

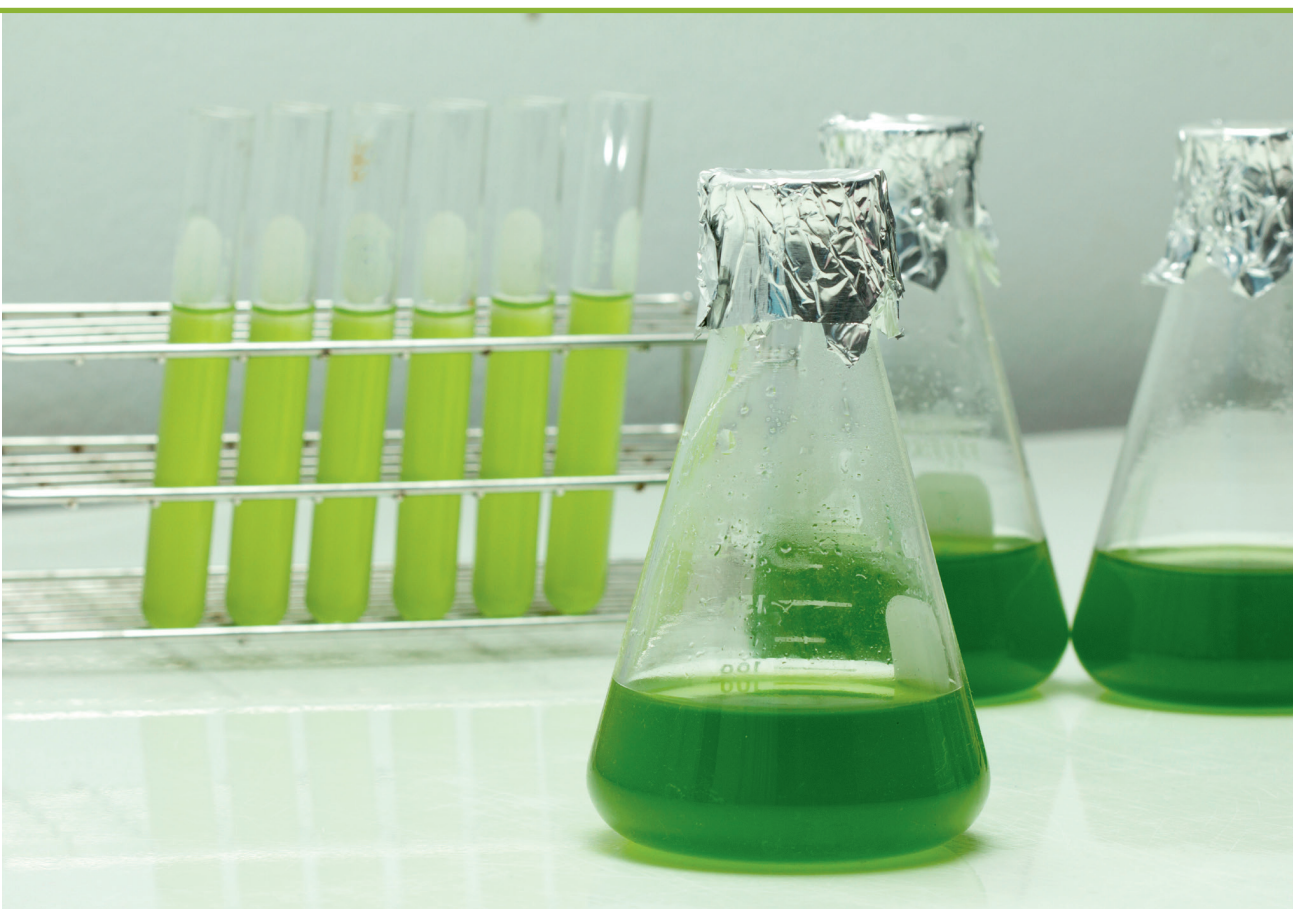


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Aigars Lavrinovičs

MIKROAĻĢU TEHNOĻĪJA KOMUNĀLO NOTEKŪDEŅU PĒCATTĪRĪŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

Aigars Lavrinovičs

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

**MIKROAĻĢU TEHNOLOĢIJA KOMUNĀLO
NOTEKŪDEŅU PĒCATTĪRĪŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*

TĀLIS JUHNA

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Lavrinovičs, A. Mikroaļģu tehnoloģija komunālo notekūdeņu pēcattīrīšanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 24 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-12" 2022. gada 12. oktobra lēmumu, protokols Nr. 4/22.

Šis darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātņu padomes atbalstu projektā
"Komunālo notekūdeņu pēcattīrīšana ar cikliskas darbības fotobioreaktora tehnoloģiju"
(LZP-2019/1-0271).

<https://doi.org/10.7250/9789934228650>
ISBN 978-9934-22-865-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 13. martā plkst. 13 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6a, 127. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. microbiol. Jaak Truu*,
Tartu Universitāte, Igaunija

Profesore *Dr. sc. ing. Annelie Hedström*,
Lüleo Tehniskā universitāte, Zviedrija

Asoc. profesore *Dr. sc. ing. Kristīna Kokina*,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Aigars Lavrinovičs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 19 attēlu, trīs tabulas, četri pielikumi, kopā 58 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Pētījuma aktualitāte.....	5
Darba mērķis.....	6
Galveno nodaļu un metodoloģijas apraksts.....	7
REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	10
Barības vielu izdalīšana no notekūdeņiem slēgta trauka apstākļos.....	10
Fosfora uzņemšana un metabolisms mikroaļģu fosfora deficīta apstākļos.....	12
Sākotnējie apstākļi procesa optimizēšanai fotobioreaktorā.....	13
Biomases produkcija, metabolisms un barības vielu izdalīšana no notekūdens cikliskas darbības fotobioreaktorā.....	16
Mikroaļģu tehnoloģijas izmantošanas izmaksas notekūdeņu pēcattīrīšanā.....	17
SECINĀJUMI.....	19
DARBA APROBĀCIJA.....	22
Publikācijas.....	22
Konferences.....	22
LITERATŪRA.....	23

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Pētījuma aktualitāte

Ūdens ekosistēmas visā pasaulē ir būtisks kultūru un sabiedrību identitātes veidojošs elements. Veselīga un funkcionāla ūdens ekosistēma nodrošina resursus pārtikai, dzīves telpai un sabiedrības labklājībai. Tomēr arvien lielākas virszemes ūdeņu platības tiek pakļautas paaugstinātu barības vielu, galvenokārt fosfora un slāpekļa, slodzei no dažādiem avotiem, tostarp notekūdeņu attīrīšanas iekārtām (NAI). Tas turpmāk veicina eitrofikācijas attīstību un izraisa vispārēju ūdens ekosistēmu degradāciju (1. att.). Tāpēc notekūdeņu attīrīšana vienmēr ir bijusi viena no galvenajām problēmām ūdens vides saglabāšanā. Tas ir radījis izaicinājumu zinātnieku aprindām izstrādāt efektīvas tehnoloģijas notekūdeņu attīrīšanai un pat mainīt priekšstatu par notekūdeņu attīrīšanu kā resursu atgūšanu, nevis atkritumu apglabāšanu.



1. att. Aļģu ziedēšana Baltijas jūras centrālajā daļā (autortiesības: Eiropas Kosmosa aģentūra).

Mikroaļģu tehnoloģijas notekūdeņu attīrīšanai tiek uzskatītas par daudzsološu alternatīvu tradicionālajām notekūdeņu attīrīšanas metodēm fosfora izdalīšanai un atgūšanai (*Borowitzka*, 2013; *Whitton* u. c., 2015). Vairākos pētījumos ir parādīts, ka dažādas mikroaļģu sugas vai jauktas kultūras spēj gandrīz pilnībā izdalīt fosforu notekūdeņiem (*Cai* u. c., 2013). Turklāt, manipulējot ar fosfora pieejamību no ārējās vides, iespējams panākt pastiprinātu fosfora izdalīšanu un tā uzglabāšanu mikroaļģu šūnās. Viena no šādas biomasas manipulācijas pieejām ietver fosfora badu (*Hernandez* u. c., 2006), ko ierosina ierobežoti fosfora apstākļi. Šāda biomasas manipulācija var vairākas reizes palielināt fosfora uzņemšanas ātrumu (*Brown* un *Shilton*, 2014), salīdzinot ar

biomasas fosfora patēriņu regulāros apstākļos. Turklāt manipulācijas ar fosfora pieejamību var veicināt augstvērtīgu molekulu sintēzi aļģu šūnās (Levasseur u. c., 2020), tādējādi palielinot saražotās biomasas vērtību un radot peļņas iespēju notekūdeņu attīrīšanas rezultātā.

Galvenie ierobežojumi mikroaļģu manipulācijai ar fosfora pieejamību ietver samazinātu biomasas augšanas ātrumu (Kamalanathan, 2016), kam seko zemāka augstvērtīgu molekulu kopējā produktivitāte. Joprojām nav zināms, kāda ir optimālā biomasas fosfora bada perioda robeža. Nepietiekams fosfora stress var vājināt vēlamo fosfora uzņemšanas uzlabošanu, savukārt pārmērīga fosfora deficīta rezultātā var tikt bojāti aļģu šūnu fizioloģiskie procesi un izjaukt plānoto notekūdeņu attīrīšanas procesu.

Turklāt nav skaidru indikatoru fosfora deficīta kvantitatīvai noteikšanai un biomasas fosfora bada apstākļu kontrolei. Tādējādi ziņotie fosfora izdalīšanas ātrumi pēc mikroaļģu biomasas pakļaušanas fosfora deficītam ir mainīgi, un ietekme uz līdzīgiem biomasas P bada apstākļiem var būt krasi atšķirīga (Hernandez u. c., 2006; Van Moorlegheem u. c., 2013; Wu u. c., 2012). Ņemot vērā šīs zināšanu nepilnības, ir nepieciešami padziļinātāki pētījumi par mikroaļģu biomasas fosfora badināšanas pieeju, lai to veiksmīgi integrētu notekūdeņu attīrīšanas sistēmās.

Darba mērķis

Pētījuma galvenais mērķis bija izpētīt mikroaļģu potenciālu uzlabotai fosfora izdalīšanai no sadzīves notekūdeņiem pēcattīrīšanas posmā. Galvenais šajā pētījumā aplūkots zinātniskais jautājums bija – **vai mikroaļģes var ātri samazināt fosfora saturu līdz īpaši zemam līmenim sadzīves notekūdeņos pēc tam, kad to biomasa ir pakļauta fosfora deficītam.** Atbilstoši definētajam zinātniskajam jautājumam pētījuma īstenošanai tika noteikti vairāki uzdevumi.

- Novērtēt mikroaļģu tehnoloģijas notekūdeņu attīrīšanai pašreizējo statusu un ar to saistītos izaicinājumus sekmīgai fosfora attīrīšanai no sadzīves notekūdeņiem.
- Identificēt mikroaļģu sugas, kas var augt notekūdeņos, efektīvi izdalīt barības vielas un ražot biomasu augstvērtīgu produktu ieguvei.
- Novērtēt dažādu mikroaļģu sugu biomasas augšanas un barības vielu izdalīšanas ātrumus dažāda tipa sadzīves notekūdeņos slēgta trauka apstākļos.
- Novērtēt mikroaļģu biomasas pakļaušanu fosfora deficīta apstākļiem kā paņēmieni uzlabotai fosfora izdalīšanai no notekūdeņiem.
- Noteikt indikatorus mikroaļģu fosfora deficīta stāvokļa kvantitatīvai raksturošanai.
- Izpētīt izmaiņas mikroaļģu šūnas fosfora metabolismā fosfora deficīta apstākļu ietekmē.
- Identificēt optimālos apstākļus sadzīves notekūdeņu pēcattīrīšanai cikliskas darbības fotobioreaktorā.
- Novērtēt priekšnoteikumus mēroga palielināšanai mikroaļģu tehnoloģijas notekūdeņu pēcattīrīšanas sistēmai ar integrētu biomasas fosfora badošanās tehniku.

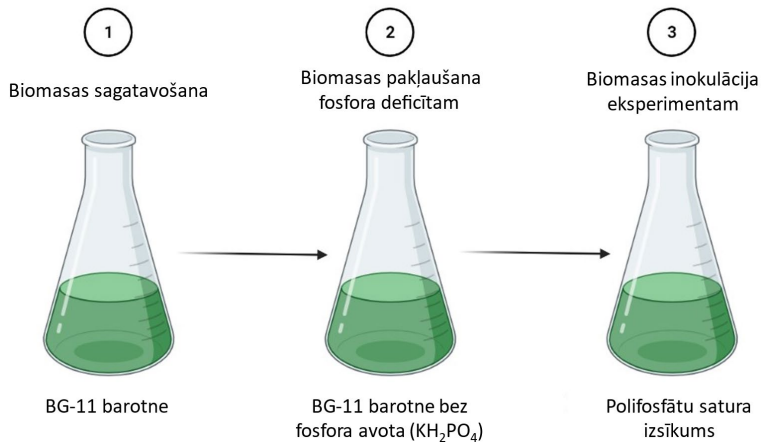
Darba novitāte un praktiskais lietojums

Pētījumā demonstrēta mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficītam ar mērķa lietojumu sadzīves notekūdeņu pēcattīrīšanai un iespējamai procesa izmaksu atgūšanai. Līdz šim neviena pašlaik strādājoša notekūdeņu attīrīšanas sistēma, kurā izmanto mikroaļģes, netiek papildināta ar biomasas manipulācijām ar fosfora stresu, lai panāktu uzlabotu fosfora izdalīšanu. Piedāvātā pieeja notekūdeņu pēcattīrīšanai, izmantojot fosfora deficītam pakļautu mikroaļģu biomasu, ir potenciāls procesa uzlabojums, kas samazinātu fosfātu izdalīšanas reakcijas laiku bez ievērojamiem biomasas produktivitātes zudumiem un saglabātu augstu aļģu šūnu sintezēto vērtīgo molekulu produktivitāti.

Galveno nodaļu un metodoloģijas apraksts

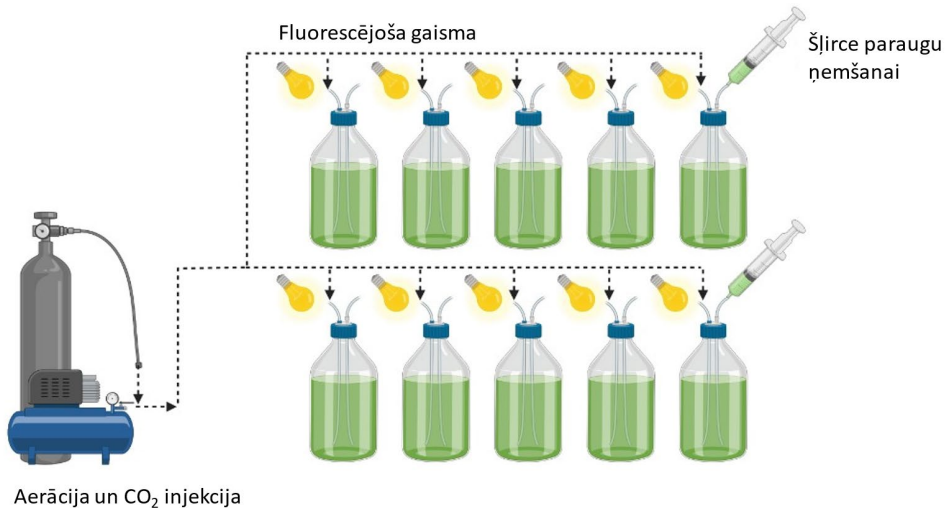
Promocijas darbs veidots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Promocijas darbā ietvertas četras zinātniskās publikācijas. **1. publikācijas** galvenais mērķis bija apskatīt mikroaļģu tehnoloģijas notekūdeņu attīrīšanas sistēmu esošo statusu un tās galvenos ierobežojumus izmantošanai pilnā mērogā. Lai gan pasaulē darbojas vairākas pilna mēroga notekūdeņu attīrīšanas iekārtas, kuru pamatā ir mikroaļģes, pastāv daudzi trūkumi un problēmas, kas kavē pāreju uz šo tehnoloģiju. Galvenie šķēršļi notekūdeņu attīrīšanai, kuru pamatā ir mikroaļģes, ir tās ierobežota darbība noteiktos klimatiskajos apstākļos, lai nodrošinātu augstu veiktspēju, kā arī augstās izmaksas biomasas atgūšanai. Šajā rakstā ir apskatīti pašreizējie risinājumi un iespējamās stratēģijas, lai risinātu galvenās problēmas, kas saistītas ar notekūdeņu attīrīšanu, kuras pamatā ir mikroaļģes. Tā iekļauj biomasas atgūšanu, patogēnu ietekmi uz biomasu, mikropiesārņotāju izdalīšanas efektivitāti un darbību auksta klimata apstākļos.

2. publikācijā galvenais uzdevums bija pārbaudīt un aprobēt pieeju mikroaļģu biomasas fosfora badināšanai, lai veicinātu fosfora izdalīšanu no notekūdeņiem. Uzdevuma sasniegšanai izmantotas trīs mikroaļģu sugas – *Desmodesmus communis*, *Tetrademus obliquus* un *Chlorella protothecoides*. Šo mikroaļģu biomasu septiņu un 14 dienu garumā tika pakļautas fosfora deficīta apstākļiem un pēc tam kultivētas sadzīves notekūdeņos, lai pētītu biomasas augšanas un barības vielu izdalīšanas dinamiku (2. att.). Tika salīdzināts arī fosfora izdalīšanas ātrums un polifosfātu uzkrāšanās dažādu fosfora bada periodu ietekmē. Visbeidzot, tika apspriesti galvenie apstākļi, kas ietekmē iegūtos rezultātus.



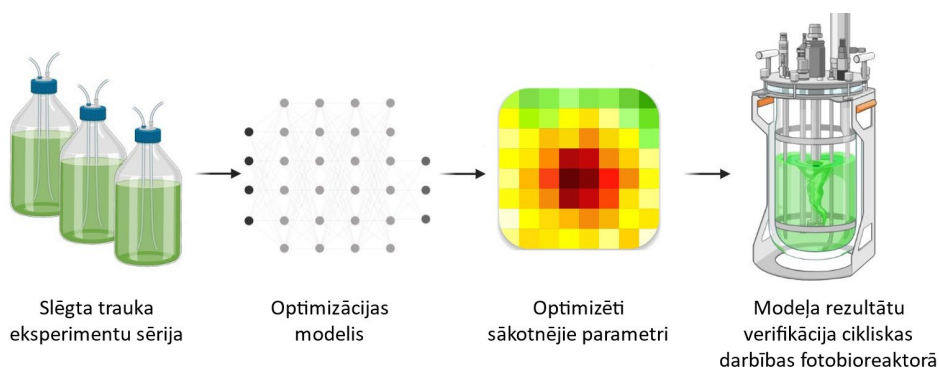
2. att. Mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficītam fosfātus nesaturošā vidē.

3. publikācijā tika pārbaudīta trīs un piecu dienu fosfora bada periodu ietekme uz biomasas augšanu, barības vielu izdalīšanas ātrumu un polifosfātu uzkrāšanos šūnā, lietojot mikroaļģu sugas *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Ankistrodesmus falcatus* un *Tetradesmus obliquus*. Atšķirībā no eksperimenta **2. publikācijā** šis eksperiments tika veikts slēgta trauka apstākļos, kas papildināts ar aerāciju un CO_2 padevi, izmantojot zilā un sarkanā spektra apgaismojumu (3. att.). Visbeidzot, tika ievākti dati par sārmainās fosfatāzes aktivitāti, lai izpētītu šo enzīmu kā iespējamo indikatoru mikroaļģu biomasas fosfora deficīta stāvokļa kvantitatīvai raksturošanai.



3. att. Slēgta trauka eksperiments ar aerāciju un CO_2 injekciju.

4. publikācijas mērķis bija noteikt optimālos sākotnējos apstākļus, lai palielinātu biomasas produktivitāti un fosfora izdalīšanas ātrumu iespējami īsākā fosfora bada periodā. Pētījumam bija divi posmi. Vispirms mikroaļģu suga *Chlorella vulgaris* tika kultivēta sintētiskajos notekūdeņos slēgta trauka apstākļos. Iegūtie dati par biomasas augšanu, īpatnējo fosfātu izdalīšanas ātrumu, polifosfātu uzkrāšanos un proteīna produktivitāti tika analizēti, izmantojot optimizācijas modeli, lai prognozētu optimālos sākotnējos apstākļus iespējamajam produktīvākajam rezultātam. Otrajā eksperimenta posmā modeļa prognozētie rezultāti sākotnējo apstākļu optimizācijai tika pārbaudīti cikliskas darbības fotobioreaktorā, salīdzinot normālos apstākļos un fosfora deficīta apstākļos augušu biomasu veiktspēju (4. att.). Biomasas fosfora deficīta radīšanai lietota polifosfātu satura samazināšana.

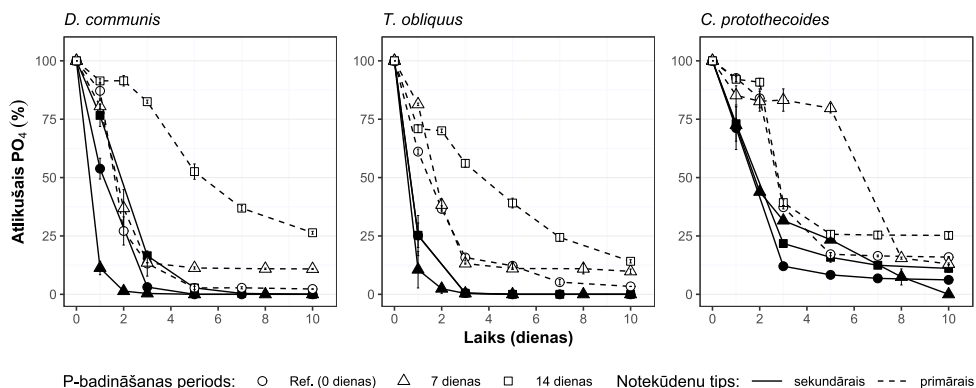


4. att. Darba gaita optimizācijas eksperimentam 4. publikācijā.

REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Barības vielu izdalīšana no notekūdeņiem slēgta trauka apstākļos

2. publikācijā tika pētīta izšķīdušā neorganiskā fosfora un slāpekļa izdalīšana no pirmējiem un sekundārajiem notekūdeņiem pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficītam septiņu un 14 dienu garumā. Eksperimenta beigās *D. communis*, *T. obliquus* un *C. protothecoides* uzrādīja augstu fosfāta izdalīšanu. References apstākļos *D. communis* un *T. obliquus* no sekundārajiem notekūdeņiem izdalīja > 99,0 % fosfāta attiecīgi piecu un trīs dienu laikā (5. att.). Tādos pašos apstākļos *C. protothecoides* spēja izdalīt 93,9 % fosfāta 10 dienu laikā. Biomasas pakļaušana fosfora deficīta apstākļiem septiņu dienu garumā uzlaboja *D. communis* un *T. obliquus* fosfātu izdalīšanu, samazinot fosfātu saturu sekundārajos notekūdeņos attiecīgi par 88,7 % un 89,5 % eksperimenta pirmajās 24 stundās, par > 99,0 % divu dienu laikā. Šāds rezultāts, visticamāk, ir saistīts ar luksusa fosfora uzņemšanu. Šo fosfora uzņemšanas un uzglabāšanas mehānismu var izraisīt biomasas fosfora bads, kas samazina šūnā uzkrātā fosfora rezerves. Atkārtoti nodrošinot ārējā fosfora pieejamību, aļģu šūnas spēj īsā laikā uzkrāt vairāk fosfora, nekā nepieciešams to augšanai.

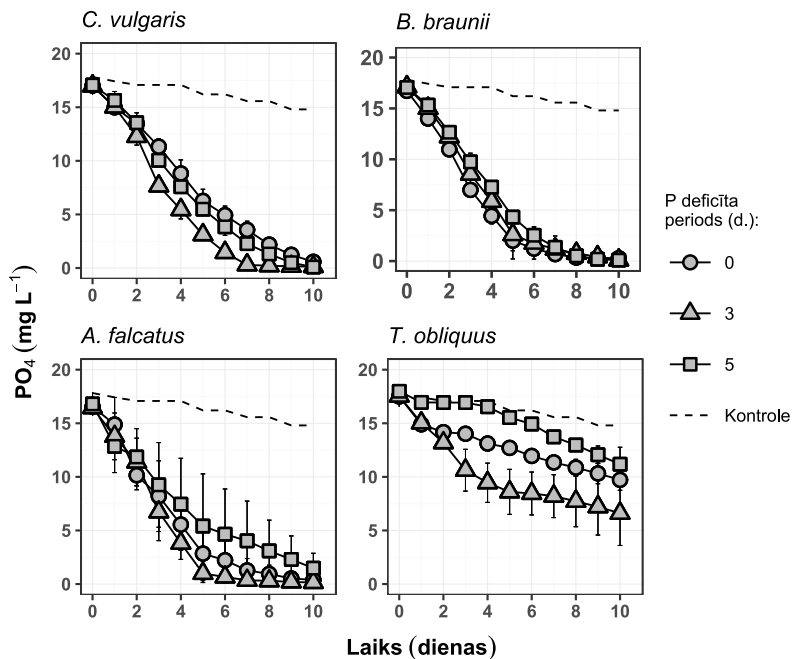


5. att. Fosfora izdalīšanas ātrums (vidējās vērtības ± standartnovirze, $n = 3$) *D. communis*, *T. obliquus* un *C. protothecoides* sugu mikroaļģēm primārajos un sekundārajos notekūdeņos pēc septiņu un 14 dienu fosfora deficīta perioda un references apstākļos bez biomasas badināšanas.

Izšķīdušā neorganiskā slāpekļa (*DIN*) izdalīšana visām trim sugām visos eksperimentālajos apstākļos bija zema. *D. communis* pēc septiņu dienu ilga fosfora bada perioda no sekundārajiem un primārajiem notekūdeņiem izdalīja attiecīgi 49,0 % un 46,5 % *DIN*. *T. obliquus* pēc septiņu dienu fosfora bada perioda no primārajiem notekūdeņiem izdalīja tikai 41,1 % *DIN*, savukārt

pārējos eksperimentālajos apstākļos *DIN* izdalīšana bija mazāka par 28,0%. *C. protothecoides* spēja izdalīt tikai no 0% līdz 17,1% *DIN*.

3. publikācijā tika pētīta *D. communis*, *T. obliquus*, *C. vulgaris*, *A. falcatus* un *B. braunii* sugu mikroaļģu spēja izdalīt fosfātus un nitrātus sekundārajiem notekūdeņiem pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficīta periodiem trīs un piecu dienu garumā. Visas sugas, izņemot *D. communis* un *T. obliquus*, uzrādīja augstu barības vielu izdalīšanas līmeni, sasniedzot attiecīgi vairāk nekā 97,0% un 91,0% nitrātu un fosfātu samazinājumu. Lielāks fosfāta izdalīšanas ātrums tika novērots *C. vulgaris* un *B. braunii* sugām pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficītam trīs un piecu dienu garumā, sasniedzot >99,0% PO_4 samazinājumu. Arī *A. falcatus* uzrādīja >99,0% PO_4 samazinājumu pēc trīs dienu fosfora deficīta perioda. Kopumā visām trim iepriekšminētajām sugām lielākā fosfātu izdalīšana tika novērota pēc 10 augšanas dienām, savukārt pēc trīs dienu fosfora bada perioda *C. vulgaris* un *A. falcatus* samazināja fosfātu par 99,2% septītajā dienā (6. att.). Iepriekšēja biomasas pakļaušana fosfora deficīta apstākļiem nitrātu izdalīšanu neietekmēja. Maksimālā nitrātu izdalīšana *C. vulgaris*, *B. braunii* un *A. falcatus* tika sasniegta piektajā līdz sestajā eksperimenta dienā.

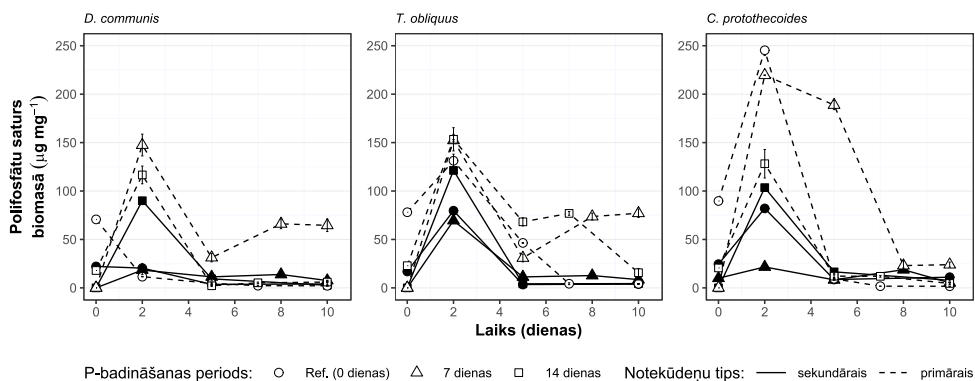


6. att. Fosfora izdalīšanas ātrums (vidējās vērtības \pm standartnovirze, $n = 3$), sekundāro notekūdeņu attīrīšanai izmantojot *C. vulgaris*, *B. braunii*, *A. falcatus* un *T. obliquus* sugu mikroaļģes pēc trīs un piecu dienu fosfora deficīta perioda un references apstākļos. Trauks bez biomasas izmantots kā negatīvā kontrole.

Iegūtie rezultāti norāda divus iespējamus šķēršļus, lai sekmīgi palielinātu fosfātu izdalīšanu no notekūdeņiem, izmantojot fosfora deficītam pakļautu biomasu. Pirmkārt, zemā N/P attiecība notekūdeņos, kā arī ātrāka slāpekļa izdalīšana liecina par slāpekli limitējošiem apstākļiem. Šādā gadījumā nitrāti kļūst par primāro barības vielu mikroaļģēm, izslēdzot iespējamo biomasas fosfora deficīta ietekmi. Otrkārt, citos pētījumos ātra fosfātu atdalīšana ar fosfora badinātu biomasu tika panākta apstākļos, kad šūnās uzkrātais fosfors bija izsmelts. Tomēr šajā pētījumā, lai imitētu reālus apstākļus, iekšējā biomasas fosfora rezerve polifosfāta veidā joprojām bija pieejama pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficītam. Minētie apstākļi liecina par fosfora deficīta ieviešanas paredzamo sarežģītību darbībai pilna mēroga notekūdeņu pēcatīrīšanā.

Fosfora uzņemšana un metabolisms mikroaļģu fosfora deficīta apstākļos

2. publikācijā tika pētīta polifosfātu uzkrāšanās mikroaļģu šūnās, to dinamika pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficītam un iespējamā luksusa fosfora uzņemšanas mehānisma iesaiste. *D. communis*, *T. obliquus* un *C. protothecoides* akumulēja polifosfātus, augot dažāda tipa notekūdeņos. Lielāka polifosfātu uzkrāšanās *D. communis* un *T. obliquus* tika novērota, biomasai augot primārajā notekūdenī pēc septiņu dienu ilgas biomasas fosfora deficīta (7. att.). *C. protothecoides* maksimālo polifosfātu saturu uzrādīja primārajos notekūdeņos bez iepriekšējas biomasas pakļaušanas fosfora deficītam. Šajā gadījumā lielāka polifosfātu uzkrāšanās primārajā notekūdenī ir saistīta ar zemāku pH līmeni eksperimenta sākuma fāzē. Sakarā ar organiskā oglekļa pārpalikumu primārajos notekūdeņos un tā oksidēšanos līdz CO₂ pH saglabājās zems. Tas novērsa fosfātu izgulsnēšanos palielināta pH ietekmē. Tā vietā tas tika tieši patērēts un akumulēts biomasā polifosfātu formā.



7. att. Polifosfātu akumulācija (vidējās vērtības ± standartnovirze, $n = 3$) *D. communis*, *T. obliquus* un *C. protothecoides* sugu mikroaļģēm primārajos un sekundārajos notekūdeņos pēc septiņu un 14 dienu fosfora deficīta perioda un references apstākļos bez biomasas badināšanas.

3. publikācijā tika novērots, ka biomasas augšanas fāze ir būtisks faktors veiksmīgai biomasas fosfora deficīta apstākļu radīšanai un tam sekojošai pastiprinātai fosfātu izdalīšanai no notekūdeņiem. Šī pētījuma rezultāti liecina, ka pirms fosfora deficīta apstākļu radīšanas *C. vulgaris* un *B. braunii* biomasas atradās agrīnā stacionārā augšanas fāzē, kad polifosfāti tiek uzkrāti, lai pārvarētu ilgstošus periodus bez fosfātu pieejamības no ārējā avota. Savukārt *A. falcatus* un *T. obliquus* atradās eksponenciālās augšanas fāzē, kad tika aktīvi izmantotas iepriekš uzkrātās iekšējās fosfora rezerves biomasas ražošanai (*Sanz-Luque* u. c., 2020).

4. publikācijā mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficīta apstākļiem tika iesākta pēc tam, kad tās augšana nonāca stacionārā fāzē. Eksperimenta laikā biomasas polifosfātu satura izmaiņas uzrādīja strauju pieaugumu pirmo sešu stundu laikā, liecinot par to, ka lielākā daļa neorganiskā fosfora tika uzreiz tieši uzņemta šūnās, nevis adsorbējās uz šūnas virsmas (*Yao* u. c., 2011). Turklāt nākamajās eksperimenta dienās biomasas polifosfātu saturs pakāpeniski samazinājās, īpaši biomasai ar ilgāku iepriekšēju fosfora deficīta periodu. Šāda polifosfātu dinamika liecina, ka pēc ilgākas biomasas pakļaušanas fosfora deficītam šūnā uzņemtais neorganiskais fosfors (P_i) tika pārveidots skābē šķīstošā polifosfātā, ko tālāk izmanto šūnas elementu, piemēram, olbaltumvielu, DNS vai RNS, sintēzei (*Su*, 2021). Attiecīgi mazāka šūnu P_i daļa tika pārveidota par skābē nešķīstošu polifosfātu, kas nodrošina šūnas fosfora rezerves apstākļos, kad fosfātu pieejamība no ārējiem resursiem ir ierobežota.

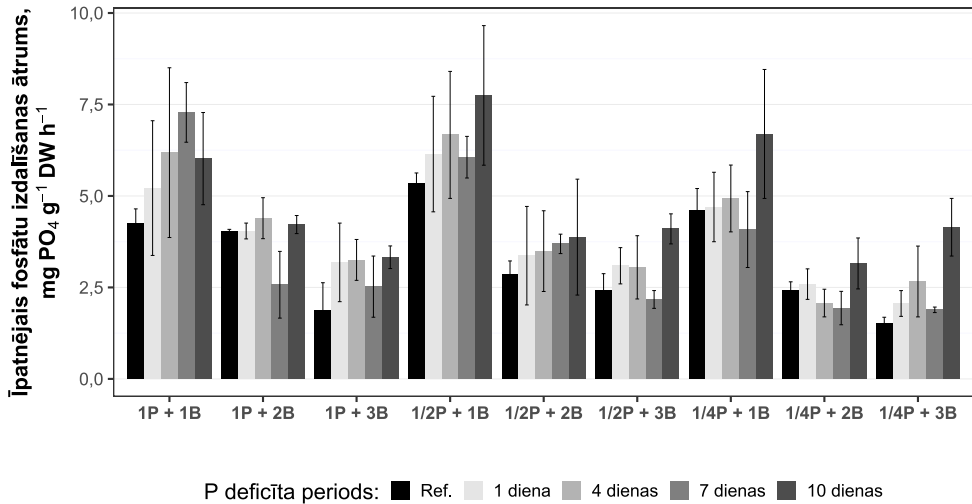
4. publikācijā arī pētīta mikroaļģu biomasas proteīna produktivitāte fosfora deficīta rezultātā. Iegūtais rezultāts liecināja par *C. vulgaris* spēju pastiprināti sintezēt proteīnu biomasas ilgstošas pakļaušanas fosfora stresam. No vienas puses, šis novērojums ir pretrunā ar zināmo vielmaiņas procesu šūnu proteīnu sintēzei, kas lielā mērā ir atkarīga no slāpekļa asimilācijas un pieejamās gaismas intensitātes (*Huang* u. c., 2021). No otras puses, var secināt, ka fosfora pieejamībai bija netieša ietekme uz olbaltumvielu sintēzi. Pastiprināta fosfora asimilācija, ko izraisīja fosfora stresa stāvoklis, paātrināja adenozīna trifosfāta (*ATP*) sintēzi, kas ir nepieciešams kā enerģijas avots proteīnu sintēzei. Šādu fosfora lomu proteīna sintēzē ir apsprieduši arī *Perez-Garcia* u. c. (2010) un *Wu* u. c. (2021), tādējādi arī atbalstot iepriekš izteikto apgalvojumu par fosfora asimilāciju skābē šķīstošajos polifosfātos.

Sākotnējie apstākļi procesa optimizēšanai fotobioreaktorā

4. publikācijā, izmantojot mikroaļģu sugu *C. vulgaris*, tika noteikts optimālais biomasas fosfora deficīta periods, kā arī sākotnējās biomasas un fosfāta koncentrācijas, lai panāktu ātru fosfātu izdalīšanu no notekūdeņiem, polifosfātu uzkrāšanos, olbaltumvielu produktivitāti un biomasas augšanu iespējami īsākā biomasas fosfora deficīta periodā.

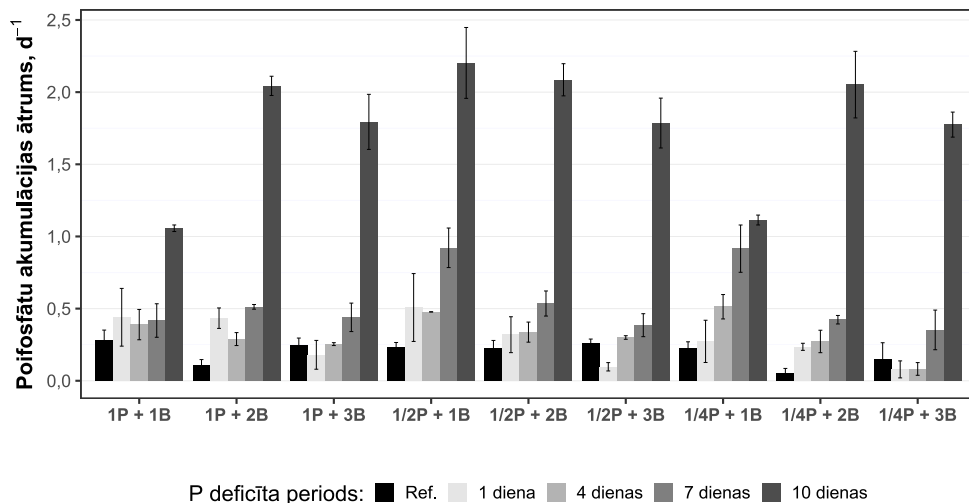
Fosfātu izdalīšana no notekūdeņiem tika normalizēta attiecībā pret sākotnējo biomasas koncentrāciju un attēlota kā īpatnējais fosfāta izdalīšanas ātrums R_{si} . Tika novērots, ka īpatnējais fosfātu izdalīšanas ātrums palielinājās līdz ar ilgāku biomasas fosfora bada periodu. Vairumā gadījumu augstākā R_{si} vērtība tika iegūta pēc 10 dienu fosfora bada perioda, sasniedzot

7,74 mg g DW h⁻¹. Šāds rezultāts tika iegūts pie vidējas fosfora un zemas sākotnējās biomasas koncentrāciju kombinācijas (8. att.). Maksimālie īpatnējie fosfora izdalīšanas rādītāji bija vidēji par 62,0 % lielāki nekā references biomasai tajā pašā, sasniedzot pat 175,0 % R_M pieaugumu apstākļos pie zemu fosfora un augstas biomasas sākotnējās koncentrācijas pēc 10 dienu ilga fosfora bada perioda. Biomasas fosfora deficīta ietekme uz biomasas augšanas ātrumu bija nenozīmīga.



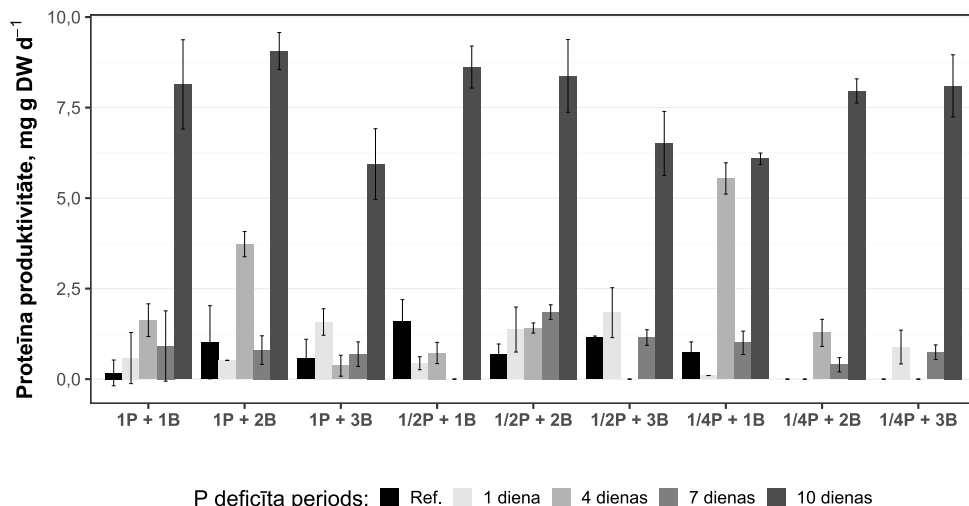
8. att. Īpatnējais fosfātu izdalīšanas ātrums eksperimenta pirmo piecu stundu laikā, izmantojot *C. vulgaris* biomasu, pie dažādām sākotnējās biomasas un fosfātu koncentrācijām un pēc dažādiem fosfora deficīta periodiem (vidējās vērtības ± standartnovirze, $n = 3$). Skaitļu un burtu kombinācijas uz x ass norāda sākotnējo fosfora (P) un biomasas (B) saturu katrā no eksperimentā izmantotajiem slēgtajiem traukiem. 1P – 22 mg P L⁻¹, 1/2P – 12 mg P L⁻¹, 1/4P – 5,5 mg P L⁻¹; 1B – 0,2 g DW L⁻¹, 2B – 0,6 g DW L⁻¹, 3B – 1,5 g DW L⁻¹.

Biomasas fosfora bada periodam bija būtiska ietekme uz fosfora uzkrāšanos un transformāciju mikroaļģu šūnās. Biomasas polifosfāta uzkrāšanās ātrums pakāpeniski palielinājās ilgākā biomasas fosfora deficīta periodā (9. att.). Tika novērtots, ka biomasā, pakļauta fosfora deficīta apstākļiem 10 dienas, polifosfātus akumulēja ar 3,7–40,0 reizes lielāku ātrumu, salīdzinot ar references apstākļiem un parādot, ka biomasas polifosfātu saturs tika atjaunots ievērojami ātrāk apstākļos, kad mikroaļģu šūnās bijušas pakļautas ilgstošākam fosfora deficītam. No šūnā uzkrātā polifosfāta mazākā frakcija tika pārveidota par skābē nešķīstošu polifosfātu, kas nodrošina fosfora rezerves pie ierobežotas ārējā fosfora pieejamības. Polifosfātu satura samazināšanās laika gaitā liecināja, ka to galvenokārt izmantoja augstvērtīgu produktu, tostarp olbaltumvielu, sintēzei.



9. att. Polifosfātu akumulācijas ātrums, izmantojot *C. vulgaris* biomasu, pie dažādām sākotnējās biomasas un fosfātu koncentrācijām un pēc dažādiem fosfora deficīta periodiem (vidējās vērtības \pm standartnovirze, $n = 3$). Skaitļņu un burtu kombinācijas uz x ass norāda sākotnējo fosfora (P) un biomasas (B) saturu katrā no eksperimentā izmantotajiem slēgtajiem traukiem. 1P – 22 mg P L⁻¹, 1/2P – 12 mg P L⁻¹, 1/4P – 5,5 mg P L⁻¹; 1B – 0,2 g DW L⁻¹, 2B – 0,6 g DW L⁻¹, 3B – 1,5 g DW L⁻¹.

Novērotā biomasas proteīna produktivitāte trīs dienu periodā pieauga līdz ar ilgāku biomasas fosfora deficīta periodu. Tomēr ievērojami augstāka proteīna produktivitāte tika iegūta pēc 10 dienu biomasas fosfora stresa, salīdzinot ar citiem fosfora deficīta periodiem un sasniedzot 9,0 g DW d⁻¹ apstākļos ar augstu fosfora un vidēju biomasas sākotnējo koncentrāciju. 10 dienu ilgs biomasas fosfora deficīta periods radīja 5,7–46,8 reizes augstāku proteīna produktivitāti nekā references apstākļos bez iepriekšēja biomasas fosfora deficīta (10. att.).



10. att. Proteīna produktivitāte, izmantojot *C. vulgaris* biomasu, pie dažādām sākotnējās biomasas un fosfātu koncentrācijām un pēc dažādiem fosfora deficīta periodiem (vidējās vērtības \pm standartnovirze, $n = 3$). Skaitļu un burtu kombinācijas uz x ass norāda sākotnējo fosfora (P) un biomasas (B) saturu katrā no eksperimentā izmantotajiem slēgtajiem traukiem. 1P – 22 mg P L⁻¹, 1/2P – 12 mg P L⁻¹, 1/4P – 5,5 mg P L⁻¹; 1B – 0,2 g DW L⁻¹, 2B – 0,6 g DW L⁻¹, 3B – 1,5 g DW L⁻¹.

Slēgta trauka eksperimentu sērijā iegūtie rezultāti tika izmantoti kā ievades dati optimizācijas modelim, kura mērķis bija atrast vislabvēlīgākos sākotnējos apstākļus efektīvai notekūdeņu pēcatīrīšanai. Modeļa rezultāti liecina, ka biomasas fosfora deficīta periods vienas dienas garumā ir vislabvēlīgākais, lai panāktu ātru fosfātu izdalīšanu, uzturētu augstu biomasas augšanas ātrumu un nodrošinātu augstu polifosfātu uzkrāšanās ātrumu un proteīnu sintēzi. Lai nodrošinātu šādu rezultātu, biomasai ar īsu fosfora stresa periodu nepieciešams nodrošināt sākotnējo koncentrāciju $\sim 0,2$ g DW L⁻¹. Spriežot pēc optimizācijas modeļa rezultātiem, sākotnējai fosfātu koncentrācijai ir mazāka ietekme uz galveno mainīgo parametru rezultātu maksimizēšanu, tāpēc to sākotnēji ieteicams iestatīt 10 līdz 20 mg L⁻¹ robežās.

Biomasas produkcija, metabolisms un barības vielu izdalīšana no notekūdens cikliskas darbības fotobioreaktorā

Sākotnējās vērtības fosfora deficīta periodam un biomasas un fosfātu koncentrācijām, kas iegūtas iepriekš minētajā eksperimentu sērijā, izmantojot optimizācijas modeli, tika verificētas cikliskas darbības fotobioreaktorā, kas darbojās 60 dienu. Iegūtais biomasas augšanas ātrums fosfora deficītam pakļautai biomasai bija par 52,7 % lielāks nekā referenes apstākļos (1. tab.).

Turklāt fosfora badā esošā biomasa uzrādīja par 101,7 % augstāku īpatnējo fosfora izdalīšanas ātrumu nekā references apstākļos, norādot, ka vienas dienas biomasas fosfora deficīts ir bijis pietiekams, lai radītu fosfora stresa apstākļus un veicinātu pastiprinātu fosfātu izdalīšanu no notekūdeņiem. Arī polifosfātu akumulācijas ātrums bija par 138,0 % augstāks biomasai pēc fosfora deficīta nekā references apstākļos. Biomasas polifosfāta satura dinamika, kā arī sārmainās fosfatāzes aktivitāte vēl vairāk apliecināja fosfora deficīta stāvokļa esamību un ietekmi. Novērotā proteīna produktivitāte fosfora deficītā esošai biomasai bija par 38,7 % zemāka nekā references apstākļos. Šāds iznākums saskan ar rezultātu, kas iepriekš iegūts slēgta trauka eksperimentu sērijās, kur proteīna produktivitāte pēc vienas dienas ilga fosfora deficīta perioda neuzrādīja būtisku pieaugumu, salīdzinot ar references apstākļiem.

1. tabula

Kinētisko parametru vērtības references un vienas dienas fosfora deficītam pakļautai *C. vulgaris* biomasai cikliskas darbības fotobioreaktorā (vidējās vērtības ± standartnovirze)

	Biomasas augšanas ātrums, d⁻¹	Īpatnējais PO₄ izdalīšanas ātrums, mg g DW h⁻¹	Polifosfātu akumulācijas ātrums, d⁻¹	Proteīna produktivitāte, mg g DW d⁻¹
Reference (n = 4)	0,072 ± 0,016	0,279 ± 0,134	0,280 ± 0,066	1,682 ± 0,210
Fosfora deficīts (n = 5)	0,110 ± 0,024	0,563 ± 0,082	0,666 ± 0,063	1,031 ± 0,365

Mikroaļģu tehnoloģijas izmantošanas izmaksas notekūdeņu pēcattīrīšanā

2. un 4. publikācijā tika demonstrēts, ka mikroaļģu biomasa, kas iepriekš pakļauta fosfora deficītam, spēj ātri un gandrīz pilnībā samazināt fosfora saturu notekūdeņos. Tomēr šāda veikspēja ir saistīta ar izdevumiem, kas bieži vien ir lielāki nekā tad, ja tiek izmantotas tradicionālās pēcapstrādes metodes (2. tab.). *Molinos-Senante* u. c. (2010) ir aprēķinājuši, ka ķīmiskā izgulsnēšana fosfora izdalīšanai no notekūdeņiem var izmaksāt, sākot no 0,215 EUR m⁻³. Membrānas filtrācijas izmaksas ir ļoti atšķirīgas atkarībā no izmantotās tehnoloģijas un lokācijai specifiskās elektroenerģijas izmaksām. Turklāt modeļa aplēses, ko ieguva *Hernandez-Sancho* u. c. (2011), liecina, ka būtisks apstāklis ir attīrīšanas tehnoloģijas mērogs, jo notekūdeņu attīrīšanas izmaksas palielinās, palielinoties darbības apjomam.

No otras puses, salīdzinot tradicionālās notekūdeņu pēcattīrīšanas sistēmas ar dabas procesos balstītām sistēmām, piemēram, mākslīgajiem mitrājiem un augstas ražības aļģu diķiem, redzams, ka ne tikai tradicionālā sistēma ir divas līdz trīs reizes dārgāka nekā dabiskos procesos balstītas

tehnoloģijas, bet arī iespējamā ietekme uz vidi ir divas līdz piecas reizes lielāka tradicionālajām sistēmām lielā ķīmisko vielu un elektroenerģijas patēriņa dēļ (Garfi u. c., 2017).

2. tabula

Izmaksu salīdzinājums dažādām notekūdeņu pēcattīrīšanas metodēm

Notekūdens pēcattīrīšanas tehnoloģija	Izmaksas, EUR m ⁻³	Atsauce
Ķīmiskā izgulsnēšanās	no 0,215	(Molinos-Senante u. c., 2010)
Membrānas filtrācija	no 0,859 līdz 11,828	(Clem un Mendonça, 2022) (Ozturk u. c., 2003) (Hernandez-Sancho u. c., 2011)
Mākslīgie mitrāji	no 0,120 līdz 0,250	(Gikika u. c., 2014)
Augstas ražības aļģu dīķi	no 0,120 līdz 0,420	(Kohlheb u. c., 2020) (Kit u. c., 2021) (Garfi u. c., 2017)
Fotobioreaktors	no 1,520	(Norsker u. c., 2011) Esošais pētījums

Lietojot fotobioreaktora tehnoloģiju, mikroaļģu izmantošana notekūdeņu pēcattīrīšanai kļūst dārgāka, jo prasa lielākas kapitāla un ekspluatācijas izmaksas. Atbilstoši Norsker u. c. (2011) aprēķiniem un šajā pētījumā iegūtajiem mikroaļģu augšanas un fosfora izdalīšanas ātruma datiem prognozētās izmaksas par 1 m³ notekūdeņu attīrīšanu būtu, sākot no 1,52 EUR. Turklāt fotobioreaktora darbības izmaksas var ievērojami atšķirties atkarībā no konfigurācijas un darba vides. Sarker un Salam (2019) pētījums liecina, ka iekšējās darbinātās fotobioreaktors patērēja 232 līdz 270 reizes vairāk enerģijas, prasīja 25 līdz 57 reizes lielākas kapitāla izmaksas un 3,8 līdz 16,8 reizes lielākas ekspluatācijas izmaksas nekā fotobioreaktors, kas darbojas ārpus telpām.

Lai gan mikroaļģu fotobioreaktora tehnoloģijas izmaksas patlaban ir augstākas nekā citas metodes notekūdeņu pēcattīrīšanai, tai ir lielāks finansiālās atdeves potenciāls, jo ir iespējama augstāka procesa kontrole un no tā izrietošās iespējas saražotās biomasas izmantošanai. Arshiro u. c. (2018) ir aplēsuši, ka notekūdeņu pēcattīrīšana mikroaļģu tehnoloģiju varētu segt procesa izmaksas vai pat nodrošināt peļņu, ja biomasas ražošana un tās pārdošana tiek integrēta notekūdeņu attīrīšanas procesā. Tāpēc, raugoties uz fotobioreaktoru tehnoloģiju notekūdeņu pēcattīrīšanai no resursu atgūšanas un aprites ekonomikas perspektīvas, tā var kļūt par izmaksu ziņā pozitīvu notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģiju.

SECINĀJUMI

Šī promocijas darba mērķis bija izpētīt sadzīves notekūdeņu pēcattīrīšanas iespējas, izmantojot mikroaļģu tehnoloģiju, kurā integrēta biomasas pakļaušana fosfora deficītam, lai uzlabotu fosfātu izdalīšanas procesu. Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, tika veikts literatūras apskats un izpētīts mikroaļģu potenciāls sadzīves notekūdeņu pēcattīrīšanai, koncentrējoties uz izšķīdušā neorganiskā fosfora atdalīšanu.

1. publikācijā tika apskatīts pašreizējais statuss notekūdeņu attīrīšanas sistēmām, kurās izmantota mikroaļģu biomasas. Tajā uzsvērts, ka galvenie ierobežojumi sekmīgai notekūdeņu attīrīšanai, izmantojot mikroaļģu biomasu, ir procesa darbība noteiktos klimatiskajos apstākļos, mikroaļģu biomasas atgūšana un bīstamu vielu un patogēnu klātbūtne sadzīves notekūdeņos, kam ir potenciāli kaitīga ietekme uz mikroaļģu produktivitāti un tās turpmāko izmantošanu. Ņemot vērā to, ka ierobežojumi galvenokārt saistīti ar finansiālām problēmām, mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficītam tika identificēta kā iespējamais risinājums notekūdens attīrīšanas efektivitātes saglabāšanai dažādos vides apstākļos un saražotās biomasas bioķīmiskās vērtības palielināšanai.

2. publikācijā tika demonstrēts, ka mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficīta apstākļiem var veicināt fosfora izdalīšanu no notekūdeņiem. Mikroaļģu sugas *Desmodesmus communis*, *Tetradismus obliquus* un *Chlorella protothecoides* spēja augt gan filtrētos ienākošajos notekūdeņos, gan notekūdeņos pēc bioloģiskās attīrīšanas. Pēc septiņu dienu perioda fosfora deficīta apstākļos *D. communis* un *T. obliquus* 24 stundu laikā spēja samazināt PO₄ saturu sekundārajos notekūdeņos par 89 %. *C. protothecoides* uzrādīja vislielāko polifosfātu uzkrāšanos, ja biomasas aug primārajos notekūdeņos. Šis pētījums arī izceļ pH kontroles nozīmi, lai izvairītos no fosfora izgulsnēšanās un nodrošinātu tā tiešu uzņemšanu ar biomasu, lai palielinātu tā bioķīmisko kvalitāti.

3. publikācijā mikroaļģu sugas *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Ankistrodesmus falcatus*, *Desmodesmus communis* un *Tetradismus obliquus* tika pakļautas fosfora deficīta periodiem trīs un piecu dienu garumā, lai pētītu notekūdeņu attīrīšanu mazās notekūdeņu attīrīšanas iekārtās. Atšķirībā no 2. publikācijas šajā pētījumā eksperimenta apstākļi tika papildināti ar aerāciju un CO₂ pieplūdi pH kontrolei. Iegūtie rezultāti parādīja, ka slāpekli limitējoši apstākļi izjauc fosfora deficīta ietekmi uz biomasu, lai uzlabotu fosfora atdalīšanu. Turklāt polifosfātu uzkrāšanās rezultāti izcēla biomasas augšanas fāzes nozīmi efektīvai fosfora badināšanas procedūrai. Uzkrātā polifosfāta izsīkšana sākas biomasas augšanas stacionārajā fāzē, kas lietojams kā atskaites punkts fosfora deficīta periodam. Turklāt sārmainās fosfatāzes aktivitāte tika identificēta kā potenciāls indikators mikroaļģu biomasas fosfora deficīta stāvokļa attīstībai. *Chlorella vulgaris* tika identificēta kā vispiemērotākā suga turpmākiem pētījumiem.

4. publikācijā *Chlorella vulgaris* sugas mikroaļģes tika audzētas sintētiskajos notekūdeņos, lai atrastu optimālu sākotnējo vērtību kombināciju tādiem parametriem kā biomasas un fosfāta koncentrācija, kā arī fosfora deficīta periods, lai iegūtu pēc iespējas ātrāku fosfātu izdalīšanu, augstāko biomasas augšanas ātrumu, polifosfātu uzkrāšanās un proteīna produktivitāti īsākā fosfora

deficīta periodā. Tika konstatēts, ka pētīto parametru vērtības uzlabojas, biomasu pakļaujot ilgākam biomasas fosfora deficīta periodam. Arī zemāka sākotnējā biomasas koncentrācija bija labvēlīga fosfātu izdalīšanai augstākās fotosintētiskās aktivitātes dēļ. Pētījumā tika izmantots optimizācijas modelis, lai iegūtu visefektīvāko sākotnējo vērtību kombināciju. Modeļa rezultāti parādīja, ka vienas dienas fosfora deficīta periods un sākotnējo biomasas un fosfora koncentrācijas attiecīgi $0,25 \text{ mg DW L}^{-1}$ un 10 līdz 15 mg L^{-1} ir labvēlīgas, lai nodrošinātu efektīvu notekūdens attīrīšanu. Optimizācijas modeļa rezultāti tika verificēti cikliskas darbības fotobioreaktorā. Izmantojot biomasu, kas iepriekš pakļauta fosfora deficīta apstākļiem, tika sasniegts par $101,7 \%$ lielāks fosfāta atdalīšanas ātrums ($0,563 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW h}^{-1}$), par $52,7 \%$ lielāks biomasas augšanas ātrums ($0,110 \text{ d}^{-1}$) un par $138,0 \%$ lielāks polifosfāta uzkrāšanās ātrums ($0,666 \text{ d}^{-1}$), salīdzinot tās veikspēju ar references apstākļiem.

Mikroaļģu biomasas pakļaušanas fosfora deficītam galvenais ieguvums ir samazināts reakcijas laiks fosfora izdalīšanai no notekūdeņiem līdz īpaši zemām koncentrācijām. Šāda pieeja var būt izdevīga sadzīves notekūdeņu attīrīšanai papildu attīrīšanas posmā, lai mērķtiecīgi atdalītu izšķīdušos neorganiskos fosfātus, īpaši gadījumos, kad ir jāievēro zema PO_4 saturs standarti. Kā redzams **4. publikācijā**, pat salīdzinoši īss fosfora deficīta periods var dubultot īpatnējo fosfora izdalīšanas ātrumu, salīdzinot ar references biomasu. Paaugstināta fosfora izdalīšanas ātruma uzturēšana samazinātu fotobioreaktora izmēru, kurā notiek reakcija. Tādējādi ir iespējams samazināt sākotnējo investīciju apjomu, kas bieži tiek identificēts kā viens no trūkumiem piedāvātās sistēmas pilna apjoma darbībai. No otras puses, **2. un 3. publikācijas** rezultāti liecināja par iespējamiem ierobežojumiem un trūkumiem, kas varētu kavēt fosfora atdalīšanas efektivitāti, izmantojot fosfora deficītam pakļautu biomasu. Ķīmiskais saturs sadzīves notekūdeņos ir mainīgs, tāpēc var būt sarežģīti uzturēt augstu N/P attiecību, kas veicinātu fosfora limitējošus apstākļus un uzlabotu fosfātu izdalīšanu no notekūdeņiem. Turklāt visos eksperimentos biomasas fosfora deficīta efekts tika pētīts laboratorijas mērogā sterilos un kontrolētos apstākļos, iespējams, izslēdzot visus organiskos un ķīmiskos faktorus, kas varētu negatīvi ietekmēt mikroaļģu biomasu. Mikrofiltrēta un sterila augšanas barotne izslēdza citu mikroorganismu klātbūtni, kas varētu izkonkurēt aļģu šūnas par barības vielām. Arī smago metālu saturs bija ļoti zems, tāpēc nebija iespējams novērtēt to iespējamo kaitīgo ietekmi uz mikroaļģu biomasu. Atsevišķu metālu klātbūtne var būt papildu stresa faktors, kas ietekmē biomasas augšanu un augstas vērtības molekulu sintēzi (Karcheva u. c., 2022). Turklāt, kontrolētie apstākļi un iespējamo traucējošo faktoru izslēgšana ļāva koncentrēt šo pētījumu uz pastiprinātas fosfora uzņemšanas mehānismiem.

Sadzīves notekūdeņu pēcatīrīšanas sistēmas ar mikroaļģēm darbību pilnā mērogā galvenokārt regulē gaismas pieejamība un vides temperatūra. Tomēr šī pētījuma laikā netika novērtēts, kā lielas nobīdes no optimālajām temperatūrām un gaismas režīmiem ietekmētu fosfātu atdalīšanu pēc biomasas pakļaušanas fosfora deficītam. Iepriekšējos pētījumos gan ir pierādīts, ka augstu barības vielu izvadīšanas ātrumu var uzturēt pat $4 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā (Craggs u. c., 1997), kas potenciāli ļauj paplašināt sistēmas lietojumu teritorijās ar mērenu klimatu.

Kopumā promocijas darbā iegūtie rezultāti apstiprina promocijas darba zinātnisko hipotēzi – mikroaļģu biomasas pakļaušana fosfora deficīta apstākļiem var palielināt izšķīdušā neorganiskā fosfora uzņemšanas ātrumu no ūdens vides, tai skaitā sadzīves notekūdeņiem. Iegūtie rezultāti papildina arī esošās zināšanas par notekūdeņu attīrīšanu, izmantojot mikroaļģu biomasu. Piemēram, tika parādīts, ka iespējams novērtēt fosfora deficīta stāvokli mikroaļģēm, kā indikatoru izmantojot sārmainās fosfatāzes aktivitāti. Šāds rādītājs ļautu labāk kontrolēt fosfora deficīta stāvokļa lietošanu pilna apjoma notekūdeņu pēcattīrīšanā. Tika parādīts arī tas, kā fosfora deficīta apstākļi ietekmē tā uzkrāšanās un transformācijas ceļus mikroaļģu šūnā, ļaujot labāk izprast fosfora deficīta ietekmi uz augstvērtīgu molekulu sintēzi. Šis pētījums liecina, ka piedāvātā sadzīves notekūdeņu pēcattīrīšanas tehnoloģija spēj samazināt fosfātu koncentrāciju zem $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ un mazināt sadzīves notekūdeņu ietekmi uz eutrofikācijas stāvokļa attīstību virszemes ūdeņos.

Turpmākajos pētījumos par mikroaļģu pakļaušanu fosfora deficītam, lai uzlabotu fosfora izdalīšanu no notekūdeņiem, nepieciešams koncentrēties uz tā darbību pilna mēroga sistēmās, kas attīra dažādas izcelsmes notekūdeņus reālos apstākļos. Ieteicami arī pētījumi par patogēno un bīstamo vielu klātbūtni augstvērtīgajos savienojumos, kas iegūti no notekūdeņos audzētām mikroaļģēm. Šādas zināšanas ir būtiskas, lai informētu sabiedrību par šādu mikroaļģu produktu drošību un lietojumu. Turklāt labāka izpratne par mikroaļģu šūnu stāvokli fosfora deficīta apstākļos ģenētiskā līmenī būtu ne tikai noderīga mikroaļģu biomasas kultivēšanas sistēmās un notekūdeņu attīrīšanas sistēmās, bet arī palielinātu izpratni par fosfora aprites ciklu dabiskajās ūdens ekosistēmās.

DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas

1. Lavrinovičs, A., Juhna, T. Review on Challenges and Limitations for Algae-Based Wastewater Treatment. *Construction Science*, 2017, 20, 17–25.
2. Lavrinovičs, A., Mežule, L., Juhna, T. Microalgae Starvation for Enhanced Phosphorus Uptake from Municipal Wastewater. *Algal Research*, 2020, 52, 102090.
3. Lavrinovičs, A., Murby, F., Zīverte, E., Mežule, L., Juhna, T. Increasing Phosphorus Uptake Efficiency by Phosphorus-Starved Microalgae for Municipal Wastewater Post-Treatment. *Microorganisms*, 2021, 9 (8), 1598.
4. Lavrinovičs, A., Mežule, L., Caciivkins, P., Juhna, T. Optimizing Phosphorus Removal for Municipal Wastewater Post-Treatment with *Chlorella vulgaris*. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324, 116313.

Konferences

1. MELiSSA konference 2022. Current and Future Ways to Closed Life Support System. Prezentācija: Optimizing Phosphorus Removal for Municipal Wastewater Post-Treatment with *Chlorella vulgaris*. 8.–10.11.2022., Tulūza, Francija.
2. 10th International Conference on Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts. Prezentācija: Microalgae exposure to phosphate deficiency for enhanced nutrient uptake and biochemical value improvement. 15.06.2021., tiešsaiste.
3. IWA 12th Eastern European Young Water Professionals Conference. Prezentācija: Microalgae starvation for enhanced phosphorus uptake from municipal wastewater. 02.04.2021., tiešsaiste.
4. MELiSSA conference 2020. Current and Future Ways to Closed Life Support System. Prezentācija: The effect of phosphate starvation on nutrient uptake and cellular content of the microalgae *Desmodesmus communis* and *Chlorella protothecoides*. 03.11.2020., tiešsaiste.
5. RTU 61st international scientific conference, section “Bioenergy Technologies and Biotechnologies”. Prezentācija: Benefits and challenges of phosphorus-starved microalgae use for municipal wastewater treatment. 20.10.2020., tiešsaiste.
6. RTU 58th international scientific conference, section “Bioenergy Technologies”. Prezentācija: Microalgae for wastewater treatment: prospects and shortcomings. 16.10.2017., Rīga, Latvija.
7. RTU 58th international scientific conference, section “Heat, gas and water technologies”. Prezentācija: Use of freshwater food-web for phosphorus removal from wastewater in cold climate conditions. 12.10.2017., Rīga, Latvija.

LITERATŪRA

- Arshiro, L. T., Montero, N., Ferrer, I., Gabriel, F. G., Gómez, C., Garfí, M., 2018. Science of the Total Environment Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1118–1130. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.051.
- Borowitzka, M. A., 2013. High-value products from microalgae-their development and commercialisation. *J. Appl. Phycol.* 25, 743–756. doi:10.1007/s10811-013-9983-9.
- Brown, N., Shilton, A., 2014. Luxury uptake of phosphorus by microalgae in waste stabilisation ponds: Current understanding and future direction. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 13, 321–328. doi:10.1007/s11157-014-9337-3.
- Cai, T., Park, S. Y., Li, Y., 2013. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 19, 360–369. doi:10.1016/j.rser.2012.11.030.
- Clem, V., Mendonça, H. V. De, 2022. Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane : A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose. *J. Environ. Manage.* 315, 115166. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115166.
- Craggs, R. J., McAuley, P. J., Smith, V. J., 1997. Wastewater nutrient removal by marine microalgae grown on a corrugated raceway. *Water Res.* 31, 1701–1707. doi:10.1016/S0043-1354(96)00093-0.
- Garfí, M., Flores, L., Ferrer, I., 2017. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities : Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *J. Clean. Prod.* 161, 211–219. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.116.
- Gikika, D., Gikas, G. D., Tsihrintzis, V. A., 2014. Construction and operation costs of constructed wetlands treating wastewater. *Water Sci. Technol.* 70, 803–810. doi:10.2166/wst.2014.294.
- Hernandez-Sancho, F., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., 2011. Cost modelling for wastewater treatment processes. *Desalination* 268, 1–5. doi:10.1016/j.desal.2010.09.042.
- Hernandez, J. P., De-Bashan, L. E., Bashan, Y., 2006. Starvation enhances phosphorus removal from wastewater by the microalga *Chlorella* spp. co-immobilized with *Azospirillum brasilense*. *Enzyme Microb. Technol.* 38, 190–198. doi:10.1016/j.enzmictec.2005.06.005.
- Huang, Y., Lou, C., Luo, L., Wang, X. C., 2021. Insight into nitrogen and phosphorus coupling effects on mixotrophic *Chlorella vulgaris* growth under stably controlled nutrient conditions. *Sci. Total Environ.* 752, 141747. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141747.
- Kamalanathan, M., Pierangelini, M., Shearman, L. A., Gleadow, R., Beardall, J., 2016. Impacts of nitrogen and phosphorus starvation on the physiology of *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Appl. Phycol.* 28, 1509–1520. doi:10.1007/s10811-015-0726-y.
- Karcheva, Z., Georgieva, Z., Tomov, A., Petrova, D., Zhiponova, M., Vasileva, I., Chaneva, G., 2022. Heavy metal stress response of microalgal strains *Arthonema africanum* and *Coelastrrella* sp. *BGV. BioRisk* 2022, 83–94. doi:10.3897/biorisk.17.77483.
- Kit, Y., Huang, C., Chang, J., 2021. Pollution prevention and waste phycoremediation by algal-based wastewater treatment technologies : The applications of high-rate algal ponds (HRAPs) and algal turf scrubber (ATS). *J. Environ. Manage.* 296, 113193. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113193.
- Kohlheb, N., Afferden, M. Van, Lara, E., Arbib, Z., Conthe, M., Poitzsch, C., Marquardt, T., Becker, M., 2020. Assessing the life-cycle sustainability of algae and bacteria-based wastewater treatment systems : High-rate algae pond and sequencing batch reactor. *J. Environ. Manage.* 264, 110459. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110459.

- Levasseur, W., Perré, P., Pozzobon, V., 2020. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnol. Adv.* 41, 107545. doi:10.1016/j.biotechadv.2020.107545.
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., Sala-Garrido, R., 2010. Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost-benefit analysis. *Sci. Total Environ.* 408, 4396–4402. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.07.014.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., Wijffels, R. H., 2011. Microalgal production – A close look at the economics. *Biotechnol. Adv.* 29, 24–27. doi:10.1016/j.biotechadv.2010.08.005.
- Ozturk, I., Altinbas, M., Koyuncu, I., Arıkan, O., Gomec-yangin, C., 2003. Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Manag.* 23, 441–446. doi:10.1016/S0956-053X(03)00061-8.
- Perez-Garcia, O., Escalante, F. M. E., de-Bashan, Luz, E., Bashan, Y., 2011. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water Res.* 45, 11–36. doi:10.1016/j.watres.2010.08.037.
- Powell, N., Shilton, A. N., Pratt, S., Chisti, Y., 2008. Factors influencing luxury uptake of phosphorus by microalgae in waste stabilization ponds. *Environ. Sci. Technol.* 42, 5958–5962. doi:10.1021/es703118s.
- Rani, S., Chowdhury, R., Tao, W., Srinivasan, A., 2020. Tertiary treatment of municipal wastewater using isolated algal strains: treatment efficiency and value-added products recovery. *Chem. Ecol.* 36, 48–65. doi:10.1080/02757540.2019.1688307.
- Sanz-Luque, E., Bhaya, D., Grossman, A. R., 2020. Polyphosphate: A Multifunctional Metabolite in Cyanobacteria and Algae. *Front. Plant Sci.* 11, 1–21. doi:10.3389/fpls.2020.00938.
- Sarker, N. K., Salam, P. A., 2019. Indoor and outdoor cultivation of *Chlorella vulgaris* and its application in wastewater treatment in a tropical city–Bangkok, Thailand. *SN Appl. Sci.* 1, 1–13. doi:10.1007/s42452-019-1704-9.
- Su, Y., 2021. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Sci. Total Environ.* 762, 144590. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144590.
- Van Moorleghe, C., De Schutter, N., Smolders, E., Merckx, R., 2013. Bioavailability of organic phosphorus to *Pseudokirchneriella subcapitata* as affected by phosphorus starvation: An isotope dilution study. *Water Res.* 47, 3047–3056. doi:10.1016/j.watres.2013.03.026.
- Whitton, R., Ometto, F., Pidou, M., 2015. Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment. *Environ. Technol. Rev.* 4, 133–148. doi:10.1080/21622515.2015.1105308.
- Wu, Q., Guo, L., Wang, Y., Zhao, Y., Jin, C., Gao, M., She, Z., 2021. Phosphorus uptake, distribution and transformation with *Chlorella vulgaris* under different trophic modes. *Chemosphere* 285, 131366. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131366.
- Wu, Y. H., Yu, Y., Li, X., Hu, H. Y., Su, Z. F., 2012. Biomass production of a *Scenedesmus* sp. under phosphorous-starvation cultivation condition. *Bioresour. Technol.* 112, 193–198. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.037.
- Yao, B., Xi, B., Hu, C., Huo, S., Su, J., Liu, H., 2011. A model and experimental study of phosphate uptake kinetics in algae: Considering surface adsorption and P-stress. *J. Environ. Sci.* 23, 189–198. doi:10.1016/S1001-0742(10)60392-0.



Aigars Lavrinovičs dzimis 1988. gadā Tukumā. 2012. gadā absolvējis Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un zemes zinātņu fakultāti, iegūstot dabaszinātņu maģistra grādu ģeogrāfijā. Studiju laikā sācis strādāt Latvijas Hidroekoloģijas institūtā un bijis vairāku starptautisku un nacionālu zinātnisko projektu īstenošanā zinātniskais asistents. Šajā laikā strādājis virszemes ūdens ekosistēmu apsaimniekošanas un piesārņojuma kontroles projektos. Praktiskas ievirzes zinātnisko darbu turpinājis nodibinājumā "Vides risinājumu institūts", strādājot projektos, kas saistīti ar ūdens piesārņojumu un klimata pārmaiņām. Kopš 2016. gada ir RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātes (BIF) Ūdens pētniecības un vides biotehnoloģiju laboratorijas pētnieks un piedalās dažādu zinātnisko projektu īstenošanā. Kopš 2022. gada ir BIF Ūdens sistēmu un biotehnoloģiju institūta lektors. A. Lavrinovičs aktīvi iesaistās RTU īstenotajos izglītības projektos, veicinot studentu dalību inovatīvu un praktisku risinājumu izstrādē ūdens attīrīšanai un resursu atgūšanai.