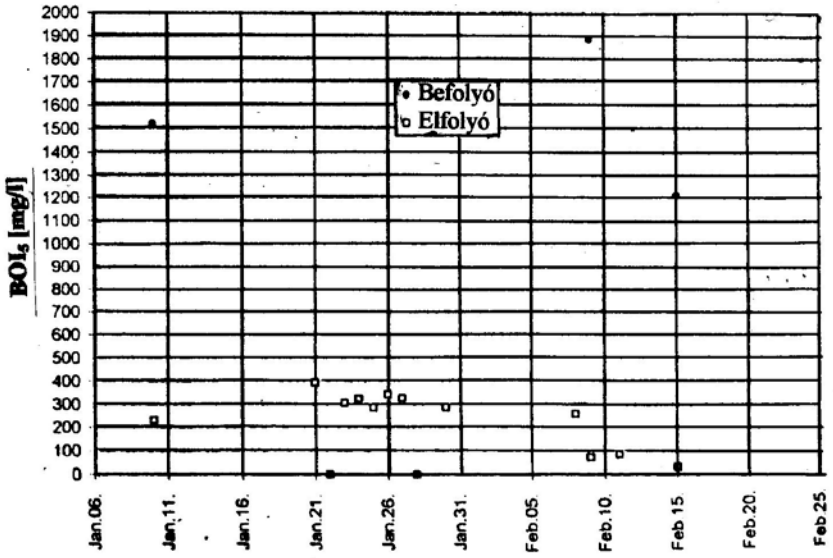


11. ábra: KOI- és tenzid-eltávolítás hatásfoka kozmetikai cikkek előállításával foglalkozó üzem szennyvizénél

4.2.3. Elárasztott biofilmes reaktor utótisztítási lépcsőként – vágóhídi szennyvíz tisztításánál

A vágóhídnak korábban csak fizikai-kémiai szennyvíz előtisztító üzeme volt, zsírfogóval, ülepítővel és dekanterrel, a disznók és marhák levágásakor keletkező szennyvíz előkezelésére. A fizikai-kémiai tisztítóra került szennyvízben a KOI mennyisége 4,600 és 6,700 mg/l között volt. A dekanterből kifolyó víz, valamint az ülepítés nélkül a biológiai tisztításra engedett szennyvíz maradék KOI tartalma 1.200 és 3.000 mg/l között változott, amit 800 mg/l KOI-érték alá kellett csökkenteni.

Az üzembe helyezett rögzített-ágyas reaktor a 4.2.2. alfejezetben leírtnak megfelelő volt. A BOI_5-terhelés meghaladta a 12 g m^{-2} d^{-1}-ot. A tisztításhoz foszfort kellett adagolni az fizikai-kémiai előtisztítást követően a szennyvízbe a tápanyagegyensúly biztosítására. A elárasztott ágyas biofilm a KOI több, mint 80 %-át távolította el a szennyvízből. A 12. ábrán látható, hogy a célértéket a tisztítás a BOI_5 határértékét illetően a teljes vizsgálati időszakban teljesítette.



12. ábra: Egy vágóhíd szennyvizének végső tisztítása rögzített-ágyas reaktorral

IRODALOMJEGYZÉK

ABBASSI, B., GIACOMAN-VALLEJOS, G., RÄBIGER, N. (1996). Prozeβführung der biologischen abwasserreinigung mit minimierter Überschuβschlammproduktion. *3. GVC-Kongreβ:* Verfahrenstechnik der Abwasser- und Schlammbehandlung, 14-16 Oct. 1996. Würzburg. Germany.

ATV (1996). Arbeitsbericht der ATV Arbeitsgruppe 2.6.3. „Tauch- und Tropfkörper" im Fachausschuβ 2.6. „Aerob biologische Abwasserreinigungsverfahren". „Anlagen mit getauchten Festbetten", *Korrespondenz Abwasser* 43. 2013-2023.

AUDIC, J. M., FAUP, G. M., NAVARRO, J. M. (1984), Specific activity of *Nitrobacter* through attachment granular media. *Water Res.* 18. 745-750.

BERKELEY, R. C., LYNCH. J. M., MELLING, J., RUTTER, P. R., VINCENT, B. (1980), *Microbial Adhesion to Surfaces.* Chichester: Ellis Horwood.

BISHOP, P. L., KINNER, N. E. (1986). Aerobie fixed-film processes, in: *Biotechnology,* Vol. 8 (REHM, H.-J., REED, G., Eds.). pp. 113-176. Weinheim: VCH.

BOLLER, M., BUJER, W., TSCHUI, M. (1993), Parameters affecting nitrifyung biofilm reactors, *2nd Int. Spec Conf. Biofilm Reactory*, Paris.

CURDS, C. R., COCKBURN. A. (1970). Protozoa in biological sewage treatment process I and II, *Water Res.* 4. 225-249.

HAMILTON, W. A., CHARACKLIS, W. G. (1989). Relative activities of cells in suspension and in biofilms, in: *Structure and Function of Biofilms* (CHARACKLIS, W. G., WILDERER. P. A., Eds.), pp. 199-220. Chichester: John Wiley & Sons.

IAWQ (1993), *First Int. Spec. Conf. Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Process* (27/28 September). Paris.

KUGEL., G., HELLFEIER, G. (1995). Versuche mit Wirbelbettreaktoren zur Stickstoffelimination, *Korrespondenz Abwasser* 5. 770-780.

LEWANDOWSKI, Z., STOODLEY, P., ALTOBELLI, S., FUKUSHIMA, E. (1994). Hydrodynamics and kinetics in biofilm systems – recent advanses and new problems, *Water Sci. Technol.* 29. 223-229.

MOSER, A. (1985). Special cultivation techniques, in: *Biotechnology,* Vol. 2 (REHM, H., J., REED, G., Eds.), pp. 311-347. Weinheim: VCH.

Normenausschuβ Wasserwesen (NAW) (1989). DIN 19557 „Kläranlagen" Füllstoffe aus Kunststoff.

SCHLEGEL, S. (1988). Der Einsatz von getauchten Festbettkörpern (fixed-bed filters) zur Nitrifikation. *Korrespondenz Abwasser* 35. 120-126.

SCHLEGEL, S. (1998). Kostengünstige Vorbehandlung industriellen Abwassers vor der Indirekteinleitung. Paper presented at ATV Seminar: „leistungsverbesserung bestehender Kläranlegen" (2/3 March). Essen.

SCHULZ genannt MENNINGMANN, J., RIHARDT, M., CHROMIK, R. (1998). Denitrifikation mit getaudhten Festbettreaktoren in der dezentalen Abwasserreinigung. *Entsorgungs Praxis* ½. 37-41.

SEYFRIED, C. F. (1997). Verfahrenstechnischer Überblick zur Biofilmtechnik. ATV Seminar 28/97 „Einsatz von Biofilmreaktoren", Oldenburg.

Technische Universität München (1991). Lehrstuhl und Prütamt für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München: Abschluβbericht über Untersuchungen an Vario Compact Kläranlagen (VCK) (January 1991).

TOETTRUP, H., ROGALLA, F., VIDAL, A., HARREMOES, P. (1993). The treatment trilogy for floating filters, *2nd Int. Spec. Conf. Biofilm Reactors*, Paris.

VAN LOOSDRECHT, M. C. M., EIKELBOOM, D., GIALTEMA, A., MULDER, A., TIJHUIS, L., HEIJNEN, J. J. (1995). Biofilm structures, in: *Int. IAWQ Conf. Workshop Biofilm Structure, Growth and Dynamics* (30 August-1 September), Noordwijkerhout.

WANNER, O., GUJER, W. (1984). Competition in biofilms, *Water Sci. Technol.* 26. 27-44.