



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2023**



**Üzemi méretű szennyvíztisztító technológia léptékcsökkentéséből
adódó problémáinak kiküszöbölése laboratóriumi méretben**

Készítette: Kovács Áron Boldizsár

Témavezető: Pitás Viktória; Harasztiné Hargitai Réka

Mérnöki kar, Fenntarthatósági Megoldások Kutatólaboratórium

A pályamunka lezárásának dátuma: 2023.10.23.

Tartalomjegyzék

IRODALMI RÉSZ	1
Összefoglaló	1
Bevezetés	2
Szennyvíztisztítás módjai.....	2
Kémiai szennyvíztisztítás	3
Biológiai szennyvíztisztítás	3
<i>Egyenes átfolyású és szakaszos üzemű rendszerek.....</i>	<i>4</i>
Különböző szennyezőanyagok eltávolítása biológiai úton	4
Szén eltávolítása	4
Nitrogénformák	5
<i>Ammónium-N eltávolítása.....</i>	<i>5</i>
<i>Nitrát-N eltávolítás</i>	<i>6</i>
Foszfor eltávolítás	6
Biológiai szennyvíztisztítás technológiai megoldásai.....	8
Egyenes átfolyású teljesen aerob rendszerek.....	8
Teljes nitrogéneltávolításra alkalmas egyenes átfolyású rendszer (A/O)	8
Teljes nitrogén- és foszforeltávolításra alkalmas technológia (A2/O).....	9
Szakaszos üzemű rendszerek sajátosságai - SBR	10
<i>Anaerob környezet kialakításának nehézsége SBR rendszerekben.....</i>	<i>11</i>
GYAKORLATI RÉSZ	13
Célkitűzés	13
A vizsgált szennyvíztisztító telep bemutatása.....	14
A vizsgált technológia megvalósítása laboratóriumi méretben.....	17
Alkalmazott mérési módszerek	19
KOI meghatározás	19
Ammónium-N meghatározás.....	19
Ortofoszfát-P meghatározás	19
Összes P meghatározás.....	20
Nitrát-N meghatározás.....	20
Nitrit-N meghatározás	20
Összes N meghatározás	20
1. beállítás tapasztalatai	21
Cikluson belüli mérési eredmények értékelése.....	25
2. beállítás tapasztalatai	27
Cikluson belüli mérési eredmények értékelése.....	31
3. beállítás tapasztalatai	32
Cikluson belüli mérési eredmények értékelése.....	36
Visszatérés a 2. beállításhoz	36
Következtetések	38
Irodalomjegyzék.....	39

IRODALMI RÉSZ

Összefoglaló

Kutatásom célja volt annak megállapítása, hogy milyen ciklus beállítások mellett lehetséges nagyüzemi, anaerob, anoxikus és oxikus medencetereket tartalmazó (A2/O) szennyvíztisztító technológiát átültetni laboratóriumi méretű, szakaszos üzemű (SBR) technológiává úgy, hogy a nagyüzemi és a laboratóriumi méretű rendszer tisztítási hatékonysága a lehető legnagyobb mértékben egyezzen.

Az üzemi méretű, anaerob medencetert is tartalmazó technológiák laboratóriumi méretű szakaszos üzemű technológiára történő átültetése szennyvíztisztítás területén nehézségekbe ütközik. Ennek oka, hogy a többletfoszfor eltávolításhoz szükséges körülmények nehezen biztosíthatók, mivel egyrészt anaerob - azaz oxigén- és nitrátmentes - környezet, másrészt elegendő mennyiségű, könnyen bontható szerves anyag egyidejű megléte szükséges hozzá. A kutatás ideje alatt egy laboratóriumi SBR technológia hosszú idejű folyamatos üzemeltetése mellett rendszeres méréseket végeztem, három különböző beállítást vizsgálva.

A szakirodalomban olvasható módon alakítottam ki az első beállítást, melyben a befolyó szennyvizet közvetlen az iszapréteg alá, kevertetés nélkül, hosszú időn keresztül juttattjuk be annak érdekében, hogy így lokális anaerob körülmények kialakulását érjük el a biológiai többletfoszfor eltávolítás érdekében. Mivel ezzel a beállítással nem sikerült megfelelő foszforeltávolítást elérni, további kettő beállítást vizsgáltam. Elsőként a szennyvíz gyors, kevertetés melletti feladásával próbáltam meg elérni, hogy az előző tisztítási ciklus végén az iszapos vízzel a reaktorban maradó nitrátot denitrifikálja a biológia, majd ezt követően anaerob körülmények alakuljanak ki a többletfoszfor eltávolítás érdekében. A másik beállításban a szennyvíz betáplálást két egyenlő mennyiségre osztottam, időben is elcsúsztatva azokat. Feltételeztem, hogy az első betáplálást követően az anoxikus körülmények között denitrifikálódik a reaktorban visszamaradt nitrát, a második betáplálással a reaktorba érkező friss, könnyen bontható tápanyagban dús szennyvíz pedig biztosítani tudja a foszfor akkumuláló mikroorganizmusok számára szükséges szerves anyagot az így kialakult anaerob körülmények mellett.

Mérési eredményeim alapján mind a második, mind a harmadik beállítás alkalmas a nagyüzemi A2/O rendszerrel egyező mértékű biológiai többletfoszfor eltávolítás biztosítására – amennyiben ezt a befolyó szennyvíz C:N:P aránya is lehetővé teszi.

Bevezetés

Az emberiség fejlődésének és életvitelének változásával párhuzamosan változott az általunk termelt szennyvíz mennyisége, minősége, s ezáltal kezelésének és kibocsátásának módja. Kisebb mennyiségek mellett nem okoz gondot egy befogadóba kibocsátásuk, vagy akár öntözővízként való újra felhasználásuk mindaddig, amíg a befogadó környezet természetes öntisztító kapacitását a szennyezés mértéke nem haladja meg. [1] A demográfiai robbanás és az ipar fejlődése miatt, a legtöbb helyen komoly mértékben megnőtt a tisztítandó szennyvíz mennyisége. Lépéseket kell tenni annak érdekében, hogy a keletkező szennyvizet forrásától függően, megfelelő módon és mennyiségben kezeljük, hogy a befogadó ökoszisztémának a tönkretételét elkerüljük, mivel ezen folyók, patakok sok esetben ivóvízforrások. [2]

A szennyvíz minőségét annak eredete fogja meghatározni. A lakossági szennyvíz öblítőfolyadékkal eltávolított hulladéknak tekinthető. Nagyobb része a háztartásokban keletkezik WC használatkor, valamint mosakodáskor és mosáskor. [3] Ez az elvezetett víz változhat a szállítási ideje alatt a csatornában a csatornatípus függvényében. Egyesített csatornarendszer esetében az esővíz a szennyvizet hígítja, illetve a tetőkről, utakról bemoshat egyéb szennyezőanyagokat, amelyek toxikus hatásúak lehetnek. Elválasztott csatornarendszer esetében ezekkel nem kell számolni, ez esetben a csatornarendszerbeli tartózkodási idő lesz meghatározó a minőségváltozás szempontjából. [4] [5]

Lakossági szennyvíz mellett változatos összetételű, ipari eredetű szennyvíz tisztítását is meg kell valósítani, mely forrástól függően lehet könnyen és nehezen bontható. A közcatornába bocsátásra vonatkozó határértéket teljesítő ipari szennyvizet a közcatornába lehet engedni, mivel a lakossági szennyvíztisztító telep képes ezeket kezelni, az összetételük általában nem veszélyezteti a biológiai tisztítósorban a mikroorganizmus kolóniát. A határértéket meghaladó vagy különösen nehezen bontható szennyvíz kezelésére specializált saját szennyvíztisztítót kell üzemeltetnie a kibocsátónak, mielőtt közcatornába vagy befogadóba engedi ki a tisztított vizet. [5]

Szennyvíztisztítás módjai

A szennyvíztisztítás gyors fejlődése az elmúlt században indult meg, mivel a szennyvíz mennyiségének növekedése a befogadókat túlterhelte. Ennek komoly következményei voltak, a környezet állapotának romlása mellett jelentős közegészségügyi problémát is jelentett az

elszennyezett befogadók vize. Ennek orvoslására változatos technológiai megoldások születtek. A jelenben alkalmazott technológiák közül bemutatok néhányat.

A szennyvíztisztítás lehetséges megoldásaiban a mechanikai, a kémiai és a biológiai módszereket, illetve ezek kombinációit alkalmazzák. A beérkező szennyvizet először mindig mechanikai módszerekkel kezelik. Ezek a technológiai sorok állhatnak durva szűrőkből, zsír- és homokfogókból és előülepítőből. A durva szűrők (jellemzően rácsok) a nagyobb méretű darabos szennyezők eltávolítását végzik. A homokfogók főként a kisebb méretű, abrazív hatású szennyezők, valamint zsírok eltávolítására szolgálnak. Az előülepítőben a visszamaradó, ülepítéssel leválasztható lebegő szennyezők eltávolítása történik. [6] [7]

Kémiai szennyvíztisztítás

Bizonyos szennyezőanyagokat kémiai átalakítással magas hatékonysággal képesek vagyunk eltávolítani. Ehhez különböző kémiai mechanizmus alapján funkcionáló vegyszert szükséges alkalmazni. A cél, hogy ezen átalakítások által az eredeti szennyezőanyagból ártalmatlan komponenst hozzunk létre, vagy könnyebben eltávolíthatóvá tegyük.

Alkalmazható kémiai átalakítások [8] [9]:

- Csapadékképzés
- Derítés
- Adszorpció
- Ioncsere
- Emulzióbontás
- Oxidáció
- Semlegesítés

Szennyvizek tisztítása során fentiek közül a csapadékképzés a leggyakrabban alkalmazott eljárás. Kétféle cél mentén valósulhat meg: a szennyvízben lévő lebegő és kolloid szennyezők eltávolítása érdekében, általában előkezelésként (fizikai-kémiai előkezelés, mely legtöbbször oldott levegős flotáló (DAF) berendezésben történik), vagy kémiai foszforeltávolítás céljából. Mindkét esetben koagulálószer (továbbá az első esetben ezen felül flokkulálószer) alkalmazásával valósulhat meg a kívánt cél elérése.

Biológiai szennyvíztisztítás

Az élővizekben lejátszódó természetes folyamatokon alapszik a biológiai szennyvíztisztítási módszer. A természetes vizek öntisztító kapacitása a bennük élő mikroorganizmusoknak köszönhető. A szennyező anyagok ezen élőlények aktivitásán keresztül

átalakulnak az élővilág által újra felhasználható formába. A szennyvíztisztításban ezt a folyamatot/lépést a mechanikai tisztítás után visszamaradt oldott, kolloid, lebegő szennyezőanyagok biokémiai folyamatok általi eltávolítására alkalmazzák. Egyszerre számos folyamat játszódik le, melyek különböző szennyezőanyagok eltávolítására alkalmasak, így a technológiai megoldásaik az egyes folyamatokat egymástól térben vagy időben elkülönítve teszik lehetővé. [8] [9]

Egyenes átfolyású és szakaszos üzemű rendszerek

A legelterjedtebb biológiai szennyvíztisztító technológia az eleveniszapos technológia. Két fő csoportra osztható: egyenes átfolyású és szakaszos üzemű rendszerek. Ezek között a fő különbség, hogy a tisztítási lépések az egyiknél egymást követő medencékben zajlanak le (tehát térben különülnek el), míg a másikon ugyanazon reaktortérben, időben egymást követve zajlanak le. A fő szennyező komponensek eltávolítására különböző mikroorganizmusok képesek. Ennek a kihasználása érdekében ez egyes mikroorganizmusoknak kedvező körülmények létrehozása fontos. A többletfoszfor eltávolításhoz anaerob körülmények szükségesek, nitrát eltávolításhoz anoxikus, míg ammónia eltávolításhoz aerob körülmények. Mindemellett a szerves C tartalmat a mikroorganizmusok felhasználják a szaporodáshoz és a saját sejtjeik felépítéséhez mindhárom típusú környezetben, de eltérő módon. [10] [11]

Különböző szennyezőanyagok eltávolítása biológiai úton

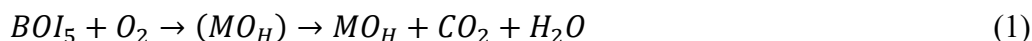
Szén eltávolítása

A beérkező szennyvíz legnagyobb mennyiségben eltávolítandó szenet tartalmaz. Ezt a C tartalmat előülepítést követően oldott és igen finom szerves lebegő anyagok teszik ki. Döntő mennyiségük biológiai úton távolítható el. A természetes folyamatok során a beérkező szerves anyagot a heterotróf mikroorganizmusok széndioxiddá és részben biomasszává alakítják lebontás és adszorpció útján. A szerves anyagot a sejtek beépítik magukba oxigén felhasználása közben. Ezt az oxigént anoxikus körülmények között nitrátból fogják kinyerni, míg aerob körülmények között az oldott oxigént használják fel.

A jó tisztítási hatásfok eléréséhez elengedhetetlen a megfelelő összetételű eleveniszap jelenléte. A biomassza szaporodásához és morfológiájához kulcsfontosságú a megfelelő a C, N és P arány. Magas C tartalom mellett a mikroorganizmusok szaporodási sebessége csökken, ami rontja az iszap ülepedését, viszont alacsony C tartalom mellett az iszap kevesebb nitrogént

és foszfort fog felvenni, amin az iszaptömeg növelésével lehet javítani. Ha a lakos egyenértéket (LEÉ) 60 g BOI_5 -nek vesszük, amiben tudjuk, hogy a nitrogén mennyisége (5,5%) 2,5 g, a foszfor pedig 0,5-0,7 g, akkor az iszap megfelelő szaporodásához és morfológiájához a kulcskomponensek $BOI_5:N:P=100:4:1$ aránya szükséges. KOI tekintetében a megfelelő tápanyagarány $KOI:N:P=100:5:1$, de ezt szokás C-el is megadni amikor az arány ugyanaz ($C:N:P=100:5:1$). [5]

A szerves anyag beépítése és oxidációja a következő egyenlettel írható le [5]:



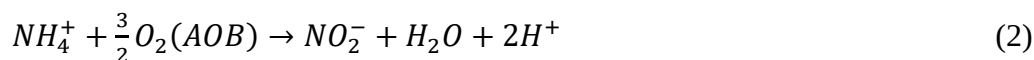
Az (1)-es reakcióban a MO_H a rendszeren belüli átalakítást végző heterotróf mikroorganizmusok tömegét jelenti.

Nitrogénformák

A szennyízben a nitrogén nitrit, nitrát, ammónium és szerves nitrogén formában található meg. Ezek lehetnek oldott vagy nem oldható formában. A csatornából érkező szennyízben legnagyobb mennyiségben szerves nitrogén és ammónia lesz jelen, ennek oka, hogy a csatornában uralkodó redukzív körülmények között a nitrit, nitrát képződése limitált. [2] [12] Ahhoz, hogy a szerves nitrogén biológiai úton eltávolítható legyen, szükséges előbb ammóniává hidrolizálni. A szennyízben lévő nitrogén egy részét az iszap szaporodása során felveszi (mintegy 5%, [13]), azonban ennek mértéke nem elegendő a vonatkozó határértékeknek való megfeleléshez.

Ammónium-N eltávolítása

A szennyíz ammónium tartalmát nitrifikáció segítségével távolítja el az eleveniszap. Ezen mikroorganizmusok autotrófok, vagyis ammónia nitrifikálásával nyernek energiát a saját sejtjeik fejlődéséhez és 2 csoportba sorolhatók az átalakítás lépéseinek megfelelően: ammónia oxidáló mikroorganizmusok (AOB, Ammonia Oxidizing Bacteria) és nitrit oxidáló organizmusok (NOB, Nitrite Oxidizing Bacteria). A legismertebb nitrifikálók a Nitrosomonas (AOB) és a Nitrobacter (NOB) fajok.

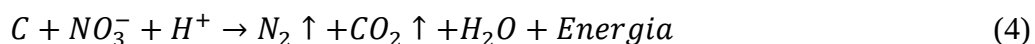


Az első lépésben (2) a Nitrosomonas baktériumok a szabad ammóniát oxidálják nitritté, az ezt követő lépésben (3) pedig a nitritet nitráttá oxidálják a nitrit oxidáló organizmusok.

Több tényező befolyásolja a nitrifikáció hatékonyságát, mint pl.: hőmérséklet, oldott oxigén, pH. Magas oldott oxigén tartalom nem befolyásolja negatívan, míg az alacsony igen. Minden levegőztető reaktorban más oldott oxigén szint lesz optimális, mely függ a reaktor méretétől, a kialakuló körülményektől, a biom összetételétől stb. Viszont az elterjedt és a megfelelő nitrifikáció érdekében tartandó legalacsonyabb oldott oxigén koncentráció 2 mg O₂/l. [10] [14]

Nitrát-N eltávolítás

A biológiai átalakítások oxigénigényes folyamatok, melynek következtében az oldott oxigén koncentráció csökken a szennyvízben, ha azt nem levegőztetik. Ha elfogy az oxigén, anoxikus körülmény alakul ki, vagyis felhasználható oxigén kémiaiilag kötött formában marad csak a vízben. Így a heterotróf mikroorganizmusok a vízfázis nitrát tartalmát fogják felhasználni, mint elektron akceptort a bontható szervesanyag (KOI, Kémiai Oxigén Igény) lebontásához. Az oxigén felhasználását követően a nitrogén gáz formában távozik a vízből a légkörbe (4). [10]



Anoxikus környezet szükséges a maximális hatékonyság eléréséhez. Ha az oldott oxigéntartalom magasabb mint 0,1 mg O₂/l, akkor a denitrifikáló baktériumok inkább oxigént használnak fel nitrát helyett. Ebből adódóan magasabb oxigéntartalom mellett a hatékonyság csökken. [15]

Foszfor eltávolítás

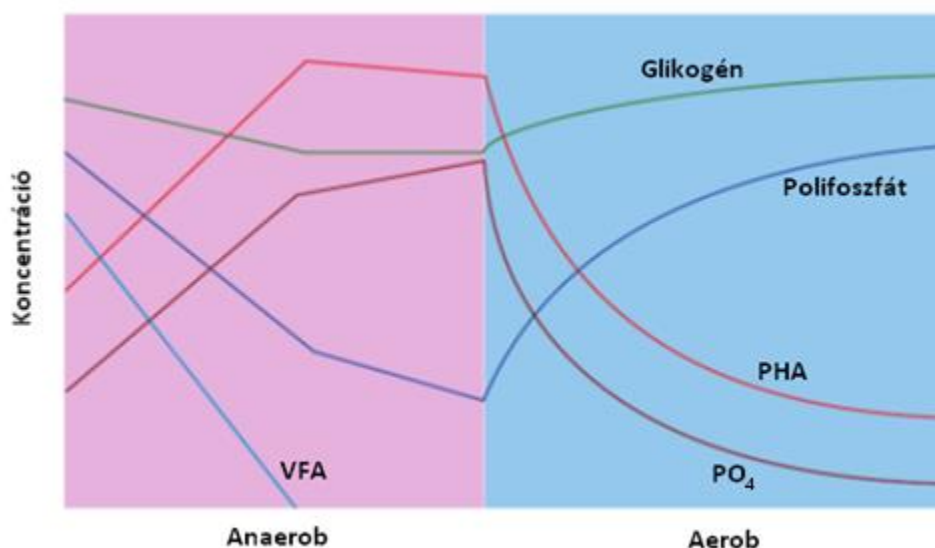
A szennyvíz foszfor tartalma egy részének eltávolítása az eleveniszap szaporodása során történő foszforfelvétel segítségével történik meg. Ennek mértéke azonban nem több mint az iszapszaporulat 1,5 – 2 %-a [13], mely érték önmagában általában nem elegendő az élővízi befogadókra vonatkozó határértékek kielégítéséhez. Biológiai úton a foszfor akkumuláló heterotróf (PAH, Phosphorus Accumulating Heterotrophs) mikroorganizmusok elszaporodásának elősegítésével lehetséges a beérkező szennyvíz foszfortartalmának határérték alá történő csökkentése. Az ilyen biológiai többletfoszfor eltávolításnak a feltétele, hogy a folyamat elején az iszap leadja a PAH sejtek által polimerizált foszfort ortofoszfát formában,

illetve a biológiai tisztítósor végén a foszfort az eleveniszap újra felvegye, így a bejövő szennyvíz foszfortartalmához képest lényegesen csökkentve az elfolyó víz foszfortartalmát.

A foszfor eltávolítást végző PAH mikroorganizmusok szaporodása lassú, elősegítése érdekében számukra előnyös, oxigénhiányos és könnyen felvehető tápanyagban gazdag környezetbe juttatjuk őket. Ezen feltételeket az anaerob medence biztosítja, melyet a biológiai tisztítósor elején helyeznek el az A2/O rendszerekben. A biológiai többletfoszfor eltávolítása több lépésen keresztül megy végbe:

- A szennyvíz először az anaerob medencébe érkezik. Itt a PAH mikroorganizmusok az általuk elraktározott poli-foszfátot depolimerizálják, ezzel oldatba engedve azt (ortofoszfát). Ezáltal a felszabadított energia segítségével a szennyvízben található könnyen felvehető tápanyagokat (pl.: acetát) felveszik és eltárolják a sejtjeikbe.
- Az aerob szakaszban a PAH mikroorganizmusok a szennyvíz ortofoszfát tartalmát felveszik és elraktározzák poli-foszfát formájában.
- Utóülepítés során a már foszforban gazdag fölösiszapot elveszik és tovább kezelik, másik részét pedig recirkuláltatják az anaerob térrészbe.

Összefoglalva, az aerob medencében az iszap több foszfátot vesz fel, mint amennyit az anaerob medencében lead, és így a foszfor akkumulálódik a keletkező iszapban. A szennyvíz foszfortartalma a keletkező fölösiszap elvételén keresztül eltávolításra kerül a rendszerből. [10] [16] [17] A foszfor koncentrációjának az időbeli változását az 1. ábra szemlélteti.



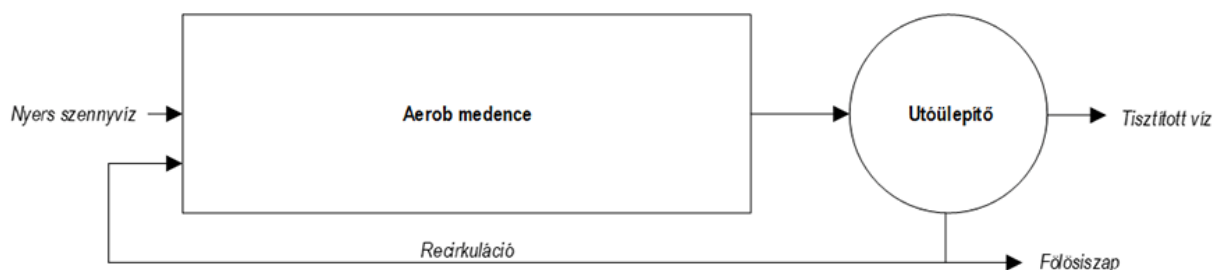
1. ábra Illékony zsírsavak (Volatile fatty acids - VFA), foszfát (PO_4), poli-foszfát, poli-B-hidroxi-alkanoát (PHA) és glikogén koncentrációjának változása anaerob és aerob körülmények között az idő függvényében. [10]

Biológiai szennyvíztisztítás technológiai megoldásai

Az egyenes átfolyású rendszerek a szennyvíztisztítás legelterjedtebb rendszerei, számos technológia sorba kapcsolásából épülnek fel. Az egyes reaktorok egy feladat ellátására vannak kialakítva a technológiai sorokban. A rendszereket célszerű úgy kialakítani, hogy a technológia nagyobb részén a víz gravitációs úton tudjon haladni. Hogy ezt elérjék, a tisztítósor előtt a befolyó vizet felemelik – például arkhimédeszi csavarszivattyúkkal. [18]

Egyenes átfolyású teljesen aerob rendszerek

A legegyszerűbb típusuk a kizárólag aerob medencével működő rendszer. A nyers szennyvíz a mechanikai tisztítást követően egy levegőztető medencébe kerül, ahol légbefúvás hatására a biológiailag oxidálható szervesanyag tartalma lebomlik, illetve nitrifikáció is végbemegy. Ezt a teret elhagyó víz egy utóülepítőbe kerül, ahol szeparálódik egymástól a vízfázis és az iszapfázis. A kiülepedett iszap egy részét visszatáplálják a levegőztető medencébe, másik része fölösiszapként elvételre kerül. A rendszer hátránya, hogy nem megy végbe foszforeltávolítás és nitrát redukció, azaz eutrofizációt elősegítő tápanyagok maradnak az elfolyó tisztított vízben. [5] [16] [18] Általános felépítésüket a 2. ábra szemlélteti.

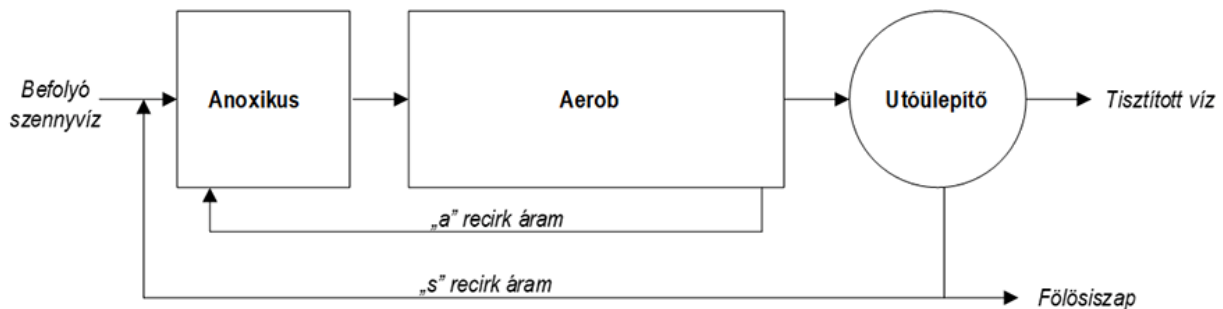


2. ábra Egyenes átfolyású teljesen aerob rendszer folyamatábrája [16]

Teljes nitrogéneltávolításra alkalmas egyenes átfolyású rendszer (A/O)

A teljes nitrogéneltávolítás két eltérő környezetigényű folyamaton keresztül érhető el. Nitrifikáció során az oldott oxigén segítségével oxidálják a szennyvíz ammónium tartalmát a mikroorganizmusok, melynek végtermékeként nitrát képződik. Azonban a nitrát is káros hatásokkal jár, ha nagy mennyiségben található a befogadóba kiengedett vízben, így eltávolítása szintén szükséges. A nitrát eltávolítását denitrifikáció útján érik el, melynek feltétele az anoxikus környezet biztosítása. Anoxikus környezetben, azaz megfelelően alacsony oldott oxigén koncentráció mellett az oxidációs folyamatokhoz szükséges oxigént kémiaiilag kötött

formájában is elérik a mikroorganizmusok. Ennek következményeképpen a nitrátból elemi nitrogén gáz keletkezik, amely a légkörbe távozik. Általános felépítésüket a 3. ábra szemlélteti.

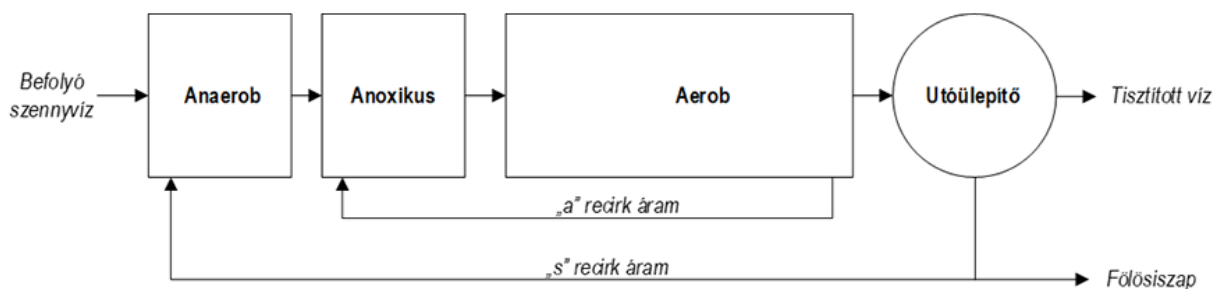


3. ábra Teljes nitrogén eltávolításra alkalmas egyenes átfolyású rendszer folyamatábrája [16]

A rendszerben két recirkulációs kör van. Az utóülepítőben kiülepedő iszap egy részét visszajuttatják a folyamat elejére (iszaprecirkuláció), a fölősiszapot pedig elveszik. Az aerob medence végéből recirkuláltatják az iszapos vizet az anoxikus medencébe (belső recirkuláció). Ennek célja, hogy csökkentsék a tisztított víz nitrát tartalmát. [5] [16] [18]

Teljes nitrogén- és foszforeltávolításra alkalmas technológia (A2/O)

A teljes nitrogén- és foszforeltávolításra alkalmas egyenes átfolyású technológiák legelterjedtebb típusa az A2/O (Anaerob, Anoxikus, Oxikus), amely a legfőbb komponensek együttes eltávolítására képes. Általános felépítésüket a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra Egyenes átfolyású rendszerek általános folyamatábrája [16]

A biológiai tisztítás első lépéseként, az anaerob medencének a legfőbb feladata, hogy elősegítse a foszfor eltávolítását PAH mikroorganizmusok által. Ezen mikroorganizmusok könnyen felvehető tápanyagra cserélik le a poli-foszfátjukat, így növelve a víz ortofoszfát tartalmát. Tisztítás során az iszap mennyisége nő a tápanyagfelvételnek köszönhetően. A későbbi levegőztetésnél, amikor nem lesz számukra elérhető tápanyag, a víz ortofoszfát tartalmát újból elraktározzák, ezzel a víz foszfát tartalma az iszapba kerül. Az iszapot az utóülepítőben elválasztják az elfolyó tisztított víztől, a többletfoszfor eltávolítást elérve. Az

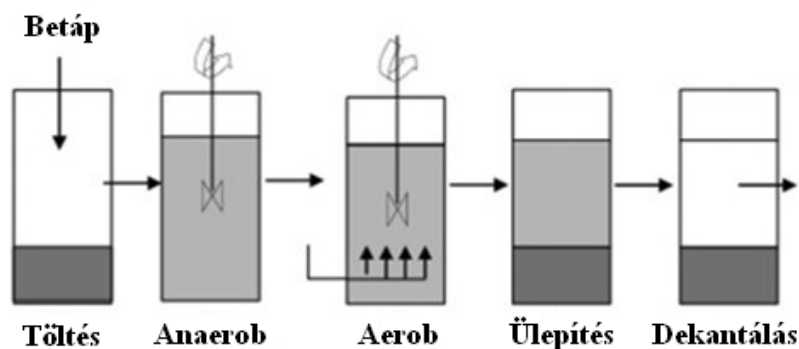
anoxikus medencében nincsen elérhető oldott oxigén, csak kémiaiilag kötött formában van. Lényege a szennyvíz nitrát tartalmának csökkentése, amit a mikroorganizmusok, mint elektron akzeptort használnak fel a biológiailag bontható szerves anyag oxidációjához. Az utolsó biológiai reaktor az aerob medence, ahol a szerves anyag oxidációja, de legfőképpen az ammónium oxidációja megy végbe.

Ezen rendszerek egy típusa a Johannesburg (JHB) eljárás. Az utóülepítőből az anaerob medencébe recirkuláltatott iszap tartalmaz nitrátot, amely rontja a foszfor leadás hatékonyságát. Ennek kiküszöbölésére a recirkuláltatott iszap nem közvetlen az anaerob medencébe, hanem egy előszelektor medencébe kerül. Ezzel az anaerob reaktorba bejutó recirkuláltatott iszap nitrát tartalma előzetesen denitrifikálásra kerül. [5] [18]

Szakaszos üzemű rendszerek sajátosságai - SBR

Az előzőekben tárgyalt rendszerekhez képest a szakaszos üzemű rendszerek (SBR, Sequencing Batch Reactor) esetében a különböző tisztítási folyamatokhoz szükséges körülmények kialakítása és fenntartása nem több egymástól elkülönített térben történik, hanem egy reaktortérben, időben elválasztva. Ebből adódóan bizonyos mérethatárig számos előnnyel rendelkezik az egyenes átfolyású rendszerekhez képest. Nem igényel külön ülepítő műtárgyat, lényegesen kisebb helyigényű és kisebb beruházással kivitelezhető. További előnyük, hogy rugalmas rendszerek. A befolyó szennyvíz paraméterei alapján optimalizálható az egyes részfolyamatok (betáplálási szakasz, anoxikus szakasz, oxikus szakasz) ideje annak érdekében, hogy a kifolyó szennyvíz paramétereit a kívánt értékek alatt tartsák. [19]

Először feladják a nyers szennyvizet a reaktorba, melyet aztán anaerob, anoxikus és oxikus körülmények között kezelnek, végül az iszap ülepedését követően a tisztított vizet elvezetik. A ciklusok menete és a részfolyamatok a befolyó szennyvíz és a kívánt elfolyó paraméterei alapján vannak meghatározva. Az általános lépéseket az 5. ábra mutatja.



5. ábra SBR reaktor szennyvíztisztítási lépései [20]

Betáplálásnál az előző ciklus végén dekantálással eltávolított tiszta víz mennyiségével megegyező nyers szennyvizet juttatnak a reaktorba. Ezt követően, levegő betáplálás nélkül kevertetik a reaktorban a vízfázist, hogy az anoxikus körülmények kialakuljanak, és hogy ennek eredményeképpen a víz nitrát tartalmának denitrifikálása lejátsszódjon. Az anoxikus szakaszt váltja fel az oxikus. Ekkor levegőztetéssel növelik a víz oldott oxigén tartalmát annak érdekében, hogy annak ammónium tartalma nitráttá oxidálódjon.

A tisztítási folyamat befejező lépése az eleveniszap vízfázistól való elkülönítése ülepítés segítségével. SBR rendszerek esetében az iszap fél-egy óra után megfelelően kiülepszik a reaktor alsó részében, ekkor a tiszta vízfázis elvétele megkezdődhet a reaktor felső részéből. A dekantálás történhet rögzített vagy úszó berendezéssel. Az első esetben a berendezéssel meg kell várni, míg az iszap szintje az elvételi pont alá kerül, míg az utóbbinál erre nincsen szükség, feltéve, hogy a tiszta vízréteg megfelelő mélységű. [11] [21] [22]

Anaerob környezet kialakításának nehézsége SBR rendszerekben

Szakaszos üzemű rendszerekben a friss szennyvíz betáplálásakor mindenképpen jelen lesz nitrát, mely az előző ciklus utolsó biológiai lépése, a levegőztetés során keletkezett ammónia oxidációjával. A nitrát jelenléte pedig azt okozza, hogy nem anaerob, hanem anoxikus körülmények uralkodnak a reaktortérben, melyben a biológiai többletfoszforeltávolítás nem fog végbemenni. Anaerob körülmények kialakítása a szakirodalom szerint alábbi módon lehetséges.

Ülepítés és dekantálás után a visszamaradó iszapfázisban lévő mikroorganizmusok képesek felhasználni a benne maradó oxigént és nitrátot endogén és denitrifikáció légzésen keresztül. Vagyis anaerob körülmény alakulhat ki az iszapfázison belül, feltéve, hogy az ülepedés és a dekantálás elég időt biztosít ehhez.

Abban az esetben, ha a következő alulról történő betáplálásnál biztosítható, hogy ne keveredjen fel az iszap, akkor elméletben az iszap foszforleadása lejátszódhat, mivel friss tápanyag kerül az anaerob iszapfázisba. Ezt a friss tápanyagot a poly-P mikroorganizmusok felveszik, miközben az általuk elraktározott foszfátot depolimerizálják és a keletkező ortofoszfátot leadják. Ezzel ideiglenesen megnő a víz ortofoszfát tartalma, viszont ezt a tisztítási folyamat során felszaporodó iszap az aerob körülmények között újra polimerizálja, így lehetővé téve a foszforeltávolítást. [21] [22]

GYAKORLATI RÉSZ

Célkitűzés

Eleveniszapos szennyvíztisztítási technológiák vizsgálata laboratóriumi méretben szakaszos üzemben valósítható meg olyan mértékű üzembiztonsággal, hogy hosszabb ideig üzemeltethető legyen a reaktor komolyabb meghibásodás nélkül. Ez azonban nagymértékű absztrakciót igényel, mivel legtöbb esetben a nagyüzemi lakossági szennyvíztisztító technológiák egyenes átfolyású rendszerek, melyekben az egyes, eltérő környezetigényű folyamatok térben különülnek el egymástól a különböző medenceterekben (anaerob, anoxikus, oxikus), az eleveniszapnak és a tisztított szennyvíznek a szétválasztása pedig külön utóülepítő műtárgyban történik meg. Ezzel szemben laboratóriumi méretben a szakaszos üzemű technológiával ezeket a folyamatokat nem térben, hanem időben különítjük el egymástól, és a folyamatok időben egymást követve ugyanazon reaktortérfogatban mennek végbe. Különösképpen azok a technológiák jelentenek léptékcsökkentés szempontjából kihívást, melyekben anaerob medencetér is található.

Hosszú idejű, több hónapon át történő folyamatos üzemeltetés és rendszeres mérés szükséges ahhoz, hogy kiderüljön, hogyan kell módosítani a beállításokat az eredeti elképzeléshez képest, annak érdekében, hogy a lehető legnagyobb mértékben megközelítse a laboratóriumi reaktorról elfolyó tisztított szennyvíz minősége a nagyüzemi tisztított szennyvízminőséget.

Kutatásom célja volt megvizsgálni, hogy a veszprémi városi szennyvíztisztító telep technológiájának szakaszos üzemű laboratóriumi reaktorra történő átültetése során:

1. Milyen tisztítási hatékonyság érhető el a telepihez képest a kezdeti beállításokkal,
2. A kezdeti beállítások módosítását követően 2 különböző beállítás mellett hogyan változik a tisztítási hatékonyság – elsősorban foszforeltávolítás szempontjából.

Az eredmények és a levont következtetések alapján általános érvényű javaslatot kívántam megfogalmazni A2/O technológia laboratóriumi méretbe történő átültetése esetén.

A vizsgált szennyvíztisztító telep bemutatása

A veszprémi szennyvíztisztító telep Veszprém, Nemesvámos, Szentkirályszabadja, Hajmáskér és Veszprémfajsz szennyvizét fogadja, majd tisztítja a befogadó Séd-pataknak megfelelő határértékekre. A megközelítőleg naponta befolyó $13\,000\text{ m}^3$ nyers szennyvizet mechanikai és biológiai tisztítási egységek segítségével kezelik 2 egyenes átfolyású rendszerrel. A tisztítási folyamat során keletkező iszapot különböző technológiák segítségével kezelik és hasznosítják.

A beérkező szennyvizet 4 darab csigadugattyúval (arkhimédieszi csavarszivattyú) emelik fel a szűrőrácok és a homokfogók szintjére. Ennek előnye, hogy a szűrést követően a víz gravitációs hajtóerőn keresztül áramlik át a biológiai tisztítósorokon. A befolyó nyers szennyvíz mennyisége határozza meg, hogy hány darabot működtetnek párhuzamosan a csigadugattyúból.

A mechanikai szűrést lépegető szűrőrácokkal végzik. Mivel a rácok a nagyobb méretű víz által szállított hulladékot visszatartják, az idő elteltével kevesebb vizet képesek átengedni és a vízszint megnő. Annak érdekében, hogy a dugulást elkerüljék, egy monitoring rendszer segítségével a számítógépes rendszer állandóan „lépteti”, vagyis cseréli a szűrőrácot. A cserélt rács a hulladékot magával hordja, és egy csigával eltávolítja róla. Innen egy gyűjtőkonténerbe juttatja, melyet periodikusan elszállítanak.

Ezt követően 2 db párhuzamos telepítésű homokfogóba jut a szűrt víz, ahol a szennyvíz homok- és zsírtartalmának eltávolítása játszódik le.

Innen a 2 biológiai tisztítósor egyike felé áramlik majd a szennyvíz tovább. Egy korábbi és egy új építésű ág, mindkettő A2/O rendszer, működési szempontból megegyeznek. Első elemük az előülepítő. Itt a befolyó szennyvíz sűrűségkülönbség hatására szétválak vizes fázisra, illetve nyers szennyvíziszapra. A víz a Dorr ülepítő bukóelein át távozik az anaerob medencébe, míg az alján leülepedő primer iszapot elvezetik.

Az anaerob medencét megelőzi egy technológiai lépés. Ez az előszelektor, melynek feladata az utóülepítőből érkező iszap és előülepítőből érkező nyers szennyvíz összekeverése, majd továbbítása az anaerob medencébe. Mivel az anaerob medencében kémiaiilag kötött állapotban sem lehet oxigén, ezért a rendszerben maradó recirkuláltatott iszap nitrit, nitrát, oldott oxigén eltávolítása itt megtörténik.

Az anaerob medencékben a szennyvíz biológiai úton történő foszforeltávolításának első lépése megy végbe. Az ehhez szükséges körülményeket a régi ág esetében egy $1\,000\text{ m}^3$ -es, az

új ág esetében egy 900 m³-es medence biztosítja. Ezeket követik az anoxikus medencék, melyekben a kialakuló körülmények által a szennyvíz nitrát tartalmának a denitrifikálása játszódik le. A régi ág esetében 1 800 m³-es, az új ág esetében 2 100 m³-es az anoxikus medence. A medencékben banánkeverők segítségével biztosítják a homogenitást.

Következő lépésben az aerob térbe áramlik a víz, mindkét ág esetében 5 000 m³-es medencébe. Ebben a térrészben a szerves anyag eltávolításon kívül a szennyvíz ammónium tartalmának nitrifikálása történik oxikus körülmények biztosításával, amelyet a medence alján elhelyezett gumimembrános tányérokra keresztüli légbefúvással érnek el. A bejuttatott levegő által kialakult buborékok mozgása biztosítja a medencében tartózkodó szennyvíz szuszpenzió homogenizálását. A medencében az oldott oxigén szintet 0,8 és 1,2 mg/l között tartják, mely a tapasztalatok alapján elegendő a nitrifikálásra. A nitrát eltávolítás hatékonyságának javítása érdekében, a nitrátban dús szennyvizet recirkuláltatják az anoxikus medencékbe. Mindemellett az oxikus körülményeknek köszönhetően az iszap foszforfelvétele is itt megy végbe. Az aerob medencéből a víz tovább áramlik az utóülepítőbe.

A Dorr típusú ülepítőkbe Stengel fejen keresztül vezetik be a szennyvizet, ahol aztán sűrűségkülönbség hatására szétválak: vízfázisra, amely az ülepítő tetején bukoélen át távozik a befogadóba, illetve iszapra, amely kiülepszik az ülepítő aljára, és amelynek egy részét fölösiszapként eltávolítják a rendszerből, a maradékot pedig recirkuláltatják a technológiai sor elejére. A kiüledő iszap tartalmazza a megkötött foszfort. Az ülepedés hatásfokát kotróval javítják.

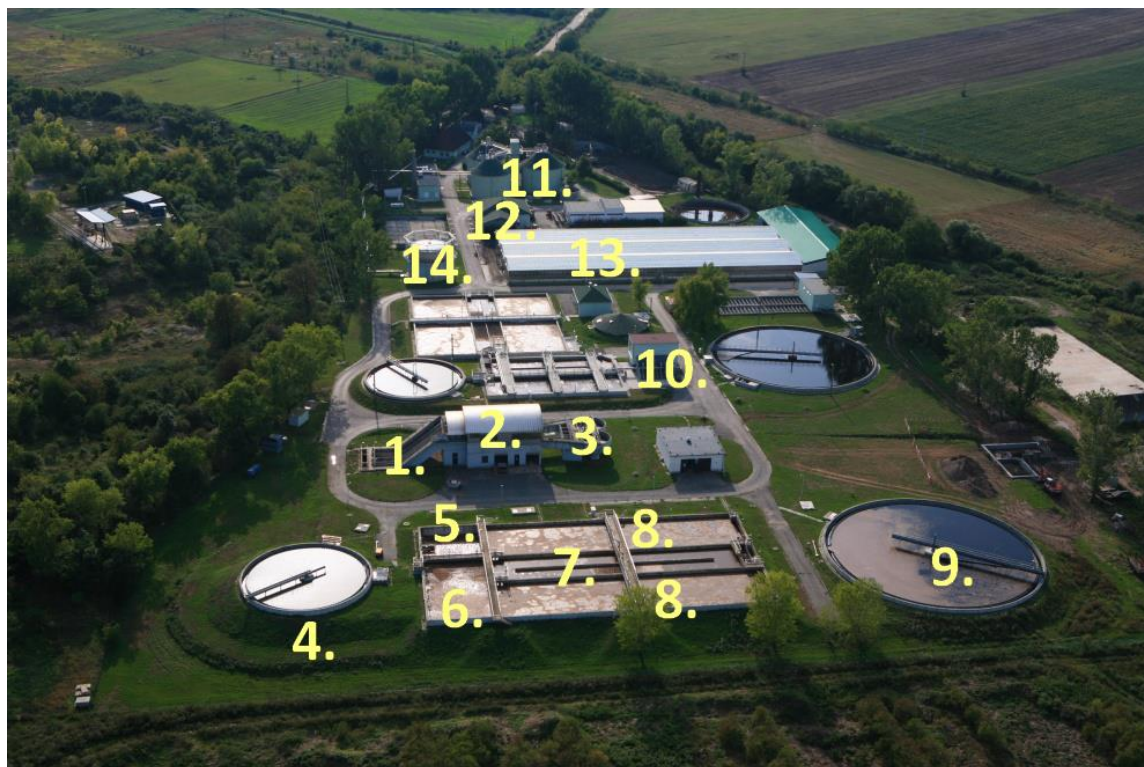
A keletkező fölösiszapot és nyersiszapot külön-külön szűrik, majd egy homogenizálóba juttatják, ahol a kettőt összekeverik. A keletkező hőt hasznosítják a rothasztóban. A homogenizált iszapot ezt követően sűrítik, majd anaerob rothasztó toronyba vezetik.

A telepen 3 rothasztótorony található (1 x 1 500 m³, 2 x 1 000m³). A tornyok a mezofil tartományban működnek (30-50 °C). A keletkező biogáznak kb. 60%-os a metántartalma, 10% a CO₂ és tartalmaz 1-2%-ban kén-hidrogént is. A keletkezett gázt kétféle módon tudják felhasználni: gázkazánokban, amelyek hőtermelésre képesek, vagy pedig elektromos áram (és hulladékhő) előállítására. A gázmotorok hulladékhőjét is fel tudják használni a gazdasági épületek melegítésére. A feleslegben keletkezett gázt egy gázharagos tartályban tárolják, és azt a gázt, amelyet nem tudnak eltárolni, fáklya segítségével elégetik.

A rothasztóból az iszapot egy kigázosítóba engedik. Végül centrifugálják, hogy a nedvességtartalmát csökkentsék. Eredményként kb. 15-20%-os szárazanyagtartalmú iszapot kapnak, amelyet szolár szárítóban szárítanak tovább.

A 6. ábra mutatja a telep egyes elemeit, a Johannesburgi típusú biológiai tisztítóssal kezdve:

1. Csigadugattyúk (arkhimédeszi csavarszivattyúk)
2. Rácszsűrők
3. Homokfogó
4. Előülepítő
5. Előszelektor medence
6. Anaerob medence
7. Anoxikus medence
8. Aerob medence
9. Utóülepítő
10. Iszapsűrő gépház
11. Rothasztótorony
12. Centrifuga gépház
13. Szolár szárító
14. Gázharangos tartály



6. ábra Veszprémi szennyvíztisztító telep légi fotója

A tisztított szennyvíz befogadója a Séd patak. A vonatkozó határértékek az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Veszprémi szennyvíztisztító telep elfolyó szennyvizére vonatkozó határértékek [23]

Határértékek		
Paraméter	Mértékegység	Koncentráció
pH	-	6,5-9
NO ₃	mg/l	-
KOI	mg/l	75
NH ₄ -N	mg/l	10
Össz. P	mg/l	4
BOI	mg/l	35
SZOE	mg/l	25
Össz. lebegőanyag	mg/l	6
Össz. N	mg/l	20

A vizsgált technológia megvalósítása laboratóriumi méretben

A nagyüzemi technológia kulcsfontosságú paramétereinek ismeretében van lehetőség a laboratóriumi méretre való leképezésre. Fontos tudnunk az egyes reaktorokon belüli térfogatokat, illetve a telep hidraulikai kapacitását. Ezen adatok és a laboratóriumi méretben alkalmazott SBR térfogatának ismeretében kiszámolható a reaktor terhelése. A rendelkezésre álló adatok az 2. táblázatban találhatóak.

2. táblázat: Veszprémi szennyvíztisztító medenceméretei, hidraulikai kapacitása

Medencék [m ³]					Hidr. Kapacitás [m ³ /nap]		
	anaerob	anoxikus	oxikus	Σ	névleges	átl.	Tervezéshez
régi ág	1 000	1 800	5 000	15 800	18 000	12 919	13 000
új ág	900	2 100	5 000				
Összesen	1 900	3 900	10 000				
	12,0%	24,7%	63,3%				

A medencék összesített térfogatát (15 800 m³) az átlagos befolyó szennyvízmennyiséggel (13 000 m³/nap) elosztva megkapjuk a hidraulikai tartózkodási időt a biológiai medencékben (hydraulic retention time – $HRT_{biol} = 1,22$ nap). Mivel a laboratóriumi méretű reaktor alaptérfogata 3 liter, azt kapott aránnyal elosztva megkapjuk az SBR napi terhelését (2,47 l/nap).

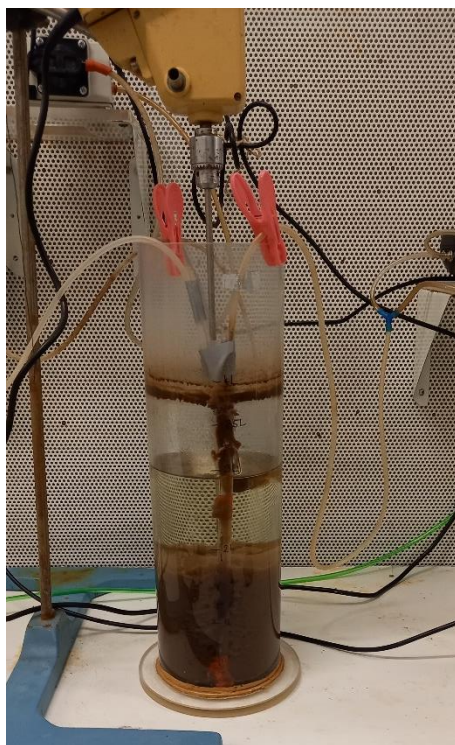
Mivel szakaszos üzemű rendszerekben minden egyes ciklusból mintegy 60 perc eltelik az ülepítéssel és tisztított szennyvíz elvétellel, nem ajánlott nagyszámú ciklust választani, mivel

ebben az esetben a biológiai tisztításra fordítható idő lényegesen lecsökkenne. Célszerű 8 órás ciklusokat választani, melyből 24 óra alatt 3 megy végbe, azaz a fenti napi szennyvízmennyiség ciklusonként 0,82 liter szennyvíz feladását jelenti a reaktorra.

3. táblázat: Labor SBR reaktor térfogata és terhelése

SBR		
Térfogat [L]	Terhelés	
	[L/nap]	[L/ciklus]
3	2,47	0,82

A nagyüzemi technológia legjobb megközelítésének érdekében az SBR indításához a veszprémi szennyvíztisztító telep recirkuláltatott iszapját használtuk fel. A telephelyi iszap szárazanyag tartalmának meghatározását követően azt az SBR reaktornak megfelelő hígításban alkalmaztam. A recirkiszap 6 kg/m^3 -nek felelt meg, az SBR reaktorban pedig 5 kg/m^3 iszapkoncentrációt szerettem volna létrehozni annak érdekében, hogy a nagyüzemi technológiával egyező iszapterheléssel tudjak dolgozni. Ennek megfelelően reaktor literenként 0,83 liter recirkiszapot kellett beadagolni a reaktorba. Összesen kb. 2,5 litert mértem be, és a maradék 500 ml-t csapvízzel egészítettem ki a reaktor feltöltése során. A reaktor a 7. ábrán látható.



7. ábra SBR elfolyó elvétel szakaszban

A reaktorral a veszprémi telepre befolyó, előülepített nyers szennyvizet tisztítottam. Új mintát kétheti rendszerességgel hoztunk, melyet az előülepítő tiszta fázisából vettünk. Ezzel párhuzamosan az utóülepítőből elfolyó vízből is vettünk mintát, hogy tudjuk az SBR reaktor teljesítményét hasonlítani a telepéhez.

A laboratóriumban vizsgáltam a telep elfolyó vizét és a labor befolyó (telepi befolyó), elfolyó vizét. A telepi mintákat 2 hetente, a laboratóriumi elfolyót pedig heti rendszerességgel vizsgáltam. Mindegyik esetében mértem az alábbi paramétereket:

- KOI (Kémiai Oxigén Igény)
- $\text{NH}_4\text{-N}$
- $\text{NO}_3\text{-N}$
- $\text{NO}_2\text{-N}$
- TN (Total Nitrogen)
- TP (Total Phosphorus)
- OP (Ortho-Phosphate)
- pH

Alkalmazott mérési módszerek

KOI meghatározás

A KOI meghatározást az MSZ 260/16-82 szabvány alapján kidolgozott saját módszerrel végeztem. A mérés elve, hogy a vizsgálandó mintát kálium-dikromát és katalizátor jelenlétében kénsavas közegben tartjuk, miközben a kálium-dikromát a jelenlevő, és az adott körülmények között oxidálható szervesanyagokat oxidálja (roncsolás 150 °C-on 120 percig). A kálium-dikromát felesleg (0 – 1 500 mg/l méréstartomány esetén), vagy az oxidáció során a kálium-dikromát redukciójából keletkező króm(III)-ionok (0-150 mg/l méréstartomány esetén) abszorbanciáját spektrofotométerrel mérjük 620 illetve 440 nm hullámhosszon.

Ammónium-N meghatározás

A mérést az MSZ ISO 7150-1 szabvány szerint végeztem. Az ammónium nátrium-nitrozo-pentaciano-ferrát (nitroprussid-nátrium) jelenlétében szalicilát és hipokloritonnal reagál. A keletkező kék színű vegyület abszorbanciáját spektrofotométeren, 655 nm-en mérjük.

Ortofoszfát-P meghatározás

Vizsgálatát az MSZ EN 1189:1998 szabványon alapuló módszerrel végeztem. Az ortofoszfátionok savas oldatban molibdenát- és antimonionok jelenlétében antimon-foszfomolibdenát komplexet képeznek. A komplexet aszkorbinsavval redukálva erősen színes

molibdénkéék komplex keletkezik. E komplex extinkciójának mérésével határozzuk meg a jelenlévő ortofoszfát koncentrációját.

Összes P meghatározás

MSZ EN 1189:1998 szabványon alapuló mérési módszerrel végeztem a meghatározását. Az összes P meghatározás egy roncsolást követően megegyezik az ortofoszfát-P mérés menetével.

Nitrát-N meghatározás

A mérését az MSZ 260/11-71 szabványon alapuló mérési módszerrel végeztem. A meghatározás alapja a nitrátok reakciója nátrium-szaliciláttal forró tömény kénsavas közegben. A kénsav hatására a keletkező salétromsav és nátrium-szalicilát reakciója során nitroszármazék keletkezik. A reakció során a nitroszármazék nátriumsójának oldata lúgos közegben sárga színű. A színintenzitást – amely arányos a nitrát koncentrációval – fotométerrel mérjük.

Nitrit-N meghatározás

Az MSZ 260/10-71 szabvány szerint határoztam meg. Savas közegben a nitrition diazotálja a szulfanil-amidot. A keletkező diazóniumsó N-(1-naftil)- etilén-diaminnal (NAD) piros azoszínezékké kapcsolódik. Az oldat színintenzitása – meghatározott pH értéken – arányos a nitrition koncentrációjával.

Összes N meghatározás

A TN mérést Macherey-Nagel gyártású NANOCOLOR total-Nitrogen TNb 220 küvetta tesztel végeztem. Mérési tartománya 5 - 220 mg/l.

1. beállítás tapasztalatai

A cikluson belüli biológiai szakaszok hosszát az 2. táblázatban található medence térfogatok arányai alapján határoztuk meg. Kb. 1 órát mindenképpen az ülepedésre kell fordítani, emellett a vezérlés ciklikus indítása miatt egy fél perces szakaszt állítottunk be az elvétel után, mely a kijelzőn szereplő információk léptetéséhez szükséges, így a maradék 7 órával lehetett gazdálkodni. Az anaerob körülményeket úgy próbáltam létrehozni, hogy a befolyó szennyvizet a szivattyú az iszapfázis alá juttassa be, a keverő berendezés működtetése nélkül. Ezzel a tisztítandó szennyvíz nem kever bele a levegőből oxigént az iszapba, ami az ott uralkodó anaerob körülményeket felborítaná.

Az 1. beállítás ciklusának a részletes levezetése az 4. táblázatban látható. Tartalmazza, hogy melyik ciklus szakasz milyen időpontban kezdődik, meddig tart, milyen folyamat játszódik le alatta és hogy közben milyen berendezést üzemeltet a program. A táblázatban az „X” azon helyen szerepel, ahol a berendezés üzemel, ahol nem, ott „Ø” van.

4. táblázat: A labor SBR reaktor ciklus beállítása

1. beállítás	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Üzemidő	45 perc	5 perc	1 óra 44 perc	4 óra 26 perc	50 perc	9 perc 30 m.perc	30 m.perc
1. ciklus	9:00	9:45	9:50	11:34	16:00	16:50	16:59
2. ciklus	17:00	17:45	17:50	19:34	0:00	0:50	0:59
3. ciklus	1:00	1:45	1:50	3:34	8:00	8:50	8:59
szivattyú	X	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø
keverő	Ø	X	X	Ø	Ø	Ø	Ø
levegőztető	Ø	Ø	Ø	X	Ø	Ø	Ø
szivattyú	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	X	Ø
Folyamat	Feladás	Reakc.	Reakc.	Reakc.	Ülepítés	Elvét	Szünet
	Anaerob		Anoxikus	Oxikus			

Az 1. beállítással a reaktort több hónapon át működtettük. A heti rendszerességű mérések mellett sok adatot gyűjtöttem, ezért az eredmények átlag, minimum és maximum értékeit összesítettem az 5. táblázatban. A KOI a víz szervesanyag tartalmáról ad információt. Az ammónium, nitrit és nitrát tartalom a nitrifikálás és denitrifikálás hatékonyságáról tájékoztat,

míg az OP és TP a többletfoszfor eltávolításról. A TN pedig, a már említett nitrogénformák ismeretében az összes nitrogén mennyiségéről tájékoztat.

5. táblázat: Labor befolyó (egyben veszprémi befolyó), labor elfolyó és veszprémi elfolyó paramétereinek az átlaga, minimuma és maximuma (mg/l)

Labor befolyó								
1. beállítás	pH [-]	KOI	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
Átlag:	8,0	699	49,04	0,11	0,39	5,36	8,55	59
min	7,6	368	18,13	0,00	0,04	1,31	3,82	31
max	8,4	953	73,13	0,37	0,83	8,51	12,86	88
Labor elfolyó								
1. beállítás	pH [-]	KOI	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
Átlag:	8,1	31	0,04	0,02	19,95	6,01	6,43	24
min	7,1	13	0,00	0,00	12,85	4,70	5,11	13
max	8,5	51	0,09	0,08	33,94	7,75	8,01	37
Veszprémi telep elfolyó								
1. beállítás	pH [-]	KOI	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
Átlag:	7,1	50	0,10	0,10	7,47	0,76	1,14	9
min	7,1	34	0,05	0,05	6,04	0,01	0,14	9
max	7,2	59	0,17	0,13	8,58	2,10	2,90	10

A labor befolyó és elfolyó adataiból látható, hogy a pH esetében nincsen mértékadó változás. A kémiai oxigénigény lényegesen lecsökkent, vagyis a tápanyagként felhasználták a mikroorganizmusok a biológiailag bomtható szennyezőket. Az NH₄-N, NO₂-N és NO₃-N adatokból levonható, hogy az oxikus szakaszban a nitrifikáció jó hatásokkal ment végbe. Ha a levegőztetés nem lenne megfelelő, akkor magasabb NO₂-N és alacsonyabb NO₃-N tartalommal rendelkezne az elfolyó víz, valamint az NH₄-N sem tudna elfogyni.

OP és TP esetében már közel nem ilyen jók az eredmények. Látszik, hogy nem változott egyik értéke sem érdemi mértékben. Ez valószínűleg annak tudható be, hogy a reaktorban a ciklusok során nem alakultak ki anaerob körülmények. Következménye pedig, hogy nem történt meg a biológiai többletfoszfor eltávolítás. Ez szoros összefüggésben van a tisztított vízben mérhető magas nitrát koncentrációval, mivel anaerob körülmények kialakulásához elsőként a nitrát denitrifikációjának kellene megtörténnie a szennyvíz feladást követően.

TN értékekből is látszik, hogy az elfolyóban marad nitrogén, de ez magyarázható azzal, hogy a levegőztetéskor a nitrifikáció során keletkező nitrát a tisztított vízben maradt, hiszen a labor elfolyó esetében a TN-nek 83 %-át nitrát-N teszi ki.

Az egyes komponensek eltávolításának hatékonyságát a 6. táblázatban lehet látni. A nitrát-N-re és nitrit-N-re vonatkozó eltávolítási hatékonyságok nincsenek feltüntetve, mivel a befolyó szennyvízben a csatornarendszerekben lejátszódó biológiai folyamatoknak köszönhetően alacsony lesz a koncentrációjuk. A biológiai szennyvíztisztítás során viszont a levegőztetés hatására a víz ammónia-N tartalma nitrifikálódik, ezzel az elfolyó víznek a nitrát tartalma többszöröse lesz a befolyó szennyvizéhez képest megfelelő denitrifikáció mellett is.

6. táblázat: Az SBR és telepi rendszerek eltávolítási hatékonysága egyes komponensekre.

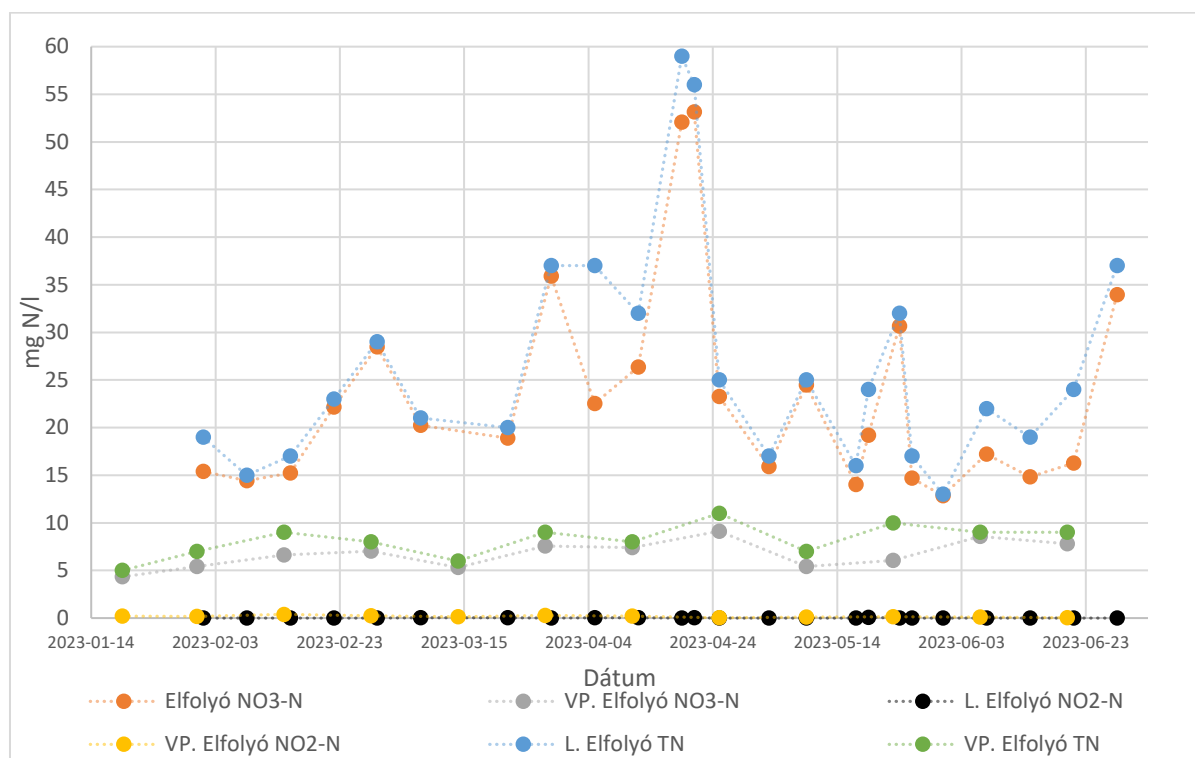
Labor elfolyó					
1. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	95,57	99,92	-12,13	24,80	59,32
Telepi elfolyó					
1. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	92,85	99,80	85,82	86,67	84,75

A KOI és NH₄-N eltávolítás hatékonyság közel megegyező, viszont a többi paraméter esetében lényeges különbségek találhatók. Az OP eltávolítási hatékonyság negatívban, míg a TP pozitívban van a labor SBR rendszer elfolyó alapján, mivel maradt nitrát az iszapban, ezért többletfoszfor eltávolítás sem hatékony. Ennek eredményeképpen a TP eltávolítás is jóval alacsonyabb mértékben sikerült a telepihez képest. Az összes nitrogén esetében is a telep lényegesen jobban teljesített, mint a laboratóriumi reaktor, melynek fő oka a telepi denitrifikáció magasabb hatásfoka. Ez a visszamaradó nitrát fogja a TN nagy %-át kitenni, mivel az ammónia mind az SBR, mind a telepi rendszer esetében majdnem teljes eltávolításra került. A nitrát mellett még egyéb visszamaradt szerves nitrogén formák adják a TN értékét.

A labor elfolyót a veszprémi telep elfolyó adataival összehasonlítva is vannak lényeges különbségek. A labor elfolyó esetében a nitrit és az ammónium mennyisége a veszprémihez képest alacsonyabb, a határértékek miatt elhanyagolható a különbség.

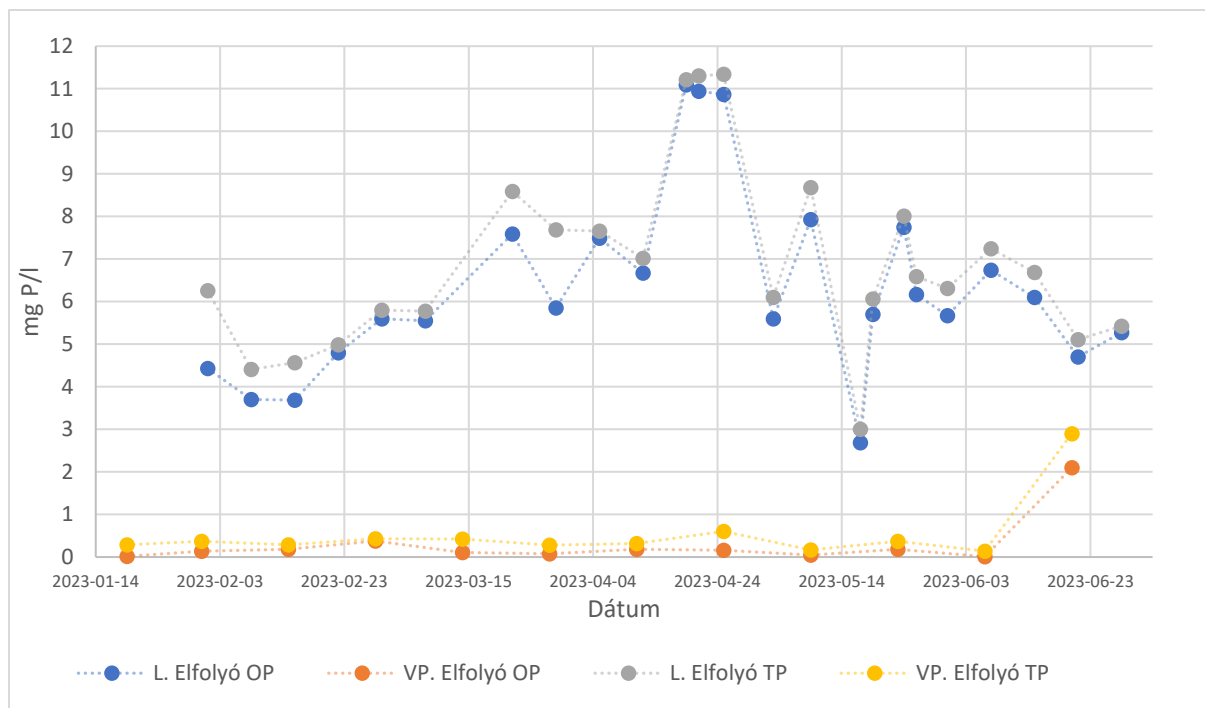
Nitrát tartalma azonban lényegesen magasabb a laboratóriumi berendezésnél. (8. ábra) A veszprémi telepen a kiskörös (belső) recirkuláció segítségével oldják meg az elődenitrifikációt, mellyel az aerob medencéből recirkuláltatják az iszapos vizet az anoxikus medence elejére, ezzel növelve a denitrifikálás hatékonyságát és csökkentve a kifolyó víz nitrát tartalmát. A laboratóriumi reaktorban az elődenitrifikáció időben előzi meg az oxikus szakaszt, azonban ennek hatékonyságát alapvetően meghatározza a nyers szennyvíz KOI/TKN aránya, azaz, hogy elegendő-e a szerves anyag a megfelelő hatékonyságú denitrifikációhoz. Az 5. táblázat befolyó KOI értékeit nézve a minimum (368 mg/l) és maximum érték (953 mg/l) között lényeges különbség látható. Ez azt mutatja, hogy a kétheti gyakoriságú nyers szennyvíz mintavételek

alkalmával sok esetben mintáztunk az átlagosnál jóval hígabb, alacsonyabb szerves anyag tartalmú szennyvizet. Ez pedig elégtelen denitrifikációt okozott, mivel nem állt rendelkezésre elég szerves anyag. A TN-beli eltérés is ennek a következménye.



8. ábra Labor és a telepi elfolyó N formáinak összehasonlítása

A másik nagy különbség az összes foszfor és ortofoszfát (9. ábra) esetében van. Mivel a labor SBR reaktorban nem alakultak ki anaerob körülmények ezen beállítások mellett, így a biológiai foszfor eltávolítás nem volt lehetséges. Ez a nagyüzem esetében viszont az anaerob medence megfelelő működése mellett megtörténik. Egy esetben volt mérhető a szennyvíztisztító telepi tisztított vízben magasabb foszforkoncentráció, azonban ez is biztonsággal határértéken belül maradt.



9. ábra Labor és a telepi elfolyó P formáinak összehasonlítása

Cikluson belüli mérési eredmények értékelése

Az egyes lejátszódó folyamatoknak követése érdekében egy ciklusmérésen belül feltártam az egyes komponensek koncentrációjának a változását annak érdekében, hogy bizonyos felmerülő kérdésekre választ kapjunk. Az adott kérdésekhez vonatkozó megállapítások összefoglalása a 7. táblázatban található. Kíváncsi voltam, hogy:

- A denitrifikációhoz elegendő KOI megy-e fel a betáplált szennyvízzel?
- Elfogy-e anoxikus szakasz végére a nitrát?
- Kialakulnak-e anaerob körülmények az iszapban a szennyvízfeladást megelőzően?
- Amennyiben nem a szerves tápanyag, hanem az idő kevés az anoxikus folyamatok lejátszódásához, úgy növelhető-e az anoxikus időszak az oxikus idő terhére?

7. táblázat Lehetséges beállítási módosítások felderítése érdekében vizsgált üzemállapotok cikluson belül

Vizsgálandó üzemállapotok	Mérendő paraméter	Érték	Megállapítás
Kialakul-e anaerob folyamat az iszaprétegben feladás előtt? Csökken-e a nitrát koncentráció az iszapban az ülepedés ideje alatt?	NO ₃ -N ülepítés végén alsó iszaprétegben	16,66 mg/l	Kismértékű csökkenés történik (~1 mg/l), azonban ez nem elegendő az anaerob körülmények kialakulásához.
	NO ₃ -N ülepítés végén a felső tiszta fázisban	17,74 mg/l	
	NO ₃ -N ülepítés közvetlenül feladás előtt összekeverve	16,69 mg/l	
A denitrifikációhoz elegendő KOI megy-e fel a betáplált szennyvízzel?	Aktuálisan feladott szennyvíz KOI	368 mg/l	A reaktor 3 liter alaptérfogatában 3 l*16,69 mg/l= 50,07 mg NO ₃ -N van a feladás kezdetekor. A denitrifikáció szerves anyag szükséglete 4,3 kg KOI/kg NO ₃ -N [5], így kb. 50,07 mg*4,3mgKOI/mgNO ₃ -N = 215,30 mg KOI-ra lenne szükség. Ehhez adódna még hozzá a foszforeltávolítás szerves anyag igénye. A feladott szennyvízzel 368 mg KOI/l*0,82 l = 301,76 mg megy fel. Az anoxikus időszak végén 92 mg/l KOI marad, ami 92 mg/l*3,82 l = 351,44 mg KOI, mely alapján úgy tűnik, sem a foszforleadáshoz, sem a denitrifikációhoz nem történt szerves anyag hasznosítás.
	Aktuálisan feladott szennyvíz térfogata	820 ml	
	NO ₃ -N ülepítés közvetlenül feladás előtt összekeverve	16,69 mg/l	
	Anoxikus időszak végi KOI	92 mg/l	

Vizsgálandó üzemállapotok	Mérendő paraméter	Érték	Megállapítás
Oxikus idő terhére növelhető-e az anoxikus idő hossza?	Anoxikus vége NH ₄ -N	9,19 mg/l	A cikluson belüli oxikus időszak hosszabb, mint 4 óra, melyből a 2. óra végére teljesen lezajlik a nitrifikáció (átlagos NH ₄ -N szennyezettségű nyers szennyvíz esetén), mivel mind az NH ₄ -N, mind a NO ₂ -N elfogy. Azaz az anoxikus időszak hossza szükség esetén probléma nélkül növelhető az oxikus időszak terhére.
	Anoxikus vége NO ₂ -N	0,71 mg/l	
	Oxikus 1. óra vége NH ₄ -N	1,68 mg/l	
	Oxikus 1. óra vége NO ₂ -N	0,22 mg/l	
	Oxikus 2. óra vége NH ₄ -N	0,08 mg/l	
	Oxikus 2. óra vége NO ₂ -N	0,00 mg/l	

Az ciklus mérés alátámasztja, hogy lokális anaerob körülményeknek nem sikerült kialakulnia a reaktoron belül. A feladás során a magas nitrát tartalom akadályozta az oxigénhiányos környezet létrejöttét. Ennek hiánya korrelációban van a kapott OP koncentrációkkal. Emellett az iszappal érkező nitrát tartalom teljes eltávolítása sem történt meg az anoxikus szakasz végéig, mivel nem volt elegendő felhasználható KOI a feladott szennyvízzel. A cikluson belüli oxikus időszak hosszabb, mint 4 óra, melyből a 2. óra végére teljesen lezajlik a nitrifikáció (átlagos NH₄-N szennyezettségű nyers szennyvíz esetén), így az anoxikus időszak hossza szükség esetén probléma nélkül növelhető az oxikus időszak terhére.

2. beállítás tapasztalatai

Az előző beállítás tapasztalatai alapján megváltoztattam a befolyó szennyvíz betáplálási módját. Mivel marad a reaktorban nitrát, így nem tudnak létrejönni anaerob körülmények. Annak érdekében, hogy mégis kialakuljon, rövid betáplálás mellett működtettem a keverőt, ezzel növelve a nitrát denitrifikálásának a hatékonyságát. A 8. táblázatban láthatók az új beállítások, melyben a vezérlés módosításait sárga kiemeléssel jelöltem.

8. táblázat: A labor SBR reaktor ciklus 2. beállítása

2. Beállítás	1.	3.	4.	5.	6.	7.
Üzemidő	10 perc	2 óra 24 perc	4 óra 26 perc	50 perc	9 perc 30 m.perc	30 m.perc
1. ciklus	9:02	9:12	11:36	16:02	16:52	17:01
2. ciklus	17:02	17:12	19:36	0:02	0:52	1:01
3. ciklus	1:02	1:12	3:36	8:02	8:52	9:01
szivattyú	X	∅	∅	∅	∅	∅
keverő	X	X	∅	∅	∅	∅
levegőztető	∅	∅	X	∅	∅	∅
szivattyú	∅	∅	∅	∅	X	∅
Folyamat	Betáp	Anoxikus/ Anaerob	Oxikus	Ülepítés	Elvét	Szünet

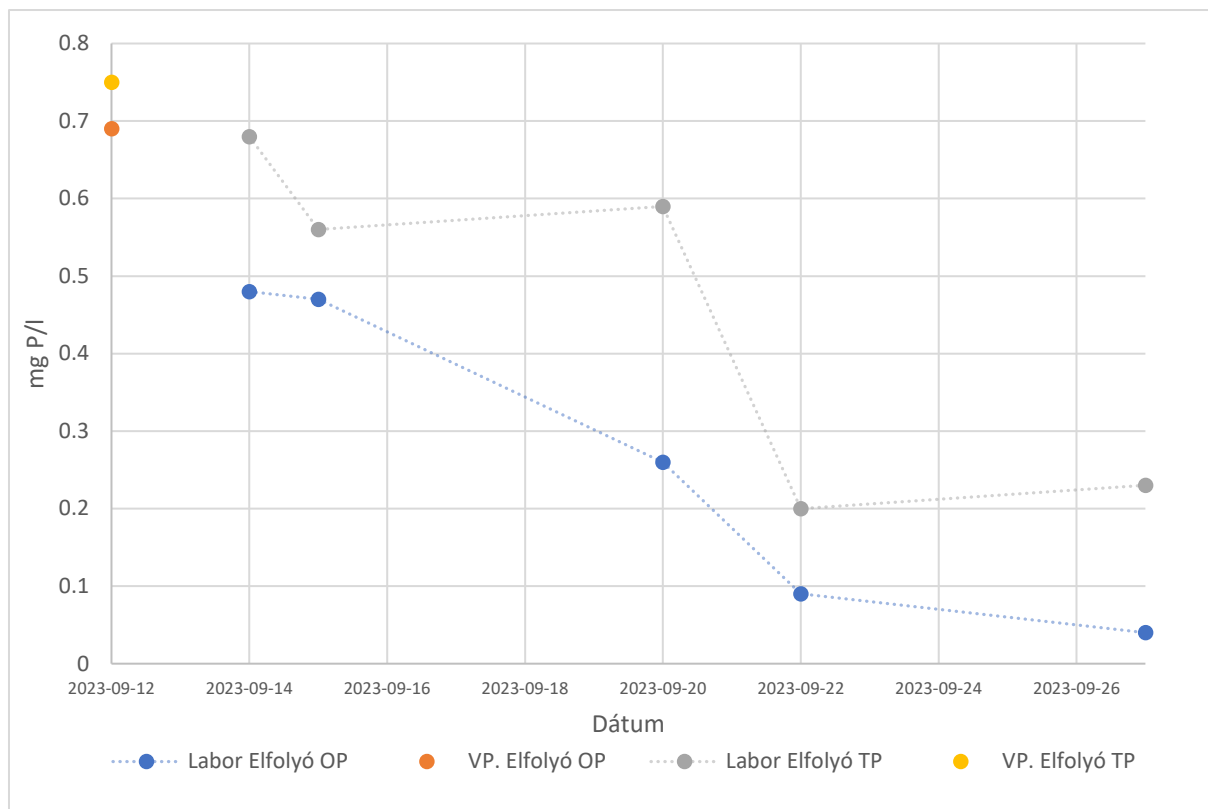
A 2. beállítást 2 héten keresztül működtettem. A befolyó és veszprémi elfolyó paramétereit a mintavételt követően határoztam meg. A labor elfolyó paramétereiket pedig hetente kétszer vizsgáltam. A mérési eredményeket a 9. táblázat tartalmazza. Az SBR elfolyó víz OP és TP koncentrációja töredéke az 1. beállítás elfolyójához képest. Emellett az átlagos nitrát-N koncentráció is mintegy felére csökkent az előző beállításhoz képest.

9. táblázat: 2. beállítás eredményei (mg/l)

2. beállítás	Labor befolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.12	-	694	22,03	0,00	0,29	6,40	8,49	48
2. beállítás	Labor elfolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.14	-	12	0,15	0,00	8,45	0,48	0,68	9
2023.09.15	-	11	0,04	0,00	9,39	0,47	0,56	13
2023.09.20	8,1	24	0,00	0,01	9,33	0,26	0,59	18
2023.09.22	8,0	24	0,18	0,12	9,27	0,09	0,20	11
2023.09.27	8	44	0,00	1,48	21,28*	0,04	0,23	24*
Átlag	8,0	23	0,07	0,32	9,11	0,27	0,45	15
2. beállítás	Veszprémi telep elfolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.12	-	17	0,20	0,00	5,00	0,69	0,75	7

* átlagszámítás során nem került figyelembevételre

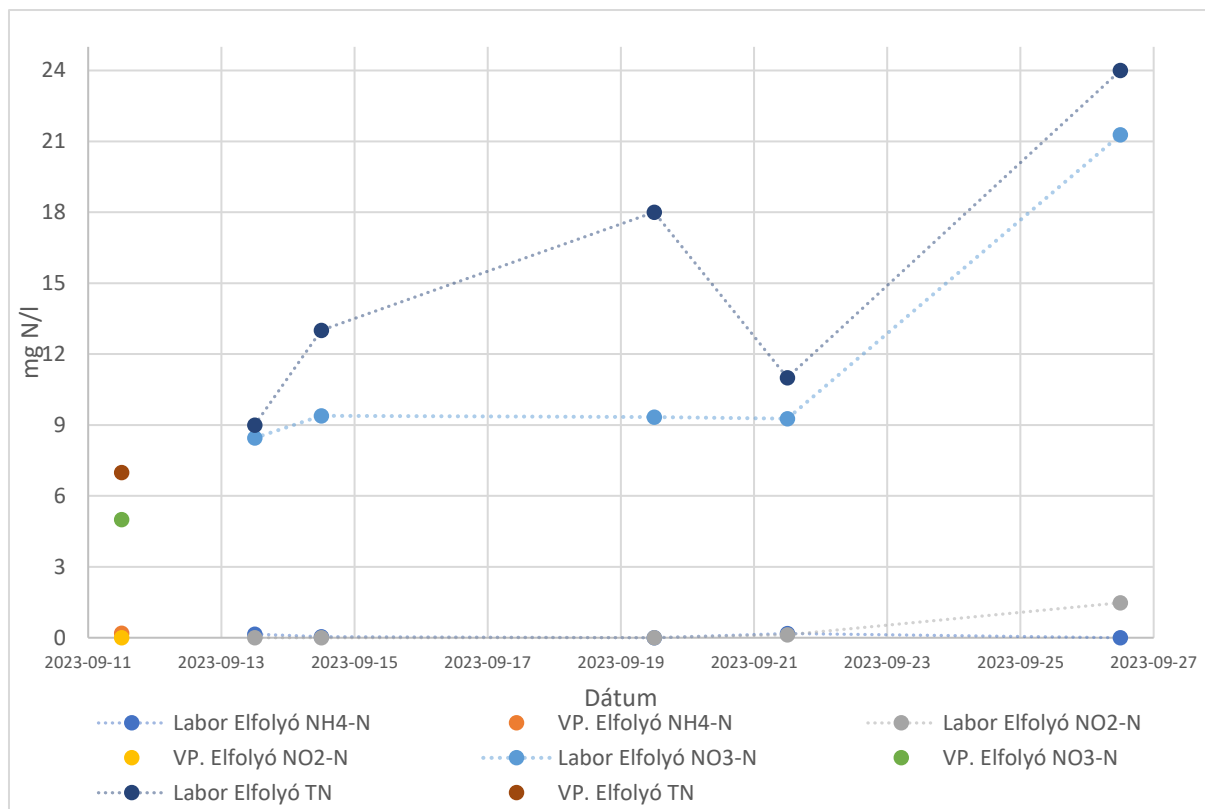
A mérési eredmények alapján látható, hogy a foszfor eltávolítás sikeresen végbemegy (10. ábra), tehát sikerült anaerob körülményeknek kialakulniuk a reaktorban a ciklus elején.



10. ábra Labor és a telepi elfolyó P formáinak összehasonlítása

A 2. beállításnak köszönhetően megtörtént az iszap foszfor leadása, ideiglenesen növelve a szennyvíz ortofoszfát tartalmát. A víz ortofoszfát tartalmát levegőztetés során újra felveszi, az addigra nagyobb tömegű iszap, ezzel a biológiai többletfoszfor eltávolítást elérve. Emellett a többi paraméter is kiváló mértékben került eltávolításra, a nitrát kivételével.

Ezzel szemben a nitrát tartalom lényegesen magasabb, mint a beérkező és veszprémi elfolyó szennyvízben (11. ábra), akárcsak az 1. beállítás esetén (8. ábra). A diagram alapján látható, hogy a labor elfolyó TN tartalma korrelációban van a magas $\text{NO}_3\text{-N}$ koncentrációval. A 9. táblázatban a 09.27.-én mért nitrát és TN kiugrásra (*-gal jelölt értékek) nem találtam magyarázatot, ezért az átlagképzés során nem vettem számításba.



11. ábra Labor és a telepi elfolyó N formáinak összehasonlítása

A laboratóriumi reaktorban az elődenitrifikáció időben előzi meg az oxikus szakaszt, melynek hatékonyságát meghatározza a nyers szennyvíz KOI/TKN aránya. A 2. beállítás esetében a denitrifikáció teljesen lejártsódott, ami látszik mind az alacsony elfolyó nitrát-N tartalomból és a sikeres többletfoszfor eltávolításból. A telepen a levegőztető medencében alacsonyabb DO értéket céloznak meg ami még elegendő a teljes nitrifikációra. Ez a további denitrifikáció lejártsódását is lehetővé teszi szimultán módon és lokálisan, aminek eredményeképpen a N eltávolítás hatékonysága is jobb. Az eltávolítási hatékonyságok a 10. táblázatban találhatók. A labor és telepi ammónia-N eltávolítás 99,69% és 99,10%, míg a TN eltávolítás 68,75% és 85,42%. A telepi összes nitrogén eltávolítás nagyobb hatékonysággal ment végbe, feltehetően a kis recirk. miatt. Az OP és TP eltávolítási hatások egymást közelítik, de az SBR technológia jobb eredményeket mutat. KOI tekintetében pedig lényegében ugyanazt a hatékonyságot érte el mind a kettő rendszer.

10. táblázat: 2. beállítás és a telep eltávolítási hatékonysága egyes komponensekre.

Labor elfolyó					
2. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	96,69	99,69	95,78	94,70	68,75
Telepi elfolyó					
2. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	97,55	99,10	89,22	91,17	85,42

Cikluson belüli mérési eredmények értékelése

Az egyes lejátszódó folyamatoknak követése érdekében egy ciklusmérésen belül feltártam az egyes komponensek koncentrációjának a változását annak érdekében, hogy egyes kérdésekre választ kapjak. Az adott kérdésekhez vonatkozó megállapítások összefoglalása a 11. táblázatban található. Kíváncsi voltam, hogy:

- A szennyvíz betáplálás végén a reaktorban mennyi a nitrát viszonyítva a tisztított szennyvízben lévőhöz?
- Az anoxikus időszak végén a reaktorban van-e nitrát, és megnőtt-e az OP koncentráció? Kialakultak-e a foszforleadáshoz szükséges anaerob körülmények?

11. táblázat: Lehetséges beállítási módosítások felderítése érdekében vizsgált üzemállapotok cikluson belül

Vizsgálandó üzemállapotok	Mérendő paraméter	Érték	Megállapítás
A szennyvíz feladás végén marad-e nitrát a reaktorban?	Előző ciklus tisztított szennyvíz NO ₃ -N	7,41 mg/l	Minimális, ez alapján elképzelhető, hogy a denitrifikáció olyan nagy sebességgel megy végbe, hogy már a szennyvíz betáplálás végére elfogy a nitrát a reaktorból.
	Feladás vége NO ₃ -N	0,21 mg/l	
Alakulnak-e ki anaerob körülmények az anoxikus szakasz végére, anoxikus szakasz végére elfogy-e a nitrát?	Anoxikus időszak vége NO ₃ -N	0 mg/l	Igen
Az anoxikus szakasz végére megnő-e az OP koncentráció, ami a biológiai többletfoszfor eltávolítást foszforleadási ciklusát támasztja alá?	Előző ciklus tisztított szennyvíz OP	0 mg/l	Igen
	Feladás vége OP	3,16 mg/l	
	Anoxikus időszak vége OP	11,35 mg/l	

A vizsgálat során megbizonyosodtam arról, hogy elegendő szerves anyag jelenlétében a denitrifikáció teljesen végbemegy, ezzel anaerob körülményeket kialakítva a reaktorban az anoxikus szakasz közben. Ebből adódóan a többletfoszfor eltávolítás első lépése bekövetkezik,

vagyis a PAH-ok a könnyen felvehető tápanyagok felvétele közben depolimerizálják és leadják a sejtszinten elraktározott foszfort, ami növeli a szennyvíz OP tartalmát.

3. beállítás tapasztalatai

A 2. beállítással sikerült a biológiai többletfoszfor eltávolítást elérni. A 3. beállítás során kipróbáltam, hogy a többletfoszfor eltávolítás hatékonysága növelhető-e, ha a betáplálást két részletben adom fel a reaktorra. Az első felét a ciklus kezdetén, másodikat az anaerob-anoxikus szakasz közepén adta fel a vezérlés. A programban történt változtatásokat a 12. táblázatban sárga jelöléssel feltüntettem.

12. táblázat: A labor SBR reaktor ciklus 3. beállítása

3. Beállítás	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Üzemidő	5 perc	1 óra 10 perc	5 perc	1 óra 15 perc	4 óra 25 perc	50 perc	10 perc
1. ciklus	8:00	8:05	9:15	9:20	10:35	15:00	15:50
2. ciklus	16:00	16:05	17:15	17:20	18:35	23:00	23:50
3. ciklus	0:00	0:05	1:15	1:20	2:35	7:00	7:50
szivattyú	X	∅	X	∅	∅	∅	∅
keverő	X	X	X	X	∅	∅	∅
levegőztető	∅	∅	∅	∅	X	∅	∅
szivattyú	∅	∅	∅	∅	∅	∅	X
Folyamat	Betáp	Anoxikus/ Anaerob	Betáp	Anoxikus/ Anaerob	Oxikus	Ülepítés	Elvét

A 3. beállítást is 2 héten keresztül működtettem. A befolyó és veszprémi elfolyó paramétereit a mintavételt követően határoztam meg. A labor elfolyó paramétereiket pedig hetente kétszer vizsgáltam. A mérési eredményeket a 13. táblázat tartalmazza. Az átlagok alapján látható, hogy lényegesen rosszabbul teljesített a 3. beállítás az előzőhöz képest.

13. táblázat: 3. beállítás eredményei (mg/l)

3. beállítás	Labor befolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.26	7,51	485	10,47	0,00	0,12	6,04	8,09	20
3. beállítás	Labor elfolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.28	8,35	26	0	0,00	10,7	0,07	0,24	11
2023.09.29	8,4	33	0	0,00	11,62	0,13	0,3	13
2023.10.02	8,45	33	0	0,01	17,2	0,61	0,77	17
2023.10.05	8,245	21	0	0,01	28,28	2,46	2,82	32
2023.10.06	8,4	23	0,01	0,00	30,07	3,76	4,03	32
2023.10.09	8,24	18	0	0,00	32,11	4,74	4,99	34
Átlag	8,4	25,67	0,00	0,00	21,66	1,96	2,19	23,17
3. beállítás	Veszprémi telep elfolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.09.26	7,37	27	0,00	0,01	5,00	0,04	0,15	7

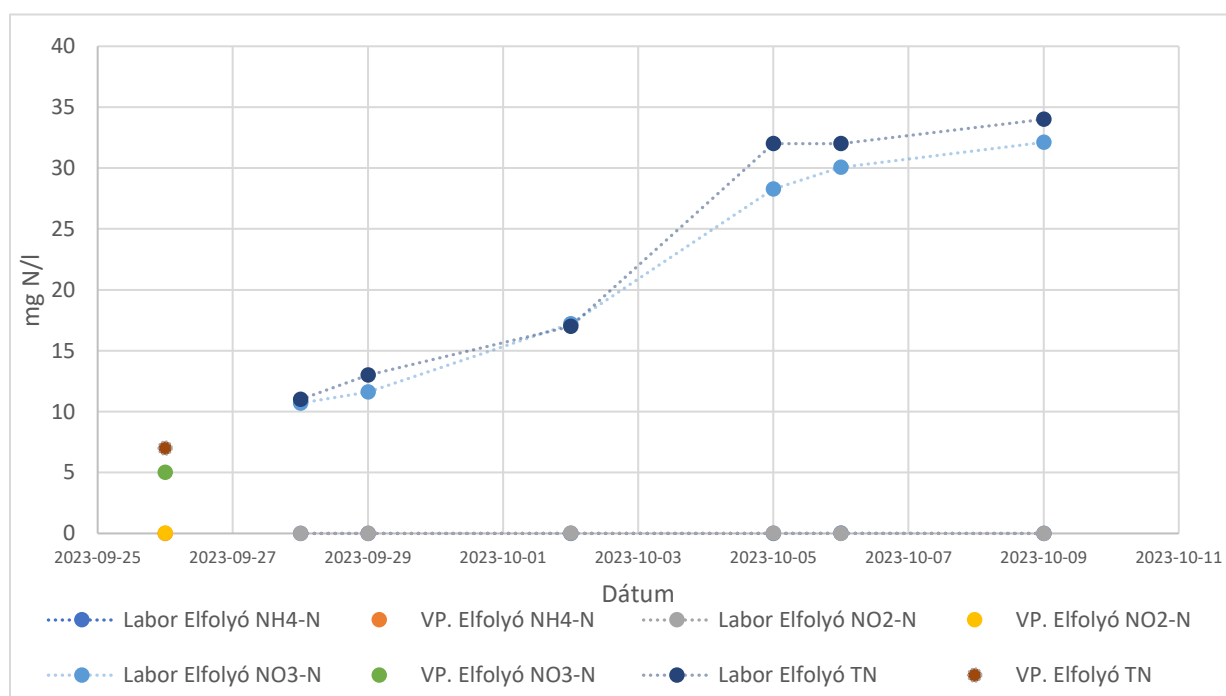
Az eredményekből látható, hogy bár az első kettő mérési eredmény megfelelő, mind a többletfoszfor és a nitrogénformák mennyisége romló tendenciát mutat az idő teltével. Ennek az oka nem a programváltoztatás, hanem az új veszprémi befolyó víz, amit a labor SBR-re feladtam. Az előző két beállítás esetén a befolyó szennyvíz KOI-ja 700 mg/l magasságban volt. A 3. beállítás első kettő elfolyó (09.28 és 09.29.) eredményeit a 2. beállítás során feladott szennyvízzel hozta a reaktor. Az új (09.26.-án vett) befolyó szennyvizet csak 09.29.-én az elfolyó mérését követően használtuk befolyó vízként. Ennek viszont kb. 200 mg/l-el alacsonyabb a KOI-ja. A befolyó minőségbeli romlásának következtében nem maradt elég tápanyag a denitrifikáláshoz, mely az elfolyó tisztított víz nitrát tartalmának feldúsulásához vezetett.

A már tárgyalt okokból a nitrogénformák eltávolítása lényegesen rosszabbul sikerült, mint a veszprémi telepnek. Az összehasonlítást szemlélteti a 12. ábra. A labor elfolyó TN és a NO₃-N tartalom közelségéből is látszik, hogy a nitrifikálás jó hatásfokkal (14. táblázat) ment végbe, minimális nitrogén maradt szerves formában. Mivel azonban a denitrifikáció nem ment végbe kellő hatásfokkal, ezért az összes nitrogén koncentráció is megnőtt. A táblázatban ez látható a negatív eltávolítási hatásfokból.

14. táblázat: 3. beállítás és a telep eltávolítási hatékonysága egyes komponensekre.

Labor elfolyó					
3. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	94,71	99,99	67,55	72,93	-15,85
Telepi elfolyó					
3. beállítás	KOI	NH ₄ -N	OP	TP	TN
Eltávolítás (%)	94,43	100	99,34	98,15	65

Hasonlóképpen romló tendenciát mutatnak a foszforformák paramétereit. A veszprémi és labor elfolyó foszfor értékeit a 13. ábra szemlélteti. Mivel az elfolyónak idővel nőtt a nitrát tartalma annak a teljes denitrifikációjának hiányában, így a visszamaradt és újból felhasznált iszapban is magasabb lesz a koncentrációja. Ha az előző ciklus során nem volt elég tápanyag a teljes denitrifikáláshoz, akkor a még magasabb nitrát tartalomhoz sem elég. Ebből adódóan a betáppal érkező KOI egyre nagyobb része fog a denitrifikálásra felhasználódni minden egyes eltelt ciklust követően, ezért a PAH mikroorganizmusoknak is egyre kevesebb tápanyag marad a többletfoszfor eltávolításhoz. Eredményként mind a nitrát és foszfor eltávolítás romló tendenciát mutat.



12. ábra Labor és a telepi elfolyó N formáinak összehasonlítása

Ha 4,3 g KOI kell 1 g NO₃-N denitrifikálásához [5], akkor az elfolyó víz nitrát tartalmának ismeretében kiszámítható a következő ciklus denitrifikációs KOI igénye. A 10.02.-én mért elfolyó nitrát-N koncentrációt (17,2 mg/l) felszorozva a reaktor térfogatával (3 l) és a

KOI/NO₃-N fajlagossal 222 mg KOI/l-t kapunk. Ez lesz a KOI szerves anyag szükséglet a következő ciklus denitrifikációjához, amit, ha kivonunk a befolyó KOI értékéből (485 mg KOI/l*0,823 l/ciklus = 399 mg KOI), megkapjuk mennyi tápanyag marad a PAH mikroorganizmusoknak a denitrifikáció után a foszfor eltávolításhoz. A levezetett számolás szerint kiszámoltam a KOI igény mindegyik mért ciklusra, ennek az eredményeit a 15. táblázatban tüntettem fel.

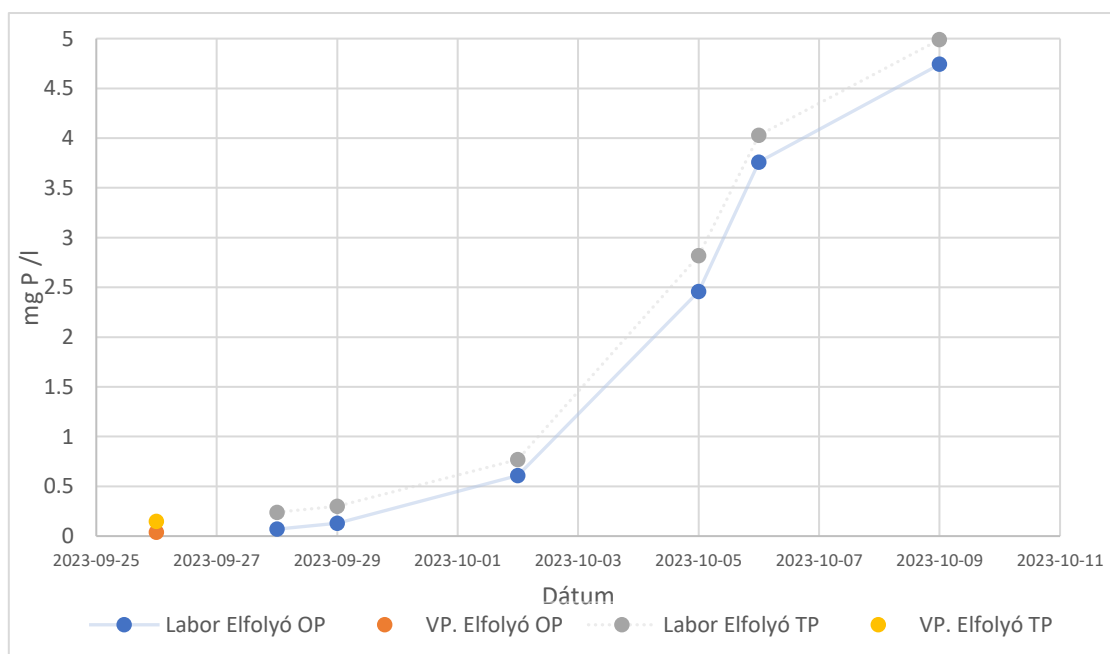
15. táblázat: Tápanyag igény becslése

Dátum	mg KOI szükséglet denitrifikációhoz	P eltávolításra maradó mg KOI
2023.10.02	222	177
2023.10.05	365	35
2023.10.06-09*	388	11
2023.10.09	414	-15

* hétvégi átlagminta vizsgálata

A számolás nem pontos, a valós állapotok megközelítésére elegendő. A 15. táblázat és a 13. táblázat adatainak az összehasonlításakor látható, hogy a 10.02.-én kapott eredmények alapján még marad tápanyag a foszfor eltávolításhoz, ami az elfolyó adataiból is látszik, azonban a következő mérés esetén már nem.

A tápanyag hiány miatt a denitrifikáció nem ment végbe, így anaerob körülmények sem tudtak kialakulni. Biológiai többletfoszfor eltávolítást az SBR rendszer nem tudott elérni, ezen feltételek mellett. Az eredményeket és a romló tendenciát a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra Labor és a telepi elfolyó P formáinak összehasonlítása

Cikluson belüli mérési eredmények értékelése

Az eddigi ciklusmérésekhez hasonlóan itt is a lejátszódó folyamatoknak követése érdekében vizsgáltam az egyes komponensek koncentrációjának a változását annak érdekében, hogy bizonyos kérdésekre választ kapjak. Az adott kérdésekhez vonatkozó megállapítások összefoglalása a 16. táblázatban található.

16. táblázat *Lehetséges beállítási módosítások felderítése érdekében vizsgált üzemállapotok cikluson belül*

Vizsgálandó üzemállapotok	Mérendő paraméter	Érték	Megállapítás
2. betáplálás végére marad-e nitrát a reaktorban?	2. betáplálás vége NO ₃ -N	13,77 mg/l	Igen
Alakulnak-e ki anaerob körülmények a 2. anoxikus szakasz végére?	2. anoxikus időszak vége NO ₃ -N	11,22 mg/l	Nem
Az anaerob/anoxikus szakasz végére megnő-e az OP koncentráció az előző ciklus végén mérhetőhöz képest?	Előző ciklus tisztított víz OP	4,81 mg/l	Nem
	Anoxikus vége OP	4,48 mg/l	

A reaktorban a tápanyaghiány miatt nem ment végbe a denitrifikáció, a 2. betáplálás végén a KOI 20 - 30 mg/l között mozgott, míg nitrát még bőven volt a szennyvízben. Ennek következménye, hogy anaerob körülmények nem tudtak kialakulni, ami biztosította volna az OP koncentráció növekedését a szakasz végéig.

Visszatérés a 2. beállításhoz

A 3. beállítás az eredmények kiértékelése alapján a befolyó szennyvíz alacsony KOI tartalma miatt nem volt képes anaerob körülmények létrehozására, így többletfoszfor eltávolításra sem. Szerettem volna ezt a feltevésemet még egy irányból igazolni, ezért a kisebb szerves anyag tartalommal bíró nyers szennyvízzel egy mérési pont erejéig visszatértem a 2. beállításhoz. A 3. beállítás utolsó mérési eredménye és az ismételt 2. beállítás elfolyó eredménye a 17. táblázatban található.

17. táblázat: A 2. és 3. beállítás teljesítménye azonos befolyó vízzel (mg/l)

3. beállítás	Labor befolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.10.09	8,24	18	0,00	0,00	32,11	4,74	4,99	34
2. beállítás	Labor elfolyó							
Dátum	pH [-]	KOI _k	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	OP	TP	TN
2023.10.12	8,35	20	0,00	0,00	25,9	4,78	4,99	28

Az eredményekből látszik, hogy a 2. beállítás kicsivel jobb eredményt hozott nitrát-N területén, mint a 3. beállítás. Az ammóniát mindkettő teljesen eltávolította, viszont a 3. beállítás 24%-kal több NO₃-N-t tartalmazott az elfolyóban, mint a 2. beállítás. A többi elfolyó paraméter lényegében megegyezik. Ebből arra következtetnek, hogy a 2. beállítás szempontjából hatékonyabban üzemel, illetve valamivel kevésbé érzékeny nem megfelelő tápanyag arányokra, mint a 3. beállítás.

Következtetések

Az 1. beállítást a szakirodalomban olvasható módon alakítottam ki. A szennyvíz betáplálást az iszapréteg alá, kevertetés nélkül, hosszú időn keresztül adtam fel a reaktorba annak érdekében, hogy lokális anaerob körülmények alakuljanak ki. Az eredmények alapján azonban nem sikerült biológiai többletfoszfor eltávolítást elérni, tehát nem alakultak ki anaerob körülmények, mint ahogy azt vártam.

A 2. beállítás esetében a tapasztalatok alapján változtattam a vezérlési paramétereket. Ezen ciklus beállításban a szennyvizet rövid idő alatt, kevertetés mellett adta fel a program a reaktorba. Ezzel azt akartam elérni, hogy az előző ciklus tisztított vizének megfelelő koncentrációban a reaktorban visszamaradó nitrát a lehető leggyorsabban denitrifikálódjon, majd pedig még rendelkezésre álló maradék szerves anyaggal, immár anaerob körülmények között megtörténjen a biológiai többletfoszfor eltávolítás. A mérési eredmények igazolják, hogy sikeresen végbemegy mind a denitrifikáció, mind a biológiai többletfoszfor eltávolítás.

A 3. beállítás során a szennyvíz betáplálás kettő egyenlő részre lett osztva. Az első betáplálásnál az anoxikus körülmények következtében az érkező tápanyaggal lejátszódik a denitrifikáció, így anaerob körülményeket kialakítva még a második betáplálás előtt. Az újbóli betáplálással friss tápanyaghoz jut az iszap és a már meglévő anaerob körülmények mellett képes lesz a többletfoszfor eltávolításra. A labor eredmények arra utalnak, hogy a 3. beállítás is képes a többletfoszfor eltávolításra, amennyiben a nyers szennyvízben ehhez elegendő KOI állna rendelkezésre.

A mérési eredmények alapján a 2. és 3. beállítás egyaránt javasolt nagyüzemi A2/O rendszerek laboratóriumi SBR technológiába ültetéséhez. Mindkét ciklus beállítás mellett a nagyüzemivel megegyező vagy azt meghaladó mértékű biológiai többletfoszfor eltávolítást lehet elérni feltéve, hogy az SBR-be feladott szennyvíz a szükséges C:N:P aránnyal rendelkezik a megfelelő biológiai többletfoszfor eltávolításhoz.

Irodalomjegyzék

[1] VITI Group honlap: A lakossági szennyvizek tisztításának története.

Elérhetőség: <https://vitigroup.hu/tudastar-a-szennyviztisztitas-kialakulasa-fejlodesenapjainkig>

[2] NG Wun Jern: Industrial Wastewater Treatment. Singapore, Imperial College Press. 2006.

Elérhetőség: ISBN: 9781911298373, 1911298372

[3] Amit Gross, Adi Maimon, Yuval Alfiya, Eran Friedler: Greywater Reuse. CRC Press. 2015.

Elérhetőség: ISBN: 1482255057, 9781482255058

[4] John Tibbetts: Combined Sewer Systems: Down, Dirty, and Out of Date. 2005

Elérhetőség: <https://doi.org/10.1289/ehp.113-a464>

[5] Fazekas Bence, Kárpáti Árpád, Kovács Zsófia: Szennyvíztisztítás korszerű módszerei. 32. Veszprém, Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet. 2014.

Elérhetőség: ISBN: 978-615-5044-99-1

[6] WAPP vízipari megoldások [Online]: Biológiai szennyvíztisztítás

Elérhetőség: <https://wapp.hu/technologiak/biologiai-szennyviztisztitas/>

[7] G.L Karia, R.A Christian: Wastewater Treatment: Concepts and Design Approach. 2. kiadás. Delhi, PHI Learning. 2013.

Elérhetőség: ISBN: 9788120347359, 8120347358

[8] VGF&HKL [Online]: A biológiai szennyvíztisztítás

Elérhetőség: <https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2011/majus/2036-a-biologiai-szennyviztisztitas>

[9] Mohamed Samer: Wastewater Treatment Engineering. Rijeka, InTech. 2015.

Elérhetőség: ISBN: 978-953-51-2179-4

[10] Biological Wastewater Treatment. Szerk.: Mogens Henze. London, IWA Publishing. 2008.

Elérhetőség: ISBN: 9781843391883, 1843391880

[11] Peter A. Wilderer, R. L. Irvine, M. C. Goronszy: Sequencing Batch Reactor Technology. London, IWA Publishing. 2001. (Scientific and Technical Report, No 10)

Elérhetőség: ISBN: 9781900222211, 1900222213

- [12] Lijian Zhao, Chengyuan Su, Anliu Wang, Cuiping Fan, Xinyue Huang, Feiqian Li, Ruting Li, Comparative study of aerobic granular sludge with different carbon sources: Effluent nitrogen forms and microbial community In: Journal of Water Process Engineering. Volume 43. 2021,
Elérhetőség: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102211>
- [13] Kárpáti Árpád, Vermes László: Vízgazdálkodás – szennyvíztisztítás. 3. 10. Veszprém, Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet. 2011. Elérhetőség: ISBN: 978-615-5044-35-9
- [14] Christopher Forster: Wastewater Treatment And Technology. London, Thomas Telford. 2003.
Elérhetőség: 9780727732293, 0727732293
- [15] Edris Hoseinzadeh: Nitrogen Removal Processes For Wastewater Treatment. Singapore, Bentham Science Publishers. 2019.
Elérhetőség: ISBN: 9789811416576, 9811416575
- [16] WAPP vízipari megoldások [Online]: Egyenes átfolyású rendszerek
Elérhetőség: <https://wapp.hu/technologiak/egyenes-atfolyasu-eleveniszapos-szennyviztisztitasi-technologiak/>
- [17] van Loosdrecht, M., Hooijmans, C., Brdjanovic, D. et al.: Biological phosphate removal processes In: Appl Microbiol Biotechnol, 1997. 48.
Elérhetőség: <https://doi.org/10.1007/s002530051052>
- [18] Metcalf and Eddy Inc: Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3. McGraw-Hill Education (ISE Editions). 1991.
Elérhetőség: ISBN: 0071008241
- [19] S. Mace, J. Mata-Alvarez: Utilization of SBR Technology for Wastewater Treatment: An Overview In: Ind. Eng. Chem. Res. 2002. 41. 23.
Elérhetőség: <https://doi.org/10.1021/ie0201821>
- [20] Khac-Uan Do, Van-Linh Nguyen: Chapter 9 - Wastewater treatment by Sequencing Batch Reactor (SBR) without releasing excess sludge In: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. 2022.
Elérhetőség: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99874-1.00001-4>
- [21] Dr. Kárpáti Árpád: Szakaszos betáplálású eleveniszapos szennyvíztisztítás /SBR/. Veszprémi Egyetem, Kémiai Technológia Tanszék

Elérhetőség: <https://docplayer.hu/5860967-Szakaszos-betaplalasu-eleveniszapos-szennyviztisztitas-sbr.html>

[22] WAPP vízipari megoldások [Online]: SBR rendszerek

Elérhetőség: <https://wapp.hu/technologiak/szakaszos-uzemu-eleveniszapos-szennyviztisztitasi-technologiak-sbr/>

[23] Bakonykarszt Zrt.: Szennyvíztisztító telepről kibocsátott tisztított szennyvíz laboreredményei [Online]

Elérhetőség: https://bakonykarszt.hu/hu/sewage_quality?region_city=101