



BEZSENYI ANIKÓ^{1,2} **GYARMATI IMRE¹** **DR. OLÁH JÓZSEF¹** **DR. TAKÁCS ERZSÉBET³** **MAKÓ MAGDOLNA¹**

bezenyia@fcsm.hu, gyarmatii@fcsm.hu, olah39@t-online.hu

¹ Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.,
1087 Budapest, Asztalos Sándor út 4.

² Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola, Budapest

³ MTA Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK),
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

KIVONAT A biológiai nitrogéneltávolítás a nagy terhelésű eleveniszapos szennyvíztisztító rendszerek esetében nehezen kivitelezhető, hiszen a nitrifikáló baktériumok kizárólag alacsony szervesanyag-terhelés, illetve magas iszapkor esetén képesek a biomasszában felszaporodni. A nitrogéneltávolító mikroorganizmusok szelektív szaporítását lehetővé tevő biofilmes technológiák alkalmazásával a nitrogéneltávolítás lényegesen nagyobb teljesítménnyel/sebességgel, kompakt reaktorokban is megvalósítható. A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep eleveniszapos technológiája, az alkalmazható alacsony iszapkor és a magas iszapterhelés mellett a szerves szénvegyületek bontását képes elvégezni. A nitrifikáció és azt követő denitrifikáció döntő hányada a bioszűrési fokozatban (Biofor™) megy végbe. Az utódenitrifikációhoz kiegészítő szénforrás (metanol) adagolnak. A nitrifikációs szűrőkben képződő nitrát kisebb hányada visszavezetik az eleveniszapos rendszer elődenitrifikációs reaktoraiba. Cikkünkben ismertetjük a nitrifikáció és denitrifikáció mikrobiológiai, valamint technológiai vonatkozásait, különös tekintettel az utódenitrifikáció kiegészítő szénforrás (metanol) igényére és annak a mikroorganizmus közösségre gyakorolt szelektív hatására. Bemutatjuk a tisztítómű kétlépcsős biológiai fokozatának technológiai sajátosságaitól adódó üzemi tapasztalatainkat.

KULCSSZAVAK nitrifikáció, utódenitrifikáció, oxikus és anoxikus viszonyok, bioszűrési technológia, BIOFOR™, külső szénforrás, metanol, metilotróf organizmusok, autotróf organizmusok, térfogati terhelés, bioszűrők visszamosása, mikroszennyezők eltávolítása, ko-metabolizmus

VÍZ ÉS TUDOMÁNY

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen üzemelő nitrogéneltávolító bioszűrő-fokozat szerepe, teljesítménye és üzemeltetésének tapasztalatai

1. BEVEZETÉS

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep 1966. évi üzembe helyezése óta mind mechanikailag, mind biológiailag tisztítja a főváros XVIII., XIX., XX. és XXIII. kerületeiben képződő szennyvizet. A tisztítómű hidraulikai kapacitása a kezdeti 30 000 m³·nap⁻¹-ről a fejlesztések hatására 80 000 m³·nap⁻¹-ra (~300 000 LEÉ) emelkedett. A tisztítótelep hidraulikai terhelése az utóbbi évtizedekben közel állandó ~60 000 m³·nap⁻¹. A biológiai tisztítás 1999-ig kizárólag a szerves szennyező komponensek biodegradációját jelentette nagy terhelésű eleveniszapos technológia alkalmazásával.

A tisztított szennyvizet befogadó, mindkét végén zsilipelt Ráckevei-Soroksári-Duna (RSD) kis vízhozamából (átlagosan 40 millió m³ víztérfogata üzemszerű vízpótlás esetén nyári időszakban 1,5-2,5, míg télen 3-5 hét alatt cserélődik ki) adódóan lényegesen érzékenyebb az eutrofizációt okozó növényi tápanyagok (N és P) bevezetésére, mint a Duna főága. Ezen okból szükségessé vált a tisztítómű technológiájának korszerűsítése, amelynek eredményeként 1999-ben egy kompakt, elsősorban a nitrogéntartalom biológiai átalakítását, eltávolítását biztosító második biológiai tisztítási fokozattal egészült ki a korábbi technológia. A második biológiai fokozat kétlépcsős bioszűrős

technológia (nitrifikáció + utódenitrifikáció) formájában került megvalósításra (BIOFOR™, 1. ábra). A hatékony utódenitrifikáció biztosítása érdekében biológiailag könnyen bontható külső szerves szubsztrátot (metanol) adagolnak. A foszfor eltávolítása kémiai úton valósul meg, vegyszeres kicsapással, alapvetően az elő-, valamint az utóülepítés során. Az alkalmazott vas (III)-klorid



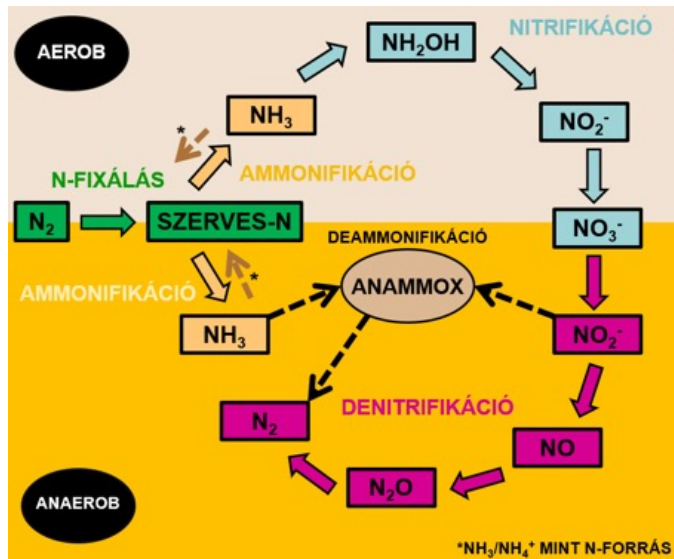
1. ábra: BIOFOR™ nitrifikációs (balra) és utódenitrifikációs (jobbra) bioszűrők

adagolására az ülepítőket megelőzően kerül sor. A bioszűrési fokozatban (utó-denitrifikációt megelőzően) még lehetőség van vegyszeradagolásra az elfolyó TP-koncentráció alacsonyan tartása érdekében.

2. A NITRIFIKÁCIÓ ÉS A DENITRIFIKÁCIÓ FONTOSABB ÖSSZEFÜGGÉSEINEK ISMERTETÉSE

2.1 A SZENNYVÍZ NITRÓGENFORGALMA

A természetes nitrogénciklus lépései zajlanak le a szennyvíz tisztítás folyamatában is. A nitrogéneltávolítás ezeken a természetes folyamatokon alapul, de az egyes lépések nem azonos súlyúak. A szennyvíztisztítási technológia szempontjából az ammonifikációnak, a nitrifikációnak és a denitrifikációnak van kiemelkedő szerepe a nitrogénforgalomban (2. ábra).

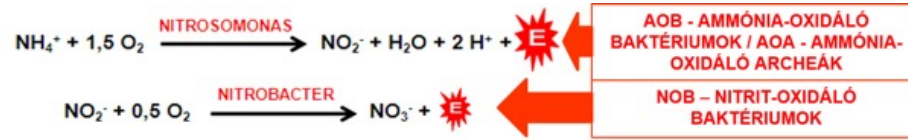


2. ábra: A nitrogén körforgása a szennyvíztisztítási műveletek során

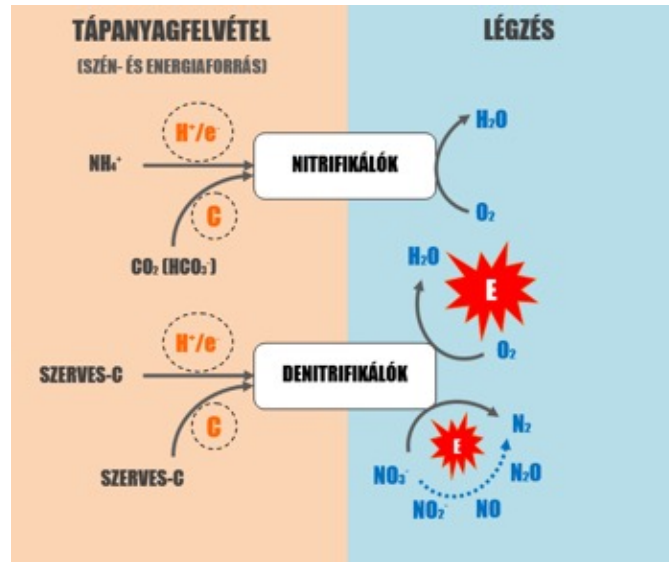
Az ammonifikáció során a mikroorganizmusok a szerves kötésbe épült nitrogént szabadítják fel ammónia formájában az általános lebontási folyamatok során. A szennyvíztisztításban a befolyó víztől az elfolyó, tisztított szennyvíz felé haladva az ammonifikáció szerepe egyre jobban csökken úgy, ahogyan a szennyvíz szervesanyag-tartalma is fogyatkozik.

A következő lépésben a nitrifikálók a szennyvíz ammóniatartalmát két lépésben oxidálják. Az ammónia nitritté alakítását az ammónia-oxidáló (AOB = Ammónia-Oxidáló Baktériumok; AOA = Ammónia-Oxidáló Archeák, azaz ősbaktériumok), majd a nitrit

nitráttá oxidálását a nitritoxidálók (NOB = Nitrit-Oxidáló Baktériumok) végzik az alábbiak szerint:



Az első reakcióból több energia nyerhető, azaz az ammónium oxidációja kedvezőbb az energianyerés szempontjából, mint a nitrit oxidációja. A nitrifikálók az ammónium mellett külön szénforrás felvételére is szorulnak, hiszen nem szerves anyagot fogyasztanak. A szénforrás a szén-dioxid, amelyet bikarbonát (HCO₃⁻) formában hasznosítanak. Tehát az ammónia energiaforrásként funkcionál, a szén-dioxid pedig szénforrásként a sejt szervesanyagának felépítéséhez (akár a növényeknél). Mindeközben oxigént lélegeznek, vagyis aerobok (3. ábra), ezért a nitrifikációért felelős reaktorzónát levegőztetni kell.



3. ábra: A nitrifikáló és a denitrifikáló mikroorganizmusok sejtlejtani folyamatainak lényegi magyarázata

A denitrifikáló mikroorganizmusok a nitrátot nitriten keresztül molekuláris nitrogénné redukálják O₂-hiányos (anoxikus)

környezetben (2. ábra). Nitrogénig futó folyamat végén az inert gáz a légkörbe távozik, ez történik a gázhalmazállapotú közti-termékekkel is. Heterotróf és organotróf szervezetek, azaz szénforrásként és energiaforrásként is szerves anyagokat használnak (3. ábra). A nitrát a légzés során alakul át. Az oxigén gátló hatású a

denitrifikáció enzimeire (szintézis), ráadásul az aerob lebontás energetikailag is kedvezőbb a baktériumok számára. Nitrátlégzésre oxigénmentes környezetben váltanak, vagyis fakultatív anaerobok. A denitrifikációhoz szükséges enzimek szintézise induktív, vagyis az ehhez szükséges környezeti feltételek mellett történik. A nitrát/nitrit jelenléte nem minden esetben szükséges, gyakran önmagában az anaerob környezet is elegendő lehet, de valójában mikroorganizmusonként eltérő, komplex szabályozás rendszeren alapul az enzimek előállítása (Carreira és mtsai, 2018; Hong és mtsai, 2019; Moir és mtsai, 1995).

Az előzőkből következik, hogy ha nitrogéneltávolításra szeretnénk a denitrifikálókat használni, akkor tilos levegőztetni a reaktorteret és tápanyagként egyszerű szerves vegyületekről kell gondoskodni. Ez utóbbi származhat belső és külső forrásból is. A belső szénforrás általában a nyers szennyvízben jelenlévő vagy az iszap hidrolízise során képződő szervesanyag, a külső szénforrás pedig valamilyen ipari maradékanyag (sörfőzőkből, tejüzemekből, cukoriparból) vagy ipari termék (metanol, etanol, ecetsav).

2.2 A TARTÓZKODÁSI IDŐ ÉS A BAKTÉRIUMOK SZAPORODÁSA

A nitrifikáló baktériumok relatíve kis mennyiségű energiához jutnak az ammónium és a nitrit oxidációjából, így a reprodukciós/generáció idejük meglehetősen hosszú, lassan szaporodnak, ennél fogva a populációjuk mérete is kicsi marad. A szerves anyagokon szaporodó organotrófokhoz hasonlítva kifejezetten kicsi a populációméret. Általában a kommunális és ipari szennyvízben a széntartalmú szennyeződés sokkal nagyobb koncentrációban jelenik meg, mint a nitrogéntartalmú. Az organotróf baktériumok növekedéséhez mindig több tápanyag áll rendelkezésre. Ráadásul az organotróf baktériumok több energiát

nyernek a tápanyaguk feldolgozása közben, mint a nitrifikálók, így lényegesen gyorsabban is szaporodnak. Az organotróf baktériumok generációs ideje jellemzően 15 és 30 perc között van, míg a nitrifikáló baktériumoké 48 és 72 óra között lehet, ha kedvezőek a feltételek. Eleveniszapos rendszerekben egy relatívan magas, üzemi hőmérséklettől függően minimum 6-8 napos nitrifikációs-izsaptartózkodási időt (iszapkort) kell tartani ahhoz, hogy a lassan növekvő és szaporodó, gyenge pehelyképző képességű és ahhoz nehezen kapcsolódó nitrifikáló baktériumoknak lehetőségük legyen az elszaporodásra, feldúsulásra (Gerardi, 2002).

Az eleveniszapos technológiánál sokkal kedvezőbb feltételeket biztosítanak a biofilmes rendszerek az autotróf nitrifikációt végző baktériumok számára. Előnyt jelenthet a biofilmes rendszereknél a nitrifikációt gátló anyagok (pl. fenol) elvileg korlátozottabb diffúziója és az, hogy a nyálkának is nevezett extracelluláris polimer anyagok (EPS) mátrixa a gyorsabban szaporodó heterotróf/organotróf szervezetek túlnövésének gátat szab a térbeli korlátok miatt (Székely, 2008).

A két nitrifikáló baktériumtípus populációjának mérete között is van különbség. Az ammónium oxidációja kedvezőbb az energianyerés szempontjából, mint a nitrit oxidációja, így az ammóniaoxidálók (AOB, AOA) gyorsabban szaporodnak és a populációjuk nagyobb. Tehát az eleveniszapos technológiákban az ammóniaoxidációs kapacitás jelentősebb, mint a nitritoxidációs kapacitás. Kedvezőtlen üzemeltetési feltételek között ez az oka a nitrit időszakos felhalmozódásának. Kedvezőtlen feltétel lehet az alacsony hőmérséklet, az izsapkimosódás hidraulikai túlterhelés következtében, alacsony oldottoxigén-koncentráció, mérgezés, esetleg egy lökésszerű, könnyen bontható szénterhelés érkezése is (Gerardi, 2002).

Az ammóniaoxidálók és a nitritoxidálók szoros aggregátumokat képeznek a pelyhek és a biofilmek EPS-mátrixában. A nitritoxidálók a biofilm mélyebb rétegeiben, az ammóniaoxidálók a felszínhez közelebb találhatóak. Tehát a két csoport a kémiai folyamatok sorrendjének megfelelően pozicionálja magát az aggregátumokban (Székely, 2008).

2.3 A NIRIFIKÁLÓ ÉS DENITRIFIKÁLÓ MIKROORGANIZMUSOK ÉLETTANI IGÉNYEINEK KIELÉGÍTÉSE

A nitrifikálók esetében a műtárgyra érkező ammóniakoncentráció adott, viszont a megfelelő oxigénbevételről természetesen gondoskodni kell. Mivel a hidrogénkarbonátot használják szénforrásként, figyelni kell arra, hogy a megfelelő mértékű bikarbonát-lúgosság rendelkezésre álljon. Felvételéhez a széndioxidnak bikarbonát formává kell alakulnia a vízben, amely 7-es pH feletti érték mellett valósulhat meg. 10 és 20 °C közötti hőmérséklet esetén 7,0-8,5 pH-érték jellemző a legtöbb eleveniszapos technológiára, így ez a feltétel általában önmagától megvalósul. A hiányzó bikarbonát-lúgosság különböző karbonát/bikarbonát-vegyületekkel (pl. kalcium-hidrogén-karbonát) pótolható. Természetesen olyan faktorok is vannak, amelyeket az üzemeltetés során nem tudunk befolyásolni. Ilyen a hőmérséklet és az inhibitor/toxikus vegyületek jelenléte a szennyvízben, pedig a nitrifikálókra nézve e tényezők is kritikusak.

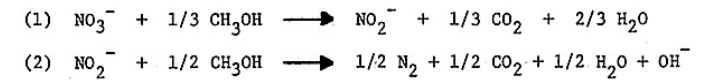
A denitrifikáló szervezetek szervesanyag-fogyasztása mellett nitrátot lélegeznek, tehát a szennyvíztisztítás szempontjából „többfunkciós” organizmusok, hiszen a szerves anyag lebontásán kívül a nitrogéneltávolításban is közreműködnek. Ehhez azonban meg kell akadályozni az oxigén bejutását a rendszerbe, ugyanis – mint korábban említettük – az oxigén légzése energetikailag sokkal kedvezőbb, mint a kémiai kötött oxigént tartalmazó nitráté. Az utódenitrifikáció során a szennyvíz már nem tartalmaz elegendő bontható szerves anyagot, így külső szénforrás használata elengedhetetlen a megfelelő sebességű nitrát eltávolításhoz, azaz táplálni kell a baktériumokat ahhoz, hogy nitrátot lélegezzenek.

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen telepített BIOFOR™-technológia denitrifikációs lépcsőjében metanoladagolás zajlik, mivel az ide érkező – szénforrásoktól megtisztított – szennyvíz szervesanyag-tartalama nem elegendő a denitrifikációs folyamatokhoz (utódenitrifikációhoz).

Amennyiben a mikrobiológiai folyamathoz nem áll rendelkezésre elegendő szerves anyag (jelen esetben metanol), és/vagy a folyamatot gátló oldott oxigén van jelen, akkor a reakció nem megy végig, ami a nitrit feldúsulását eredményezi. A

tényleges metanoligény tehát alapvetően függ a metanol rendelkezésre állásától (feleslegétől), az oldottoxigén-mentes környezettől, a közeg hőmérsékletétől, valamint az alkalmazott technológia típusától (eleveniszapos rendszer vagy töltetes/biofilmes rendszer). Ezek alapján egyértelmű, hogy törekedni kell a sztöchiometriaihoz képest többlet szénforrás adagolására, viszont utódenitrifikációnál fontos szempont a maradék szervesanyag-tartalom minimalizálása (Dholakia és mtsai, 1970).

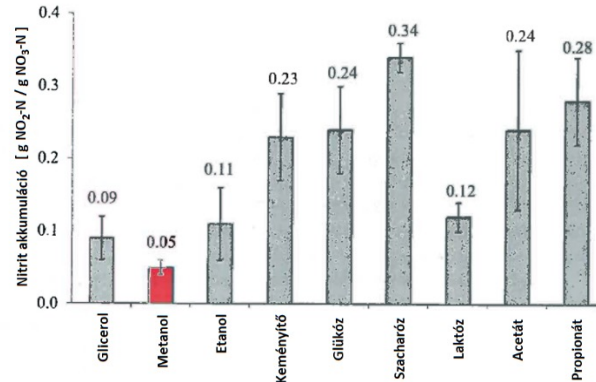
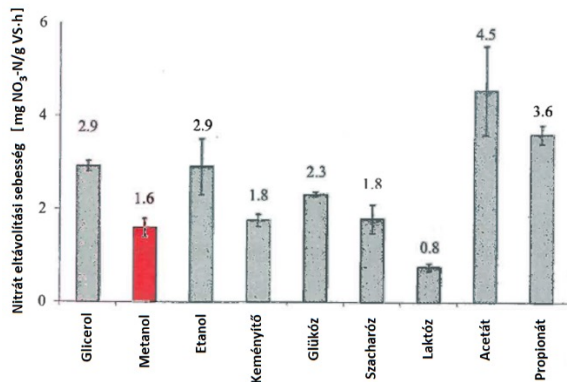
Metanol alkalmazása esetén a denitrifikáció az alábbi sztöchiometriával írható le (Dholakia és mtsai, 1970):



A reakcióegyenletek alapján tehát elméletileg 5/6-od mol metanolra van szükség 1 mol nitrát redukálásához (26,7 g metanol/14 g nitrogén; 1,9 g metanol/g nitrogén; 0,43 g metanol/g nitrát) (Dholakia és mtsai, 1970; Bitton, 2005).

Bármely szerves szénforrásnak az utolsó tisztítási fokozatban történő adagolása magas kockázattal jár, hiszen túlzott mértékű adagolás esetén az utódenitrifikációs bioszűrőkről elfolyó tisztított szennyvíz oxigénigényének (BOI₅, KOI) emelkedésével kell számolni, elégtelen adagolás esetén pedig várhatóan a nitrát redukciója lesz részleges. Ez utóbbi esetben kell például nitrit felhalmozódással számolni. Ez a szén-nitrogén arány megfelelő módosításával, vagyis a metanoladagolás növelésével küszöbölhető ki (Rocher és mtsai, 2015). Utódenitrifikációhoz csak konstans összetételű, szennyeződésektől és biológiailag nehezen bontható komponensektől mentes, külső szubsztrát alkalmazható.

A denitrifikáció során a nitrit akkumulációját nem csak a C/N-arány torzulása okozhatja, hanem az alkalmazott szerves szénforrás típusa is. A nitrit-N felhalmozódás az eltávolított nitrát-N-hez képest a szénhidrátok és a karbonsavak esetén magasabb (0,12–0,34 g/g), míg az alkoholok alkalmazása esetén viszonylag alacsonyabb és a metanol esetében a legkedvezőbb (0,05 g/g), habár fajlagos nitráteltávolítási sebesség tekintetében a metanol nem tekinthető kiemelkedőnek (Rocher és mtsai, 2015; 4. ábra).

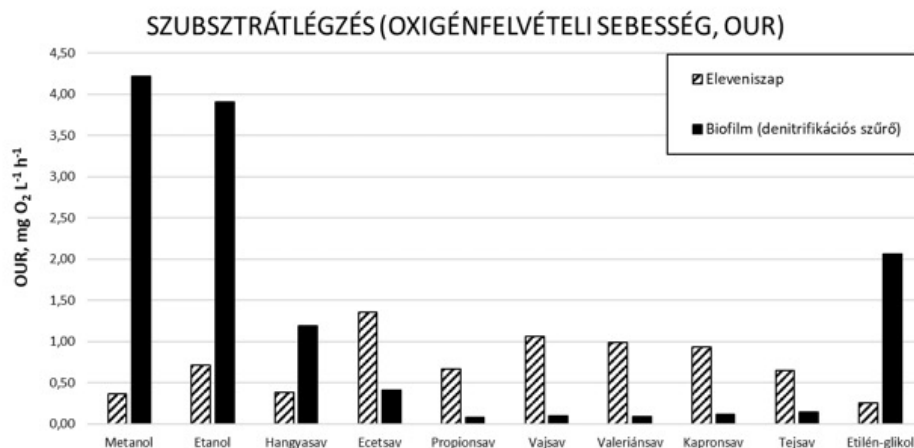


4. ábra: Különböző szerves szénforrások alkalmazásával elért denitrifikációs sebességek (balra) és a nitrít felhalmozódása (jobbra), laboratóriumi kísérletek során (Rocher és mtsai, 2015)

A BIOFORT™ denitrifikációs szűrője – mivel szénforrásként kizárólag metanol áll rendelkezésre – a tisztítómű nagy terhelésű eleveniszapos rendszerének heterotróf mikroorganizmus közösségéhez képest egy „beszűkült” kultúrát tart fenn. A metanoladagolás tulajdonképpen a közösség egyoldalú táplálását jelenti. Emiatt azok a mikroorganizmusok szaporodnak el a biofilmben, amelyek a szénforrást értékesíteni tudják. A metanol hasznosítására az ún. metilotróf mikroorganizmusok képesek. Az így formálódó közösség speciális szubsztráthasznosítási spektrummal rendelkezik az eleveniszaphoz képest. A szubsztráthasznosítást egyszerű légzéssel vizsgálhatjuk, amely során a két kultúra (eleveniszap és denitrifikáló biofilm) oxigénfelvételt mérjük oldottoxigén-mérő elektród segítségével, különböző egyszerű szerves szubsztrátok adagolása mellett. Míg az eleveniszap sokféle szerves vegyületet hasznosít

hasonló intenzitással, addig a biofilm metanolt, etanolt és etilén-glikolt fogyaszt intenzíven, valamint hangyasavat és ecetsavat kevésbé hatékonyan (5. ábra).

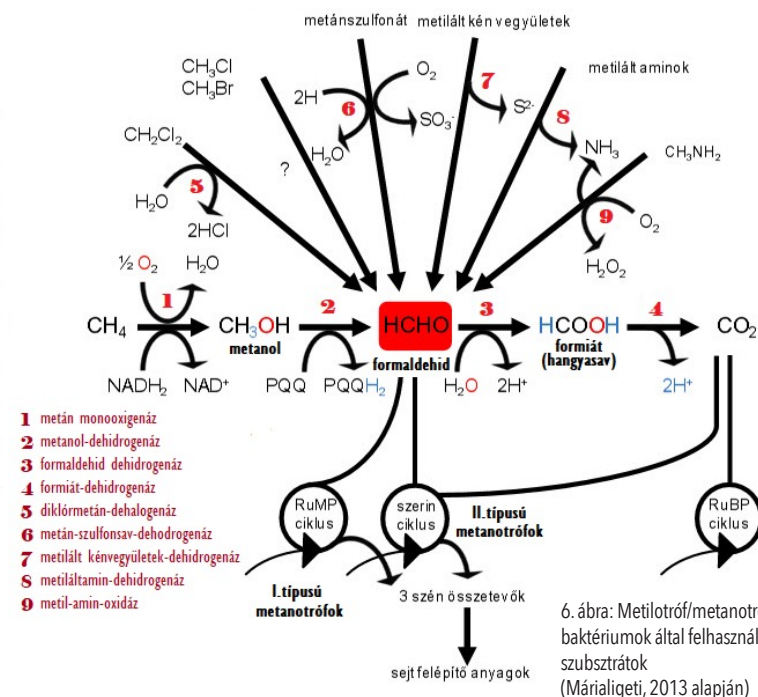
Az 5. ábra alapján minél nagyobb az légzésintenzitás, azaz az oxigénfelvételi sebesség (Oxygen Uptake Rate, OUR), annál kedvezőbb a szubsztrát hasznosítása a mikroorganizmusok számára. Mivel az eleveniszap és a biofilm esetében is összetett baktériumközösséget vizsgálunk, így az adott szubsztrátot



5. ábra: A nagy terhelésű eleveniszap és a denitrifikációs biofilm szubsztrátspektruma a légzésteztek alapján. A légzésteztek során oxigénfelvételi sebesség (Oxygen Uptake Rate, OUR) határozható meg. A biomassa önálló légzése az endogén légzés, míg hasznosítható szubsztrát hozzáadásával a légzésintenzitás növekszik. Az ábrán az OUR-értékek az endogénlégzés értékével korrigáltak.

hasznosítani képes mikroorganizmusok arányára is következtethetünk a légzésintenzitási értékek összevetésével. A biofilmes rendszer csak bizonyos szubsztrátok (metanol, etanol, hangyasav, ecetsav és etilén-glikol) hasznosítására képes hatékonyan (Bezsenyi és mtsai, 2019). A légzésintenzitási értékek az adott kultúrák endogén (szubsztrát nélkül csak a biomassa) légzésével korrigáltak.

A metilotróf baktériumokat két nagyobb csoportra bonthatjuk. Az érzékenyebb csoport az obligát metanotrófok alkotják, amelyek egy szénatomot tartalmazó („C1”) vegyületeket hasznosítanak (energiaforrás) és képtelenek olyan szubsztrátokat bontani, amelyek C-C kötést tartalmaznak. Ez a csoport autotróf, azaz szénforrásként széndioxidot hasznosítanak, ebből származik a szerves anyagok szénváza. A másik csoportot a fakultatív metilotróf/metanotróf szervezetek alkotják. Ezek a szervezetek számos egyéb szubsztrát hasznosítására képesek (pl. ecetsav) (5. ábra, 6. ábra). A hidrogéndonorként (energiaforrásként) használt szerves anyagokat egyúttal szerves szénforrásként is értékesítik, azaz heterotrófok (Márialigeti és mtsai, 2013; Hou,



6. ábra: Metilotróf/metanotróf baktériumok által felhasznált szubsztrátok (Márialigeti, 2013 alapján)

2017; Chistoserdova és mtsai, 2009). A denitrifikációs folyamat a légzéshez kapcsolt és nem a „táplálkozáshoz”, bár a kettő szorosan összefügg (3. ábra).

A felsorolt kilenc enzim a saját, nevében is megjelenő szubsztráton kívül egyéb vegyületek átalakítására is képes lehet. A metán-dehidrogenáz alkánok, haloalkánok, alkének, ammónia, aromás és heterociklusos szénhidrogének oxidációjára is képes. A metanol-dehidrogenáz metanol-dehidrogenáz primer (etanol) és szekunder alkoholokat, a formaldehid-dehidrogenáz formaldehid mellett egyéb aldehideket is átalakít. Tehát a kizárólag C1-vegyületeket hasznosító metilotróf szervezetek is képesek metanolon kívül hangyasav és etanol hasítására (Hou, 2017; Chistoserdova és mtsai, 2009).

Fontos megjegyezni, hogy az alkalmazott szénforrásnak a közösség fajösszetételére gyakorolt hatása nemcsak metanol esetében jelentkezik karakteresen, hanem a glicerinnél is. A glicerinadagolás különféle fonalas felépítésű gombafajok elszaporodásának kedvez, így a bioszűrő eltömődését okozza és a nitrítfelhalmozódás szempontjából az egyik legkedvezőbb szénforrás (Rocher és mtsai, 2015).

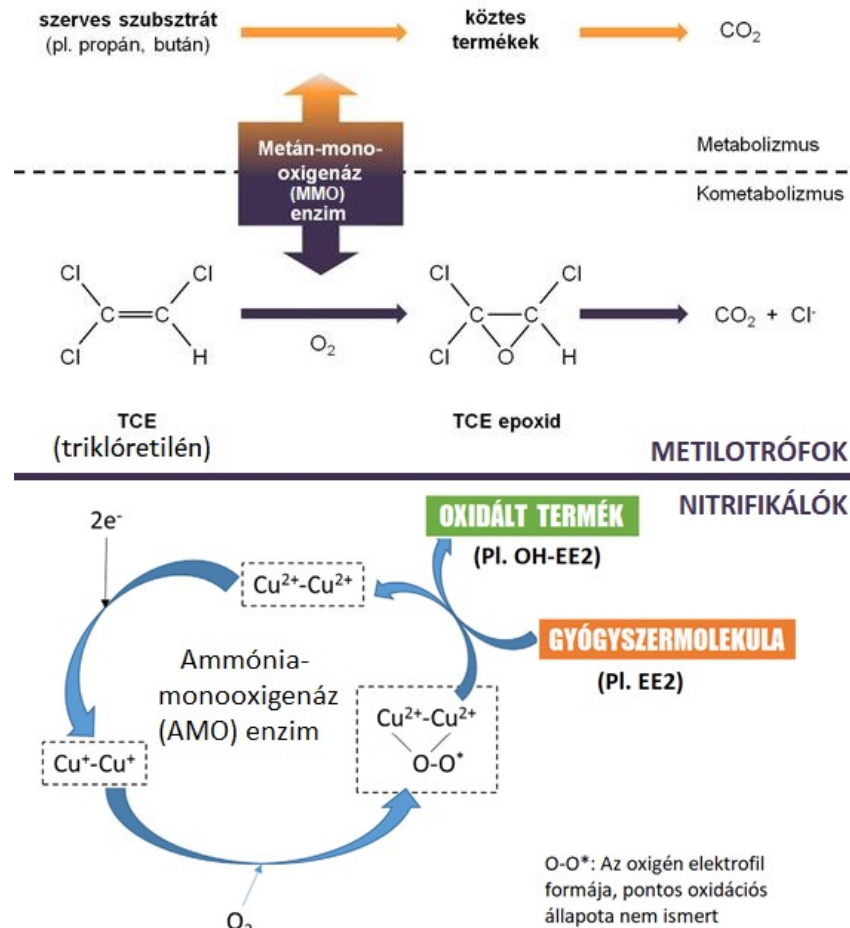
2.4 A SEJTANYAGCSERE KÜLÖNLEGES VONATKOZÁSAI

- A SZERVES MIKROSZENNYEZŐK ELTÁVOLÍTÁSA

Érdemes egyéb aspektusait is vizsgálni a bioszűrőrendszereknek. A bioszűrő hatékony lebontási hatásfoka miatt a 21. században a szerves mikroszennyezők eltávolításában kiemelkedő szerepe lehet.

A mikroszennyezők biodegradációja a mikroorganizmusok metabolikus és ún. kometabolikus útvonalain egyaránt zajlik. A metabolikus lebomlásában szerepet játszó mikroorganizmusok heterotróf mikroorganizmusok (eddig ismereteink alapján), amelyek képesek az adott mikroszennyezőt mint egyedüli szén- vagy energiaforrást felhasználni, tehát biomasszává alakítani. Azokat a mikroszennyezőket, amelyek ilyen formában nem hasznosulnak, bizonyos baktériumok képesek hasznosítás nélkül is hasítani, szerkezetüket megbontani. A kometabolizmus során egy nem hasznosítható molekulát a mikroorganizmus megbont, ha tápanyagként szolgáló vegyület(ek) is jelen

van(nak) a környezetében. A tápanyagként szolgáló egyszerű, szerves/szerveetlen könnyen bontható vegyületek fenntartják a biomasszát. Tehát leegyszerűsítve, a szerves mikroszennyező metabolikus úton, közvetlenül hasznosul energia vagy termelő biomassza formájában. Kometabolikus úton közvetlen hasznosulás nincs, de a molekula szerkezete megbomlik. A nitrogéneltávolítást végző bioszűrőkben a kometabolizmus két mikroorganizmus-csoportnak (az ammónia monooxygenáz enzimmel rendelkező nitrifikálók és a metán-monooxygenáz enzimet termelő metilotrófoknak) köszönhetően lehet hatékony (7. ábra).



töltethet be ezen szerepüket. A biofilmes rendszer kedvez a baktériumok hordozóanyagban való megtapadásának és szelektív felszaporodásának, így közvetett módon a szerves mikroszennyezők eltávolításának is.

A másik előnyös oldala a kometabolizmusnak a külső szerves szénvegyülettel táplált biofilmes rendszerek esetében jelentkezhet, de a metanolos rátáplálás eredményezheti a legjelentősebb változást. A metilotróf mikroorganizmusok specifikus enzime a metán-monooxygenáz (MMO) enzim, amely a metán metanollá oxidálását katalizálja. A metanotróf/metilotróf baktériumok kometabolizmussal képesek kis molekulású, halogénezett szénhidrogének lebontására is (7. ábra).

3. A BIOSZÜRŐ RENDSZER TECHNOLÓGIAI KIALAKÍTÁSA

Az eleveniszapos fokozatból távozó, utőüleptett szennyvíz átáramlását a kétlépcsős, felfelé áramoltatott bioszűrőegységen (BIOFOR™, 8. ábra) a szennyvíz átemelésével létrehozott helyzeti energia biztosítja. A szennyvíz ammóniatartalmát az oxikus bioszűrők töltetanyagán

7. ábra: A triklóretilén kometabolizmusban történő lebontása MMO enzim, valamint az etinilósztradiol (EE2) hasítása ammónia-monooxygenáz (AMO) enzim segítségével (Márialigeti és mtsai, 2013; Xu és mtsai, 2016 alapján)

megkötődő mikroorganizmusok levegőbefúvás mellett nitráttá oxidálják (nitrifikáció). A nitrifikált víz adott hányadát (24 000 m³·nap⁻¹) az eleveniszapos fokozatban kialakított elő-denitrifikációs reaktorba (a teljes eleveniszapos reaktortérfogat 25 %-a) vezetik vissza (nitrátosvíz recirkuláció), ahol nitráttartalmát a mikroorganizmusok elemi nitrogénné redukálják, amelyhez az előülepített szennyvíz könnyen bontható szerves hányadát hasznosítják szénforrásként. A két biológiai lépcső közötti recirkuláció üzemeltetési költsége lényegesen kisebb, mint az ebből adódó pótszénforrás (metanol) igény csökkenéséből származó megtakarítás a denitrifikáló szűrők üzemeltetése során.

Az utódenitrifikációs bioszűrőkben biztosított anoxikus körülmények között a mikroorganizmusok az adagolt könnyen bontható szervesanyagot (metanolt) hasznosítják a denitrifikációhoz. A mikroorganizmus-szaporulat eltávolítása, illetve a töltetanyag eltömődésének megakadályozása a szűrőegységek rendszeres átmosásával valósítható meg. Ez fokozott hozamú levegő és szűrt víz átvezetéssel történik. A kimosott iszapos zagy teljes mennyiségét a nitrátosvíz recirkulációval együtt visszavezetik az eleveniszapos reaktor elő-denitrifikációs egységébe.

a szűrők visszamosása esetén a mosató szűrt víz és mosató levegő bevezetése a vasbeton szűrőfenék alatti osztótérbe történik, ahonnan a szűrőfenékbe csavart nagyszámú szűrőgyertya vezet át a felső szűrőtérbe. A nitrifikáló szűrőkben a bevezetett levegő és nyersvíz egyenletes elosztását a szűrőfenék felülete mentén az alsó 30 cm mély folyami kavics-réteg, míg a nitrifikációhoz szükséges biofilm megtapadását a 4,2 m rétegvastagságban elhelyezett, 2,5-5 mm szemcseátmérőjű, szabálytalan alakú, zúzott, égetett agyagszemcsékből álló szűrőtöltet (Filtralite™) biztosítja (9. ábra). Az utódenitrifikációs szűrőkben a töltetréteg vastagsága 3,0 m, a szemcsék átmérője 4-8 mm. Alakjuk lekerekített, így nagyobb pórustérfogat áll rendelkezésre a nagyobb iszaphozammal üzemelő heterotróf organizmusok szaporodására. A nagyobb szemcseméret következtében alsó folyamikavics-réteg telepítése nem indokolt.

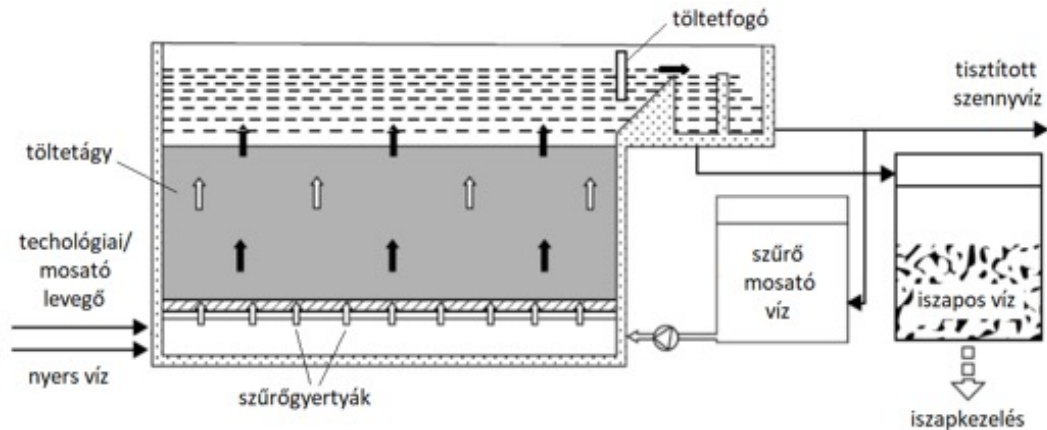
A nitrifikációs szűrők kisebb méretű zúzott szemcsés töltetnek fajlagos felülete 1400-1600 m²·m⁻³, amely a denitrifikációs egységek nagyobb, lekerekített töltet szemcséire vonatkozóan ~1000 m²·m⁻³. A szemcsék fajsúlya a víznél ugyan nagyobb (1,5-1,6 kg·dm⁻³), szűrési üzemmódban azonban a töltetágy – eltömődöttségének mértékétől, valamint az átvezetett szennyvíz és

kimosódik a pórusokból. A BIOFOR™ bioszűrési fokozat műtárgyait eredetileg 120 000 m³·nap⁻¹ terheléshez méretezve építették meg, ugyanakkor gépészetileg csak 80 000 m³·nap⁻¹ kapacitást alakítottak ki 1999-ben. A megépített 10 db oxikus és 6 db anoxikus bioszűrőből, rendre 7, illetve 4 db-ot üzemeltetnek be.

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep technológiájának sajátossága, hogy a nitrát elemi nitrogénné történő biológiai redukciójára, leszámítva a nitrátosvíz recirkulációját az eleveniszapos reaktorokba, alapvetően a tisztítási sor utolsó lépésében kerül sor (utódenitrifikáció), ahol a mikroorganizmusok számára a szennyvízben már csak biológiailag nehezen bontható szerves tápanyagok állnak rendelkezésre és azok is korlátozott mértékben. A kellő sebességű és megfelelő hatásfokú denitrifikáció biztosítása érdekében biológiailag könnyen (nagy sebességgel) hasznosítható szerves szénforrás adagolása szükséges. Erre a célra a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen metanolt alkalmaznak.

4. A BIOSZŰRÉSI TECHNOLÓGIA EREDMÉNYEINEK ISMERTETÉSE

A bioszűrők 1999-es megvalósítását követő időszakban a szennyvíztisztító komplex technológiája képes volt stabilan tar-



8. ábra: Felfelé áramlatot bioszűrő működési vázlata (WEF, 2010 nyomán)

A bioszűrők építészeti és gépészeti kialakítása funkciójuktól függetlenül közel azonos (3. táblázat). A technológiai levegő (nitrifikációs egységeknél) és a tisztítandó szennyvíz, valamint



9. ábra: Biofor nitrifikációs (balra) és denitrifikációs (jobbra) bioszűrők égetett agyag töltetanyaga és szűrőgyertyái

technológiai levegő hozamától függően – expandált állapotba kerül. Visszamosás során a teljes töltetanyag átkeverése megtörténik, a szemcsékre tapadó biofilm döntő hányada leszakad és

tani a hazai szabályozásnál lényegesen szigorúbb tervezési kibocsátási értékeknek megfelelő elfolyóvíz-minőséget (1. táblázat).

Paraméter	Tervezési határérték	Engedélyezett kibocsátási határérték
KOI mg/l	50	80
BOI ₅ mg/l	10	25
Lebegő a. mg/l	35	35
NH ₄ -N mg/l	2	2* 4**
Össz-N mg/l	10	15* 20**
Össz-P mg/l	1,8	1,8

Megjegyzés: * V.1. - XI.15.
** XI.16. - IV.30.

1. táblázat: A Biofor tervezési kibocsátási határértékei, valamint a hatóság által előírt végső kibocsátási határértékek

A BIOFOR™ egység üzembe helyezése óta eltelt két évtized során a szennyvíztisztító terhelése jelentős mértékben módosult, az alábbi tényezők következtében:

- A csatornázottság mértékének emelkedésével párhuzamosan a nyers szennyvíz hozama közel állandó maradt, miközben a szennyező komponensek koncentrációi jelentősen emelkedtek. Ennek vélhető magyarázata a vízhasználati szokások módosulása, a víztakarékos berendezések elterjedése. A tisztítóműbe bevezetett nitrogén (TKN) tekintetében a növekmény közel 60%-os, vagyis a tervezett 40 mg·L⁻¹ értékhez képest átlagosan 65 mg·L⁻¹ nitrogén érkezik a csatornahálózaton.
- A tisztítóműben leválasztott primer-, valamint biológiai főlérsziszap anaerob fermentációval történő stabilizálása során képződő biogáz energetikai hasznosításával a tisztítómű elektromosenergia-igényének csupán 30-35%-a fedezhető. Az energetikai önellátás fokozása érdekében kiépítésre került a külső ágazatokból (elsősorban az élelmiszeriparból) származó magas szervesanyag-tartalmú hulladékanyagok saját szennyvíziszappal történő együttrohasztásnak technológiája (ko-fermentáció). A hasznosított szerves hulladékok (ko-szubsztrátok) mennyiségétől és minőségétől függően ma már a szennyvíztisztító teljes energiaigényét képes fedezni a fermentáció során megtermelt biogáz hasznosítá-

sával. A főlegben termelt elektromos energia az országos villamoshálózatra kerül kitáplálásra. Az energetikai önellátás elérésének velejárója, hogy a ko-szubsztrátok általában a szennyvíziszapokhoz viszonyítva fokozott mértékben tartalmaznak nitrogént, amely az anaerob biodegradáció során oldott állapotú ammóniává alakul. A fermentáció végtermékének, a rothasztott iszapnak víztelenítése során képződő csurgalékvizet a szennyvíztisztítási technológiába vezetjük vissza, ahol jelentős ammónia- és ortofoszfát-többletterhelést okoz.

A tervek mindössze ~9%-os TKN belső terheléssel számoltak, ennek értéke jelenleg közel 30%.

A szennyvíztisztító külső és belső terhelésének növekedése következtében a nitrifikáló bioszűrőkre vezetett szennyvíz ammónia-N koncentrációja a tervezett 32 mg·L⁻¹-ről 45 mg·L⁻¹-re emelkedett, ami maga után vonta az üzemelő oxikus és anoxikus szűrők fajlagos terheléseinek arányos emelkedését, rendre 1,2-ről 1,6 kg NH₄-N·m⁻³·nap⁻¹-ra, illetve 3,1-ről 3,6 kg NO₃-N·m⁻³·nap⁻¹-ra (2. táblázat, C oszlop). (A töltetanyag fajlagos felületének bizonytalansága következtében a bioszűrők terhelését a szubsztrátnak a töltetanyag térfogatára vonatkoztatott ter-

2. táblázat: BIOFOR™ bioszűrési fokozat fontosabb technológiai paramétereai a tervezett kapacitások és különböző kiépítettség esetén (a táblázat fejlécében N: nitrifikáló-, a DN: denitrifikáló bioszűrőt jelent)

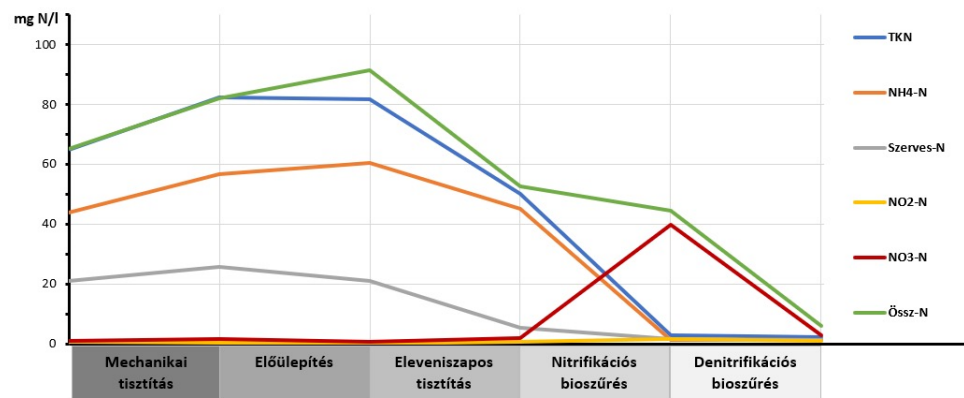
Megnevezés		A	B	C	D	E
		Tervezett (80 000 m ³ /d)	Tervezett (120 000 m ³ /d)	2016-ig (60 000 m ³ /d)	2016-2022 (60 000 m ³ /d)	2022-től (60 000 m ³ /d)
		7 N + 4 DN	10 N + 6 DN	7 N + 4 DN	7 N + 6 DN	10 N + 6 DN
NITRIFIKÁLÓ BIOSZÜRŐK						
Q szennyvíz	m ³ /d	80 000	120 000	60 000	60 000	60 000
Q öblítővíz+ nitrátosvíz recirkuláció	m ³ /d	8 000	12 000	24 000	24 000	24 000
Q ráfolyó	m³/d	88 000	132 000	84 000	84 000	84 000
N ráfolyó (NH ₄ -N)	kg N/d	2 812	4 222	3 780	3 780	3 780
N főlérsziszappal eltávolított	kg N/d	92	191	84	84	94
N nitrifikálandó	kg N/d	2 456	3 635	3 528	3 528	3 602
Szűrőszám (n)	db	7	10	7	7	10
Szűrőtöltet össz. térfogata (n egységre)	m ³	2 357	3 367	2 357	2 357	3 367
NH₄N térfogati terhelés (n egységre)	kg N/m³d	1,19	1,25	1,60	1,60	1,12
Nitrifikációs teljesítmény (n egységre)	kg N/m³d	1,04	1,08	1,5	1,5	1,1
Átlagos szűrési sebesség (n egységre)	m/h	6,5	6,9	6,2	6,2	4,4
Maximális szűrési sebesség (n-1 egységre)	m/h	12,9	11,9	8,9	8,9	6,0
DENITRIFIKÁLÓ BIOSZÜRŐK						
Q ráfolyó	m ³ /d	80 000	120 000	60 000	60 000	60 000
N ráfolyó (NO ₃ -N)	kg N/d	2 233	3 305	2 520	2 520	2 573
N denitrifikálandó	kg N/d	1 833	2 705	1 860	2 040	2 093
Szűrőszám (n)	db	4	6	4	6	6
Szűrőtöltet össz. térfogata (n egységre)	m ³	703	1055	703	1055	1055
NO₃-N térfogati terhelés (n egységre)	kg N/m³d	3,18	3,13	3,58	2,39	2,44
Denitrifikációs teljesítmény (n egységre)	kg N/m³d	2,61	2,56	2,6	1,9	2,0
Átlagos szűrési sebesség	m/h	14,2	14,2	10,7	7,1	7,1
Maximális szűrési sebesség (n-1)	m/h	31,9	17,1	14,2	8,5	8,5
Metanol igény	kg/d	4 875	7 202	4 960	5 404	5 535

helése függvényében szokták megadni.) Szűrő mosások időszakában, illetve nitrogén-csúcsterhelések esetén ezen értékeknél lényegesen magasabb terhelés is kialakult, aminek kedvezőtlen hatása a szűrt víz ammónia-, illetve nitrátkoncentrációinak időszakos megemelkedésében mutatkozott meg. A kritikusabb hatás a mindössze 4 db párhuzamos szűrőegységgel üzemelő utódenitrifikációnál volt megfigyelhető, hiszen bármely egység leállása ~30%-os terhelésnövekedést eredményezett az üzemben maradt szűrőkben (ugyanaz az érték a nitrifikációnál csupán 17%).

Az előzőekre alapozva 2016-ban további 2 db (a 120 000 m³·nap⁻¹ szennyvízhozam esetére megépített) denitrifikációs szűrőt helyeztek üzembe. A kapacitásbővítés hatására a folyamat stabilizálódott, a fajlagos nitrogénterhelés átlagosan 2,4 kg NO₃-N·m⁻³·nap⁻¹-ra csökkent, és a tisztított szennyvíz NO₃-N koncentrációját átlagosan ~4 mg·L⁻¹-el sikerült csökkenteni (ehhez felhasznált többlet szénforrás szükséglet ~ 440 kg·nap⁻¹) (2. táblázat, D oszlop).

Ezen üzemmállapotra vonatkozóan a 10. ábra szemlélteti a különböző nitrogénformák átlagos koncentrációinak alakulását a szennyvíztisztító technológia hossz-szelvénye mentén. A mechanikai tisztítás esetén mérhető TKN koncentrációemelkedés az iszapkezelés és ko-fermentáció csurgalékvizével visszavezetett belső terhelés hatását jelzi. A TKN csökkenése az eleveniszapos biológiai tisztításnál a nitrifikált víz visszavezetésének hígító hatását és a nagy terhelésű rendszer iszapszaporulatába történő nitrogén beépülését tükrözi. Ezzel egyidejűleg a nitrát alacsony koncentrációja az elődenitrifikáció megfelelő hatékonyságára utal.

10. ábra: N formák koncentrációjának változása (2019. évi mérési eredmények felhasználásával)



NITRIFIKÁCIÓ		UTÓ-DENITRIFIKÁCIÓ:	
Térfogati terhelések:		Térfogati terhelés:	
BOI ₅	≤ 1 - 2 kg/m ³ d	NO ₃ -N	0,8 - 5,0 kg/m ³ d
TSS	≤ 1,0 - 1,6 kg/m ³ d		
NH ₄ -N	≤ 0,5 - 1,0 kg/m ³ d (10 °C-on)		
	≤ 1,0 - 1,6 kg/m ³ d (20 °C-on)		
Hidraulikai terhelés:		Hidraulikai terhelés:	
	3 - 20 m ³ /m ² h		10 - 35 m ³ /m ² h
Tisztítási hatásfokok:		Tisztítási hatásfok:	
BOI ₅	40 - 75 %	NO ₃ -N	75 - 95 %
TSS	40 - 75 %		
NH ₄ -N	75 - 95 %		

3. táblázat: Bioszűrés méretezési paramétere (deBarbadillo és mtsai, 2010; WEF, 2010; Tastekin, 2016)

Szakirodalmi adatok alapján másodlagos (biológiai) tisztítást követő elárasztott töltetű, felfelé áramoltatott bioszűrők (pl. BIOFOR™) technológiai méretezéséhez használható jellemző terhelés értékeit és várható tisztítási hatásfokokat a 3. táblázat tartalmazza.

Bár az 1,6 kg NH₄-N·m⁻³·nap⁻¹ átlagos terhelés a nitrifikáció szokásos alkalmazási tartományának felső értéke (alacsony vízhőmérsékletek esetén kifejezetten túlterhelt), ennek ellenére a nitrifikáció átlagos hatásfoka maximális (~95%). A denitrifikációs kapacitásbővítés hatására átlagosan 2,4 kg NO₃-N·m⁻³·nap⁻¹-ra lecsökkent terhelés mellett a nitrát redukciójának hatásfoka szintén magas (90%).

A kedvezőtlen irányú éghajlati változásnak és a főváros szilárd burkolattal ellátott felületei növekedésének eredménye az aszályos időszakokat követő csapadékok intenzitásának és tartóságának jellemző emelkedése. A főváros csatornahálózata a peremkerületek kivételével

egyesített rendszerű. Záporok esetén a tisztítómű hidraulikai kapacitását többszörösen meghaladó hígított szennyvíz hányadot még a csatornahálózaton leválasztják, majd közvetlenül a befogadóba vezetik. Az RSD védelme érdekében a tervek szerint megvalósul a záporok teljes mechanikai szűrése és ülepítése. A záporülepítőben leválasztott iszapfázis kezelése, a képződő koncentrált csurgalékvizeknek a tisztítás főáramába történő visszavezetésével, valamennyi szennyezőkomponens

tekintetében jelentős többletterhelést jelent a tisztítómű számára, ami elsősorban a záporokat követő időszakokban jelentkezik.

Az alacsony üzemi hőmérsékleten szárazidőben is 35-40%-kal túlterhelt nitrifikáló bioszűrők kapacitásbővítése ezáltal elkerülhetetlen. A többlet nitrifikációs igény kielégítése a 3 db megépült, de üzemben kívüli nitrifikáló szűrő gépészeti, elektromos és irányítástechnikai üzembe helyezésével valósulhat meg. A nitrifikációs kapacitásbővítést követően a szűrőtöltet átlagos térfogati NH₄-N terhelése a jelenlegi 1,6 kg·m⁻³·nap⁻¹-ről várhatóan 1,1 kg·m⁻³·nap⁻¹-ra, a tervezettel közel azonos értékre fog csökkenni (2. táblázat, E oszlop).

5. ÜZEMELTETÉSI TAPASZTALATOK

5.1 NITRIFIKÁCIÓ ALACSONY ISZAPKOR ESETÉN

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep technológiai sajátossága, hogy a nitrifikáló szűrőkben szelektáltan szaporodó és a mosóvízzel az eleveniszapos rendszerbe rendszeresen visszavezetett (visszaoltás) autotróf mikroorganizmusok hatására a nagy terhelésű, alacsony iszapkorral (1,5-1,8 nap) üzemelő eleveniszapos fokozat is képes bizonyos mértékű nitrifikációra, elsősorban a nyári, 22°C-ot meghaladó üzemi hőmérsékletek esetén. Ilyenkor az eleveniszapos egység elfolyó vizében a NO₃-N koncentráció akár a 8-10 mg·L⁻¹-t is elérheti. Ezzel párhuzamosan csökken az oxikus szűrők NH₄-N terhelése.

5.2 NITRIFIKÁCIÓ ALACSONY ÜZEMI HŐMÉRSÉKLETEN

A fixfilmes bioszűrő hordozóanyagán megkötődő mikroorganizmusok stabilabb nitrifikációt képesek biztosítani egy eleveniszapos technológiához képest, hiszen a felülethez kötött kemolitotrófok (itt: az ammóniát használják energiaforrásként a nitrifikálók) lassúbb szaporodásuk ellenére sem mosódnak ki a rendszerből. Különösen alacsonyabb szennyvízhőmérsékletek (<16°C) esetén azonban, amikor a mikroorganizmusok szaporodása egyébként is lassúbb, az eleveniszapos rendszer szervesanyag-lebontásának, valamint az utóülepítők fázisszétválasztásának hatékonysága is csökken, így növekszik az oxikus bioszűrők (nitrifikálók) szervesanyag- és lebegőanyag-terhelése. Ez elsősorban a nagy terhelésű eleveniszapos rendszerből származó biomassza visszatartását eredményezi a szűrőágyban. Ezen heterotróf organizmusok a többlet szerves anyag jelenlétében az oxigénért versengenek a nitrifikáló autotrófokkal, részben „leszorítva” azokat a töltetről. Ezen tényezők

eredményeként téli időszakban a maradék $\text{NH}_4\text{-N}$ koncentráció a nitrifikációt követően az aktuális kibocsátási határértéket ($4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) közelíti.

5.3 OXIGÉNBEVITEL HATÁSA A NITROGÉNELTÁVOLÍTÁSRA ÉS ANNAK METANOLIGÉNYÉRE

A megfelelő hatásfokú nitrifikáció és az alacsony elfolyó ammóniakoncentráció tartása csak a nagy sebességű anyagtranszport biztosításával érhető el, ami fokozott oxigénbevittelt, vagyis a szűrők túllegeőztetését igényli. Ennek eredményeként a nitrifikált szennyvíz oldott oxigén koncentrációja jellemzően $5\text{-}7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, de különösen alacsony üzemi hőmérsékletek esetén akár a telítési értéket is megközelítheti. Ezen magas oldott oxigén koncentrációval történik meg a nitrifikált víz rávezetése az utódenitrifikációs szűrőkre.

A tényleges anoxikus körülmények indukálják a nitrát-/nitrit-reduktáz enzimek képződését, ami a nitrát/nitrit hasznosításához nélkülözhetetlen. A heterotróf organizmusok a nitráttal/nitrittel szemben az oldott oxigént előnyben részesítik, mivel annak felhasználásával a könnyen bontható szerves tápanyagot nagyobb sebességgel (valójában nagyobb energianyeréssel) képesek eltávolítani, mint a nitrát hasznosítása esetén. Az oldott oxigén jelenléte az anoxikus reaktorban, a magasabb szubsztrátigényen túl, a nitrát-reduktáz enzimen keresztül gátolja a denitrifikációs folyamatot. Az inhibíció mértéke alapvetően függ az alkalmazott technológiától (Metcalf & Eddy, 2013).

Az anoxikus szűrőbbe áramló nitrifikált víz magas oldott oxigén koncentrációja, számításaink szerint, a denitrifikáció metanoligényének $7\text{-}8\%$ -os emelkedését okozza, és csökkenti a denitrifikációra hasznosítható biomasza mennyiségét, azaz a hasznos reaktortérfogatot, mivel a denitrifikációs szűrők töltetágyának alsó hányadában a metanol biodegradációja oldott oxigénnel történik.

5.4 A BIOSZŰRŐK HATÉKONY VISSZAMOSÁSA

A bioszűrési eljárás egyik legfontosabb limitáló tényezője a töltet eltörmődése, a szennyvízből kiszűrt lebegőanyagok és a lejátszódó biológiai folyamatok során képződő, a töltetszemcsékre feltapadó biológiai szaporulat révén. Az egyenletes átáramlás javítására, a teljes eltörmődés megelőzésére a töltetanyagról a lebegőanyagot (biomasszát) rendszeres időközönként el kell távolítani, az adott egység levegővel és nagy mennyiségű nitrifikált vízzel történő visszamosásával. A mosás ered-

ményeként azonban biztosítani kell, hogy a tisztítást végző mikroorganizmusok továbbra is megfelelő mennyiségben rendelkezésre álljanak a szűrőtöltet felületéhez kötődve, a szükséges biológiai aktivitás fenntartása érdekében. A szakirodalom szerint BIOFOR™ technológia alkalmazása esetén a töltet térfogatra vonatkoztatva $2,5\text{-}4 \text{ kg TSS}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{nap}^{-1}$ lehet a visszatartott anyagok mennyisége (WEF, 2010). Sajnálatos módon a forrás nem részletezi a nitrifikáló és denitrifikáló szűrők közötti különbséget, valamint az üzemi hőmérséklet, illetve a nitrogénterhelés befolyásoló hatására sem tér ki.

Az eredeti gépészeti kialakítás szerint a bioszűrők visszamosása az üzemi légfúvó berendezésekkel (HV-Turbo KA10, maximum üzemi nyomás 1000 mbar), az üzemi levegő vezetékrendszeren keresztül történik. Annak érdekében, hogy a visszamosás levegőigényét (nitrifikáló szűrők esetén $5500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, denitrifikáló egységeknél $6500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) biztosítani lehessen a folyamatirányításnak meg kellett emelnie a légfúvók nyomásértékét, a maximum üzemi nyomást közelítő 980 mbar értékre, a mosási program időtartamára. A mosott szűrő és az aktuálisan üzemelő nitrifikációs egységek hidraulikai, illetve aerodinamikai ellenállásainak különbsége jelentős nyomásingadozást eredményezett. Ez a szabályzás éppen azon időszakokban nem vezetett sikerre, amikor gyengébb volt az utóülepítők leválasztási hatásfoka, ezáltal növekedett a bioszűrők lebegőanyag-visszatartása. Ilyenkor gyakran sikertelen volt a kívánt mosóvíz- és léghozam elérése, a visszamosás csak részleges volt. Kritikusabb esetekben az üzemi/kilépő nyomás hirtelen a gépek tűréshatára fölé emelkedett, aminek következtében azok leálltak, a visszamosás megszakadt, így meg kellett ismételni. Ezzel egyidejűleg a nitrifikáció is megszakadt. Az ismétlések gyakran torlódáshoz, a szűrési ciklusok nem kívánt hosszabbodásához vezettek, ami tovább fokozta a szűrőegységek eltörmődését. A bioszűrő rendszer kiegyensúlyozott üzemelését a nitrifikáció, valamint a szűrővisszamosások levegő-beviteli rendszereinek szétválasztásával, külön mosó-légfúvó (HV-Turbo KA5, maximum üzemi nyomás 1200 mbar) és kapcsolódó elkülönített vezetékrendszer és szerelvények beépítésével sikerült megvalósítani.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen a szennyvíz nitrogéntartalmának eltávolítását alapvetően a szerves anyagok biodegradációját végző nagy terhelésű eleveniszapos tisztító után kapcsolt kompakt, kétlép-

csős (nitrifikáció + utódenitrifikáció) bioszűrési fokozat (BIOFOR™) biztosítja. A nitrifikált víz kisebb hányadát visszavezetik az eleveniszapos rendszer elődenitrifikációs zónájába. A megfelelő sebességű és hatásfokú utódenitrifikáció kiegészítő szénforrás (metanol) adagolását igényli. A bioszűrési üzembe helyezése óta a szennyvíztisztító külső és belső terhelése is jelentősen emelkedett, ezért szükségessé vált az egyébként is túlterhelt utódenitrifikációs kapacitás bővítése, amit további bioszűrők üzembehelyezésével sikerült megvalósítani.

A megfelelő sebességű és hatásfokú utódenitrifikáció csak konsztans összetételű, szennyeződésektől és biológiailag nehezen bontható komponensektől mentes, külső szerves szubsztrát adagolásával biztosítható. A tisztítóműben erre a célra nagy tisztaságú metanolt adagolnak. A külső szénforrásnak a technológia utolsó egységében történő túladagolása az elfolyó tisztított szennyvíz oxigénigényének (BOI_5 , KOI) emelkedését, aluladagolása viszont részlegesen megvalósuló nitrát-redukciót, az elfolyó nitritkoncentráció emelkedését eredményezi. Az alkalmazott szénforrás típusától is függő nitritfelhalmozódás mértéke alkoholok esetén viszonylag alacsony, metanollal a legalacsonyabb, bár fajlagos nitráteltávolítás tekintetében a metanol nem tekinthető kiemelkedőnek.

A tisztítómű technológiai sajátossága, hogy a nagy terhelésű eleveniszapos rendszer is képes bizonyos mértékű nitrifikációra (elsősorban magasabb üzemi hőmérsékleten) a nitrifikáló szűrőkből rendszeres kimosott biomasza visszavezetése (visszaoltás) következtében. Az eleveniszapos rendszerhez képest stabilabb nitrifikációra képes bioszűrési hatásfokát alacsony szennyvízhőmérséklet esetén jelentősen gyengítheti az eleveniszapos rendszerből átvezetett (annak az alacsony üzemi hőmérséklet miatt csökkent biológiai aktivitása és fázisválasztási hatásfoka következtében jelentkező többlet szerves- és lebegőanyag) terhelés. A magas hatásfokú nitrifikáció csak nagy sebességű anyagtranszport biztosításával (a nitrifikáló szűrők túllegeőztetésével) érhető el. Az utódenitrifikációs szűrőbbe átvezetett szennyvíz magas oldott oxigén tartalma gátolja a nitrát reduktáz enzimek termelését, elfogyasztása többlet metanoligényt és fokozott szűrőterhelést von maga után. A bioszűrési eljárás egyik legfontosabb tényezőjének, a szűrők visszamosatásának fokozott levegőigényét a nitrifikáció üzemi levegőellátásától független, nagy teljesítményű légfúvó berendezés beépítésével sikerült üzembiztosan megvalósítani.

A tisztítóműben is üzemelő nitrogéneltávolító biofilmes rendszer a szelektíven elszaporodó mikroorganizmusok (ammónia-oxidálók, metilotrófok) speciális enzimeinek köszönhető ko-metabolikus folyamatok révén különösen hatékony szerepet játszhat a szerves mikroszennyezők (pl. gyógyszermaradványok) biodegradációjában.

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep technológiája a tápanyag-eltávolítási fokozat kiépítése óta eltelt időszakban – a jelentősen megnövekedett terhelések ellenére – a szükségszerűen elvégzett fejlesztésekkel folyamatosan biztosítja a befogadó Ráckevei-Soroksári Dunára mint fokozottan érzékeny víztestre előírt szigorú kibocsátási határértékeket.

IRODALOMJEGYZÉK

- Arp, D. J., Yeager, C. M., Hyman, M. R.: *Molecular and cellular fundamentals of aerobic cometabolism of trichloroethylene. Biodegradation*, 12 (2), pp. 81–103., 2001
- Bezsenyi, A., Sági, G., Makó, M., Palkó, G., Tóth, T., Wojnárovits, L., Takács, E.: *The effect of combined cometabolism and gamma irradiation treatment on the biodegradability of diclofenac and sulfamethoxazole. Radiation Physics and Chemistry*, 108642. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.108642., 2019
- Bitton, G.: *Wastewater Microbiology*, Wiley, 2005
- Carreira, C., Mestre, O., Nunes, R. F., Moura, I., Pauleta, S. R.: *Genomic organization, gene expression and activity profile of Marinobacter hydrocarbonoclasticus denitrification enzymes. PeerJ* 2018, 6, e5603., 2018
- Chistoserdova, L., Kalyuzhnaya, M. G., Lidstrom, M. E.: *The Expanding World of Methylotrophic Metabolism. Annual Review of Microbiology*, 63 (1), pp. 477–499, 2009
- deBarbadillo, C., Rogalla, F., Tarallo, S., Boltz, J. P.: *Factors Affecting the Design and Operation of Biologically Active Filters. WEF/IWA Biofilm Reactor Technology Conference*, 2010
- Dholakia, Shirish G., Stone, James H., Burchfield, Harry P.: *Methanol requirement and temperature effect in wastewater denitrification. Water Pollution Control Research Series*, 1970
- Gerardi, M.: *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process. WileyInterscience*, New York, 2002
- Hong, P., Wu, X., Shu, Y., Wang, C. B., Tian, C., Gong, S., Cai, P., Donde, O. O., Xiao, B.: *Denitrification characterization of dissolved oxygen microprofiles in lake surface sediment through analyzing abundance, expression, community composition and enzymatic activities of denitrifier functional genes. AMB Expr*, 2019,9:129, 2019
- Hou, Ch. T.: *Methylotrophs: Microbiology. Biochemistry and Genetics*, 1 edition. CRC Press, 2017
- Khunjar, W. O., Mackintosh, S. A., Skotnicka-Pitak, J., Baik, S., Aga, D. S., & Love, N. G.: *Elucidating the Relative Roles of Ammonia Oxidizing and Heterotrophic Bacteria during the Biotransformation of 17 α -Ethinylestradiol and Trimetoprim. Environmental Science & Technology*, 45 (8), pp. 3605–3612, 2011
- Maeng, S. K., Choi, B. G., Lee, K. T., Song, K. G.: *Influences of solid retention time, nitrification and microbial activity on the attenuation of pharmaceuticals and estrogens in membrane bioreactors. Water Research*, 47 (9), pp. 3151–3162, 2013
- Márialigeti, K. (szerk.), Borsodi, A., Felföldi T., Jáger, K., Makk, J., Romsics, Cs., Tóth, E., Bánfi, R., Pohner, Zs.: *Bevezetés a prokarióták világába. ELTE*, 2013
- Metcalf & Eddy/Aecom: *Wastewater Engineering, Treatment and Resource Recovery*, Mc Graw-Hill, Fifth Edition, 2013
- Moir, J. W. B., Richardson, D. J., Ferguson, S. J.: *The expression of redox proteins of denitrification in Thiosphaera pantotropha grown with oxygen, nitrate, and nitrous oxide as electron acceptors. Archives of Microbiology*, 164 (1), pp. 43–49, 1995
- Rattier, M., Reungoat, J., Keller, J., Gernjak, W.: *Removal of micropollutants during tertiary wastewater treatment by biofiltration: Role of nitrifiers and removal mechanisms. Water Research*, 54, pp. 89–99, 2014
- Rocher, V., Laverman, A. M., Gasperi, J., Azimi, S., Guérin, S., Mottelet, S., Villières, T., Pauss, A.: *Nitrite accumulation during denitrification depends on the carbon quality and quantity in wastewater treatment with biofilters, Environmental Science and Pollution Research*, Vol 22, Issue 13, pp. 10179–10188, 2015
- Székely, A. J.: *Bakteriális diverzitást vizsgáló eljárások alkalmazása a szennyvíztisztítás mikrobiológiai kutatásában (Doktori értekezés). ELTE*, 2008
- Tastekin, S.: *Modeling an activated sludge process followed by fixed-film reactors: a case study. MSC in Environmental and Geomatics Engineering, School of Civil, Environmental and Land Management Engineering*, 2016
- Water Environmental Federation (WEF): *Biofilm Reactors*, Mc GrawHill, 2010
- Xu, Y., Yuan, Z., Ni, B.-J.: *Biotransformation of pharmaceuticals by ammonia oxidizing bacteria in wastewater treatment processes. Science of The Total Environment*, pp. 566–567, 796–805, 2016



A BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszéke

Vízellátás-Csatornázás Szakirányú Továbbképzési Szak

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK

A szakképzettség oklevélben szereplő megjelölése:

vízellátás-csatornázás szakmérnök

Képzési terület: műszaki

Képzési időtartam: 4 félév

Az egyes félévek az oktatott tantárgyakhoz tartozó kollokviumokkal zárulnak. A negyedik félévben a hallgatók Szakdolgozatot készítenek, majd záróvizsgát tesznek.

A kurzus félévenkénti tandíja 250.000,- Ft.

Részletes információk:

<http://vkkt.bme.hu/vkkt/szakiranyu-tovabbkepzes>

Jelentkezés: <https://www.kth.bme.hu/urlap/>

Kapcsolat: Darabos Péter c. egyetemi docens

E-mail: darabos@vkkt.bme.hu

Felhívjuk a figyelmet, hogy jelentkezőket csak alap (BSc), vagy mester (MSc) szintű mérnöki végzettséggel tudunk fogadni !

A KÉPZÉS SORÁN ELSAJÁTÍTANDÓ KOMPETENCIÁK, TUDÁSELEMEK, MEGSZEREZHETŐ ISMERETEK:

KOMPETENCIÁK:

- a vízellátás-csatornázás szakterületen jelentkező üzemeltetés irányítása, fejlesztési feladatok önálló megoldása;
- építési, akadálymentesítési, fenntartási-üzemeltetési, vállalkozási és
- szakhatósági feladatok emelt szintű ellátása;
- a víziközmű szakterületen tervezői, vezető tervezői, szakértői munka ismereteinek, a jogosultság megszerzésének megalapozása;
- víziközmű-építési műszaki ellenőri munka ismereteinek, a jogosultság megszerzésének megalapozása.

TUDÁSELEMEK:

- hidraulikai, informatikai, vízkémiai és vízbiológiai speciális ismeretek,
- a vízszerszén-víz tisztítás-vízellátás folyamata,
- a csatornázás, a szennyvíztisztítás és a települési iszapkezelés korszerű módszerei,
- a szennyvíziszap hasznosítás/elhelyezés műszaki, közegészségügyi, környezetvédelmi és jogi követelményei, korlátai,
- kapcsolódó gépészeti, és szabályozástechnikai ismeretek,
- a szakterület gazdasági és jogi vonatkozásai.

MEGSZEREZHETŐ ISMERETEK:

- a tudáselemeken alapuló elméleti és gyakorlati ismeretanyag,
- kiterjedt esettanulmányok kapcsán a problémamegoldó technikák elsajátítása.

KÉSZSÉG:

- elemző, összehasonlító és kiértékelő készség a vízellátás-csatornázás szakterületén adódó műszaki feladatok megoldása területén,
- kapcsolódó rendeletek, jogszabályok, szakhatósági határozatok helyes értelmezése
- műszaki-gazdasági elemzés alapján fejlesztési javaslatok kidolgozása

A szakképzettség alkalmazása konkrét környezetben, tevékenységrendszerben:

A VÍZELLÁTÁS-CSATORNÁZÁS SZAKMÉRNŐK AZ ALÁBBI MUNKAKÖRÖK ELLÁTÁSÁRA ALKALMAS:

- víziközmű vállalatoknál (a szolgáltató nagyságrendjétől függetlenül) műszaki osztályvezető, főmérnöki munkakör,
- üzemvezetői munkakör víz- és szennyvíztisztító telepeken;
- szakelőadó, főelőadó szakirányos köztisztviselő munkakörökben;
- önálló vállalkozó a szakirányú területen (tervező, kivitelező).



NKE Víztudományi Kar

Vízellátás-Csatornázás Szakmérnöki Képzés

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víztudományi Karán és annak jogelőd bajai intézményeiben több évtizedes múltra tekint vissza a vízellátás-csatornázás szakmérnök képzés, melynek indítását az egyre növekvő szakmai igények, az új tudományos és kutatás-fejlesztési eredmények megjelenése és ezek gyakorlatba történő átvitele tette szükségessé. Az államigazgatás a vízellátás-csatornázás szakirányú továbbképzés szakmai színvonalát elismerve, jogszabályokban is rögzített szakmai jogosítványokat kötött a képzésben megszerzett diplomához (16/2016 BM rendelet 1. melléklet)

KÉPZÉSI CÉL:

A szakmérnöki továbbképzés célja a korábban, a főiskolai mérnök képzés keretében tanult anyag felújítása és korszerűsítése, valamint kiegészítése új, hangsúlyozottan a víziközművek üzemeltetésével kapcsolatos ismeretekkel.

A TANANYAG KIEMELTEN TARTALMAZZA:

- a hagyományos és új technológiákat és azok megvalósítását szolgáló műtárgyakat, berendezéseket, létesítések, üzemeltetésüket;
- a korszerű üzemeltetés irányítástechnikai berendezéseit és a fontosabb irányítási algoritmusokat;
- az üzemeltetéshez szükséges műszaki-gazdasági és jogi ismereteket,
- valamint a kapcsolódó elméleti alapokat.

A szakirányú továbbképzés önköltséges, tandíja 165.000.-Ft/félév.

A továbbképzés levelező tagozatos, kreditrendszerű formában történik, időtartama négy félév. Az egyes félévek háromszor egyhetes kötelező konzultációból és a vizsgák letételére szolgáló vizsgaidőszakokból állnak.

A jelentkezési határidő: 2021. augusztus 15.

A jelentkezéssel kapcsolatos bővebb információért kérem látogasson el honlapunkra

<https://vtk.uni-nke.hu/oktatas/szakiranyu-tovabbkepzesek>

Vegyszeradagolás

Pontos és megbízható, alacsony nyomástartományú adagoló szivattyúk

ProMinent®

További információkért kérjük, látogassa meg weboldalunkat: www.prominent.hu vagy hívjon minket az alábbi telefonszámon: +36 96 /511-400