

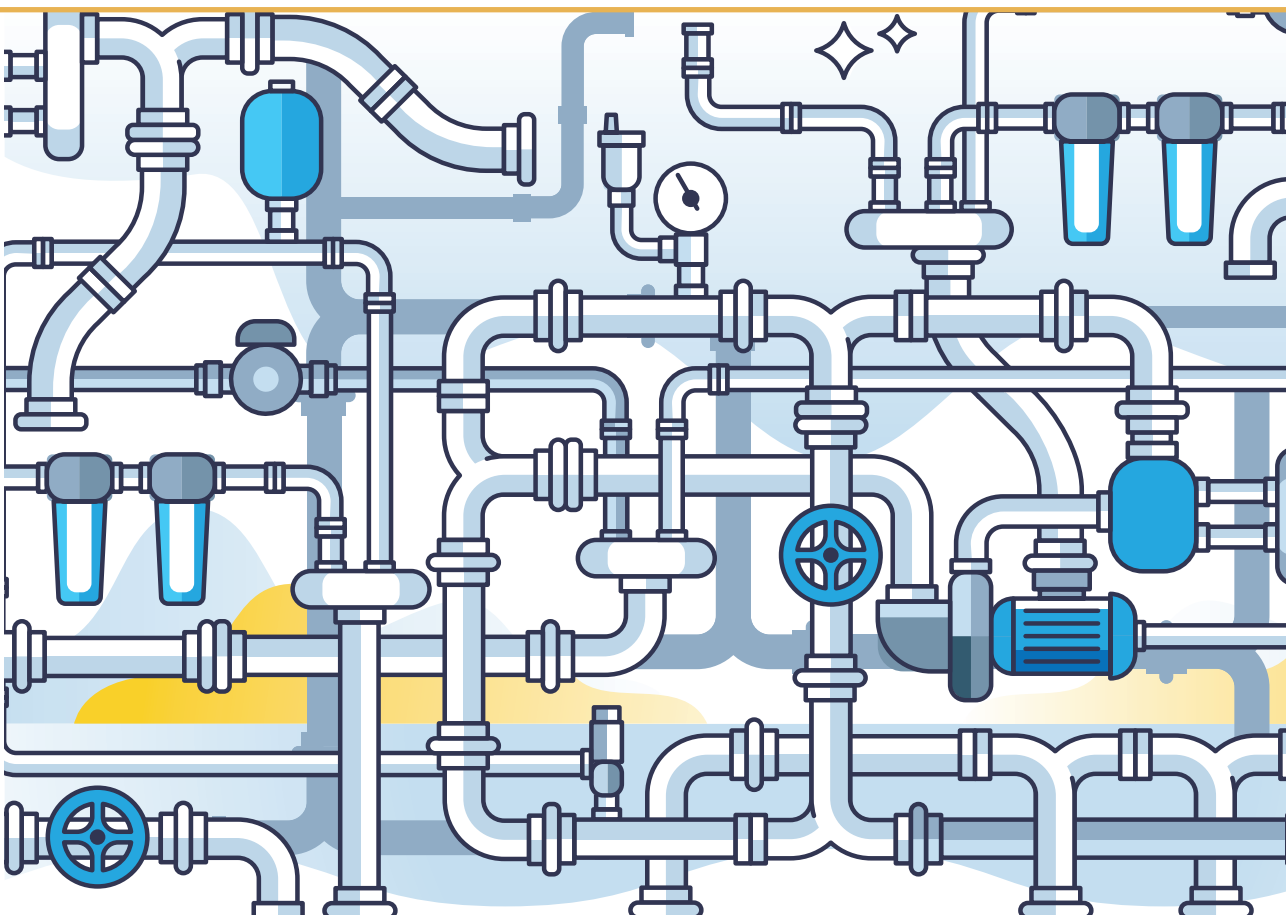


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Marta Zemīte

MIKROBIĀLI PIEEJAMĀ FOSFORA DAUDZUMA IEROBEŽOŠANAS IETEKME UZ MIKROBIOLOĢISKO ŪDENS KVALITĀTI IEKŠĒJĀ DZERAMĀ ŪDENS APGĀDĒ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Ūdens sistēmu un biotehnoloģiju institūts

Marta Zemīte

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

MIKROBIĀLI PIEEJAMĀ FOSFORA DAUDZUMA IEROBEŽOŠANAS IETEKME UZ MIKROBIOLOĢISKO ŪDENS KVALITĀTI IEKŠĒJĀ DZERAMĀ ŪDENS APGĀDĒ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
TĀLIS JUHNA

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Zemīte M. Mikrobiāli pieejamā fosfora daudzuma ierobežošanas ietekme uz mikrobioloģisko ūdens kvalitāti iekšējā dzeramā ūdens apgādē. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 33 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-12” 2024. gada 10. oktobra lēmumu, protokols Nr. 1/24.

Vāka attēls no *www.shutterstock.com*.

<https://doi.org/10.7250/9789934371349>

ISBN 978-9934-37-134-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 20. decembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 143. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Ph. D. Ilkka Miettinen

Nacionālais veselības un labklājības institūts (*THL*), Somija

Profesore *Dr. med.* Angelika Krūmiņa,

Rīgas Stradiņa universitāte, Latvija

Dr. sc. ing. Kristina Lebedeva,

Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Marta Zemīte (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 34 attēli, 21 tabula, kopā 112 lappuses. Literatūras sarakstā ir 130 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
1. TEORĒTISKĀ DAĻA	8
2. MATERIĀLI UN METODES.....	10
2.1. Mikrobioloģiski pieejamā fosfora kvantitatīva noteikšana	10
2.2. MAP koncentrācijas samazināšanas potenciāls	10
2.3. Pilot-pētījums	12
2.4. Analītiskās metodes.....	13
2.5. Statistiskā analīze un datu prezentācija	13
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	14
3.1. MAP kvantitatīva noteikšana, izmantojot bioanalīzes metodi	14
3.2. MAP daudzuma samazināšanas metodes	15
3.3. Ienākošā ūdens raksturojums	16
3.4. Ūdens kvalitāte iekšējā dzeramā ūdensapgādē.....	19
3.5. <i>Legionella</i> baktēriju kontrole daudzstāvu dzīvojamās ēkās	22
SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	22
DARBA APROBĀCIJA	29
Publikācijas	29
Konferences.....	29
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	31

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Pētījuma aktualitāte

Droša dzeramā ūdensapgāde no ūdens ņemšanas vietas līdz lietotāja krānam ir būtiska sabiedrības veselības komponente. Viens no plaši atzītiem veidiem, kā to sasniegt, ir bioloģiski stabila ūdens koncepcija (*van der Wielen* u. c., 2023). Šī pieeja koncentrējas uz būtisku barības vielu, piemēram, oglekļa, parasti asimilējamā organiskā oglekļa (*AOC*) veidā, un fosfora, mikrobioloģiski pieejamā fosfora (*MAP*) veidā, kontroli, lai saglabātu mikrobiālo stabilitāti ūdens sadales sistēmās.

Fosforam kā vienam no galvenajiem biogēnajiem elementiem, kas nepieciešams baktēriju augšanai, ir būtiska nozīme mikroorganismu vairošanās sekmēšanā. Tā samazināšana tiek uzskatīta par efektīvu veidu, kā ierobežot mikroorganismu augšanu un līdz ar to arī bioplēves veidošanos (*Vrouwenvelder* u. c., 2010) pat ar organisko oglekli piesātinātās vidēs. Tomēr pētījumi par to, kā *MAP* ierobežošana konkrēti ietekmē mikrobioloģisko ūdens kvalitāti patērētāju līmenī, ir nepietiekami. Tas ir īpaši svarīgi iekšējās dzeramā ūdensapgādes sistēmās, kur daudzi faktori – tostarp paaugstināta ūdens temperatūra, stagnācija nakts laikā, izzaru līnijas, augsta cauruļu virsmas-tilpuma attiecība un nepietiekama apkope – var saasināt ūdens kvalitātes problēmas (*Prest* u. c., 2016b).

Latvijā 65 % dzīvojamo ēku tika uzceltas laika posmā no 1961. līdz 2000. gadam, un 40 % tika uzbūvētas pirms 1980. gada (Centrālā statistikas pārvalde, 2021). Lai gan ēku apsaimniekotāji laika gaitā, iespējams, ir nomainījuši ūdens galvenās caurules, parasti, pārejot no dzelzs caurulēm uz plastmasas, dzīvokļu cauruļvadu sistēmas ir katra īpašnieka atbildība. Praksē šīs iekšējās caurules reti tiek uzturētas, kas var palielināt nosacīti patogēnu jeb oportūnistisko patogēnu mikroorganismu (*OPPP*) vairošanās risku. Latvijā augstāks *Legionella* baktēriju, kas ir vienas no izplatītākajām *OPPP* (*LeChevallier, Prosser* un *Stevens*, 2024), kolonizācijas līmenis sastopams dzīvojamās ēkās, salīdzinot ar sabiedriskajām ēkām (*Valciņa* u. c., 2019).

Šī pētījuma galvenais jautājums ir, vai *MAP* līmeņa samazināšana ienākošajā ūdenī var uzlabot ūdensapgādes drošību novecojošā dzīvojamo ēku infrastruktūrā. Ņemot vērā pieaugošās bažas par *OPPP*, piemēram, *Legionella* baktērijām, kas joprojām ir novērojams drauds karstā ūdensapgādes sistēmās, barības vielu līmeņa kontrole iekšējās cauruļvadu sistēmās var būt būtiska, lai nodrošinātu drošu ūdensapgādi.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis bija novērtēt *MAP* koncentrācijas samazināšanas ietekmi uz ūdens drošību patērētāju līmenī iekšējās dzeramā ūdensapgādes sistēmās.

Galvenie uzdevumi:

1. *MAP* daudzuma kvantifikācijas protokolu pielāgošana vietējiem apstākļiem.
2. Vienkārši uzstādāmu ūdens apstrādes metožu *MAP* samazināšanas potenciāla noteikšana.

3. **Izvēlētās metodes pielāgošana**, lai nodrošinātu tās drošu izmantošanu dzeramā ūdensapgādes sistēmā.
4. **Ūdens patēriņa paradumu un ienākošā ūdens kvalitātes analīze** dzīvojamās ēkās.
5. **Lokāli uzstādītas filtrācijas ierīces MAP samazināšanas potenciāla novērtēšana** iekšējā dzeramā ūdensapgādē daudzstāvu dzīvojamā ēkā.
6. **Ūdens kvalitātes izmaiņu analīze** gan aukstā, gan karstā iekšējā dzeramā ūdensapgādes sistēmā.
7. **Centralizētās ķīmiskās skalošanas un dezinfekcijas ietekmes novērtēšana** *Legionella* baktēriju daudzuma kontekstā iekšējā ūdensapgādē.
8. **MAP daudzuma samazināšanas ietekmes novērtēšana** uz mikrobioloģisko ūdens kvalitāti iekšējā dzeramā ūdens sadalē, kā ūdens drošības līmeņa izmaiņu rādītāju izmantojot kultivējamo *Legionella* baktēriju skaitu un īpašības.

Darba novitāte un praktiskais lietojums

Promocijas darba **zinātniskā novitāte** ir lokāli uzstādītas MAP daudzuma samazināšanas tehnoloģijas ieviešana dinamiskā vidē – reālā iekšējās ūdensapgādes sistēmā – un tās ietekmes novērtēšanā uz kultivējamajām *Legionella* baktērijām. Pētījuma rezultāti apšaubā pašreizējo biostabilitātes koncepciju, kas tradicionāli ir šauri definēta no barības vielu perspektīvas, neņemot vērā mikroorganismu savstarpējo konkurenci un vides faktoru. Cik zināms autorei, neviens iepriekšējais pētījums nav aplūkojis šādas MAP samazināšanas ietekmi pilna mēroga sistēmā.

Promocijas darba **pētījuma hipotēze**:

Samazinot MAP, kas ir baktēriju augšanai būtiskas barības vielas, tiks uzlabota iekšējās karstā dzeramā ūdensapgādes biostabilitāte un tiks kavēta potenciāli patogēno baktēriju, jo īpaši *Legionella* baktēriju, augšana.

Ja hipotēze apstiprināsies, **praktiskā nozīme** ir saistīta ar iespēju pielāgot *Legionella* baktēriju izplatības kontroles pasākumus – ne tikai regulējot temperatūru, bet arī pārvaldot barības vielu pieejamību. Šāda pieeja varētu ļaut izmantot mazāk energoietilpīgas stratēģijas, lai novērstu nevēlamu oportūnistisko patogēnu augšanu.

Struktūra un apjoms

Promocijas darbs ietver ievadu, teorētisko daļu, materiālu un metožu aprakstu, piecas pamatnodaļas ar rezultātiem un diskusijām, iekļaujot nodaļu secinājumus, kā arī vispārējos secinājumus.

1. nodaļa. Literatūras apskats, kas sniedz **teorētisko pamatu**.
2. nodaļa. Pētījumā izmantotie **materiāli un metodes**.
3. nodaļa. **MAP kvantifikācijas protokola pielāgošana** vietējiem apstākļiem.
Šī nodaļa galvenokārt atspoguļo raksta “*Microbially available phosphorus (MAP) determination method by flow cytometry approbation*” (Frolova u. c., 2017b)

saturu un ietver nepublicētus kalibrācijas datus ar dabīgo mikrobiālo inokulātu, kā arī papildu statistisko analīzi.

4. nodaļa. Pētījums par **MAP koncentrācijas samazināšanas potenciālu** pazemes ūdenī, izmantojot elektrokoagulāciju, biofiltrāciju un sorbciju uz dzelzs oksīda tipa sorbenta. Šajā nodaļā tiek vērtēta vienkārši ieviešamu ūdens attīrīšanas metožu piemērotība izmantošanai pilotpētījumā, kā arī **izvēlētās metodes pielāgošana**, lai maksimāli palielinātu sistēmas vienkāršību un materiālu drošību reālā dzeramā ūdensapgādes sistēmā.

Nodaļa galvenokārt balstās rakstā “*Evaluation of pre-treatment technologies for phosphorous removal from drinking water to mitigate membrane biofouling*” (Frolova u. c., 2017a) un daļēji rakstā “*Affordable Pretreatment Strategy for Mitigation of Biofouling in Drinking-Water Systems*” (Zemīte u. c., 2022) saturu, papildinātu ar nepublicētiem datiem.

5. nodaļa. **Ūdens patēriņa paradumu un ienākošā ūdens kvalitātes īpašību novērtējums.** Nodaļa daļēji balstās rakstā “*Effect of microbially available phosphorous removal on Legionella spp. in multi-storey residential dwellings in Latvia*” (Zemīte u. c., 2023) un ietver nepublicētus datus par ūdens patēriņu un ienākošā ūdens elektrovadītspējas svārstībām, kas noteiktas ar cauruļvadā iemontētu zondi.

6. nodaļa. **MAP samazināšanas filtra efektivitātes un ūdens kvalitātes izmaiņu novērtējums iekšējā dzeramā ūdens apgādes sistēmā.**

Nodaļa daļēji atspoguļo rakstu “*Effect of microbially available phosphorous removal on Legionella spp. in multi-storey residential dwellings in Latvia*” (Zemīte u. c., 2023) un ietver nepublicētus datus par ūdens kvalitātes atšķirībām starp ēkā ienākošā ūdens un izplūdes paraugu ņemšanas punktiem.

7. nodaļa. **Legionella baktēriju kontroles pasākumu efektivitātes analīze, kas ietver ēkas centralizēto ķīmisko skalošanu un dezinfekciju, kā arī MAP koncentrācijas samazināšanu ienākošajā ūdenī.**

Nodaļa galvenokārt balstās rakstā “*Effect of microbially available phosphorous removal on Legionella spp. in multi-storey residential dwellings in Latvia*” (Zemīte u. c., 2023).

1. TEORĒTISKĀ DAĻA

Sabiedrības veselībā balstīti mērķi nosaka tāda dzeramā ūdens piegādi, kas ir drošs lietošanai, nerada veselības riskus un kurā nav piesārņotāju un patogēnu (*WHO*, 2022). Lai gan dzeramais ūdens, kas tiek padots no ūdens sagatavošanas stacijām, parasti ir augstas kvalitātes, to bieži ietekmē sekundārais piesārņojums gan ārējās, gan iekšējās ūdensapgādes sistēmās (*Lehtola* u. c., 2004, 2007; *Zimoch* un *Paciej*, 2020; *Zimoch*, *Parafiński* un *Filipek*, 2023). Iekšējās ūdensapgādes dzeramā ūdens kvalitāti ietekmē līdzīgi, bet ekstremālāki, faktori nekā ārējās ūdensapgādes sistēmās, tostarp mazāks dezinfektanta dozas atlikums, augstākas temperatūras, ilgāks ūdens uzturēšanās laiks, daudzveidīgāki cauruļvadu materiāli un ievērojami mazāki cauruļu diametri, salīdzinot ar ārējiem tīkliem (*Prest* u. c., 2016b). Šādi apstākļi rada augstu cauruļvadu virsmas-tilpuma attiecību un labvēlīgākus apstākļus bioplēves attīstībai, kas veicina ūdens kvalitātes pasliktināšanos.

Lai uzlabotu dzeramā ūdens drošību, vairākās valstīs, piemēram, Nīderlandē, Šveicē, Dānijā, Vācijā un Beļģijā, daļa ūdensapgādes uzņēmumu koncentrējas uz bioloģiski stabila ūdens nodrošināšanu (*van der Wielen* u. c., 2023). Bioloģiski stabils ūdens raksturojas ar to, ka tas neveicina mikroorganismu augšanu ūdensapgādes laikā, tādējādi aizsargājot patērētāju drošību, saglabājot estētisko ūdens kvalitāti un novēršot tehniskos bojājumus, piemēram, no bioloģiskās aizsērēšanās, jebkurā ūdensapgādes posmā (*Rittmann* un *Snoeyink*, 1984; *Lautenschlager* u. c., 2013; *Prest* u. c., 2016b).

Lai veicinātu bioloģiski stabila ūdens apgādi, tiek izmantotas integrētas metodes, piemēram, hlorēšana, lai inhibētu baktēriju augšanu, un mikroorganismu attīstībai būtisku barības vielu, īpaši organiskā oglekļa un fosfora, ierobežošana (*Prest* u. c., 2016a). Barības vielu kontrole kļūst īpaši kritiska sezonālu temperatūras izmaiņu laikā, kas var ietekmēt biostabilitāti un palielināt baktēriju augšanu ūdensapgādes sistēmās (*Nescerecka*, *Juhna* un *Hammes*, 2018). Optimālā mikroorganismu augšanai nepieciešamo biogēno vielu molārā attiecība ir aptuveni $100\text{ C} : 10\text{ N} : 1\text{ P}$ (*LeChevallier*, *Schulz* un *Lee*, 1991). Lai gan fosfors veido tikai apmēram 3 % no baktēriju šūnas sausās masas (*Kushkevych*, 2022), tas ir būtisks tādām svarīgām bioloģiskām funkcijām kā enerģijas vielmaiņas nodrošināšana, šūnas membrānas uzbūve un ģenētiskā materiāla mantošana (*Santos-Beneit*, 2015).

Lai gan barības vielu ierobežošana baktēriju augšanas samazināšanai ūdensapgādē ir plaši pētīta, ar fosforu saistītie pētījumi joprojām ir limitēti. Daļēji tas ir saistīts ar to, ka mikroorganismu augšanu veicinošās barības vielas ir atkarīgas no vietas specifikas un var mainīties pat vienā ūdensapgādes tīklā (*Sathasivan* un *Ohgaki*, 1999; *Nescerecka*, *Juhna* un *Hammes*, 2018). Fosfora frakciju, ko mikroorganismi viegli var izmantot, sauc par mikrobioloģiski pieejamo fosforu (*MAP*), un to kvantitatīvi nosaka, izmantojot bioanalīzes metodi (*Lehtola* u. c., 1999). *MAP* pieejamība dzeramā ūdens tīklā ir atkarīga no vairākiem aspektiem, tostarp dzeramā ūdens avota, lietotās apstrādes metodes un pat sezonālajām svārstībām, kas var ietekmēt *MAP* samazinājumu ūdens attīrīšanas procesā (*Lehtola* u. c., 2002; *Jiang*, *Chen* un *Ni*, 2012; *Nescerecka*, *Juhna* un *Hammes*, 2018). Hidrauliskās uzturēšanās laiks ūdensapgādē var samazināt *MAP* koncentrāciju (*Jiang*, *Chen* un *Ni*, 2011), savukārt daži cauruļvadu materiāli, piemēram, jaunas šķērssavienojuma polietilēna (*PEX*) caurules, var

izdalīt fosforu ūdenī (*Inkinen u. c., 2014*). Turklāt *MAP* var nonākt sistēmās caur fosforu saturošiem korozijas inhibitoriem un antiskalantiem, veicinot bioplēves veidošanos (*Vrouwenvelder u. c., 2010*).

Ūdens attīrīšanas tehnoloģijas var ietekmēt *MAP* koncentrāciju. Piemēram, ozonēšana, dezinfekcija un kaļķošana var paaugstināt *MAP* līmeni, savukārt ķīmiskā koagulācija, granulētās aktivētās ogles filtrācija un augsnes filtrācija (jeb mākslīgā infiltrācija) var to samazināt (*Lehtola u. c., 2001, 2002; Wen u. c., 2014*). *MAP* sastāv gan no izšķīdušā, gan daļiņveida fosfora frakcijām, un attīrīšanas metodes ietekmē *MAP* un kopējā fosfora attiecību (*Jiang, Chen un Ni, 2012; Wen u. c., 2014*).

OPPP klātbūtne ir problemātiska iekšējās ūdensapgādes sistēmās, un tā var būt īpaši kaitīga personām ar novājinātu imūnsistēmu. *OPPP* ir gan patogēni, gan normāli dzeramā ūdens iemītnieki, kas ir pielāgojušies augšanai un noturībai dzeramā ūdensapgādes sistēmās (*Falkinham, 2015*).

Legionella pneumophila ir viena no visplašāk zināmajām *OPPP*. Leģionāru slimība joprojām pastāv kā novēršams veselības apdraudējums Eiropā. Ar to var inficēties, ieelpojot ūdens aerosolus, kas satur *Legionella* baktērijas. Tas var izraisīt smagu pneimoniju vai vieglāku gripai līdzīgu slimību, kas pazīstama kā Pontiaka drudzis (*Fields, Benson un Besser, 2002*). ES/EEZ 2021. gadā tika ziņots par kopumā 19 slimības uzliesmojumiem un 137 apstiprinātiem gadījumiem. Lielākā saslimstība tika novērota vīriešiem vecumā virs 65 gadiem, sasniedzot 8,9 saslimstības gadījumu skaitu uz 100 000 iedzīvotāju (*European Center for Disease Prevention and Control, 2023*). Turklāt daži modeļi paredz, ka tiek diagnosticēti tikai aptuveni 10 % saslimstību ar legionelozi (*Cassell u. c., 2019*).

2021. gadā Latvijā bija viens no augstākajiem leģionāru saslimstības rādītājiem Eiropā ($\geq 3,00$ uz 100 000; *European Center for Disease Prevention and Control, 2023*). Šeit visbiežāk konstatētā suga ir *Legionella pneumophila* (Valciņa u. c., 2019), kas kopumā izraisa aptuveni 90 % klīnisko infekciju (*Chauhan un Shames, 2021*). Turklāt Latvijā daudzdzīvokļu ēkās ir novērots augstāks *Legionella* baktēriju kolonizācijas līmenis, salīdzinot ar sabiedriskajām ēkām (Valciņa u. c., 2019). Turpmākajā pētījumā tika ziņots par *Legionella* baktēriju klātbūtni 112 no 200 paraugiem no daudzdzīvokļu ēkām (56 %), un 58 izolātu analizēs tika atklāti 420 virulences gēni, kas liecina par *Legionella* baktēriju augstu izplatību, plašu ģenētisko daudzveidību un plašu virulences diapazonu dzīvojamās ēkās (Valciņa u. c., 2023).

Fosfora, īpaši *MAP* frakcijas, samazināšana ūdens sistēmās var ierobežot bioplēves veidošanos un kontrolēt mikroorganismu, tostarp *Legionella* baktēriju, augšanu. Ierobežojot barības vielu pieejamību, fosfora samazināšanai ir potenciāls ierobežot gan planktonisko mikroorganismu, gan bioplēvju attīstību, kas savukārt varētu veicināt efektīvāku *Legionella* baktēriju kontroli ūdens sadales tīklos.

2. MATERIĀLI UN METODEDES

2.1. Mikrobioloģiski pieejamā fosfora kvantitatīva noteikšana

Mikrobioloģiski pieejamais fosfors (*MAP*) tika kvantificēts, izmantojot pielāgotu bioanalīzes metodi (Lehtola u. c., 1999; Wen u. c., 2016). Paraugi tika filtrēti (0,2 μm), karsēti 1 h 60 °C un papildināti ar acetāta oglekļa un sāļu šķīdumiem. Pēc tam paraugi tika inokulēti ar 10³ šūnām uz ml un inkubēti 30 °C temperatūrā, nepārtraukti maisot ar ātrumu 150 apgr. min⁻¹ piecas dienas, pēc kā veikta kvantitatīvā noteikšana. Visi paraugi tika sagatavoti trijos atkārtojumos. Kalibrācijas standartu sagatavošanai tika izmantots dinātrija fosfāta (Na₂HPO₄) šķīdums.

Kā inokulāts tika izmantota vai nu baktēriju tīrkultūra, konkrēti *Pseudomonas brenneri* P17 (ATCC 49642), vai arī jaukta baktēriju kultūra no tikko atvērtas dabīgā minerālūdens pudeles (*Evian*, *Danone*, Francija). Kvantitatīvai noteikšanai tika izmantota vai nu heterotrofo baktēriju koloniju skaitīšanas metode, vai arī plūsmas citometrija.

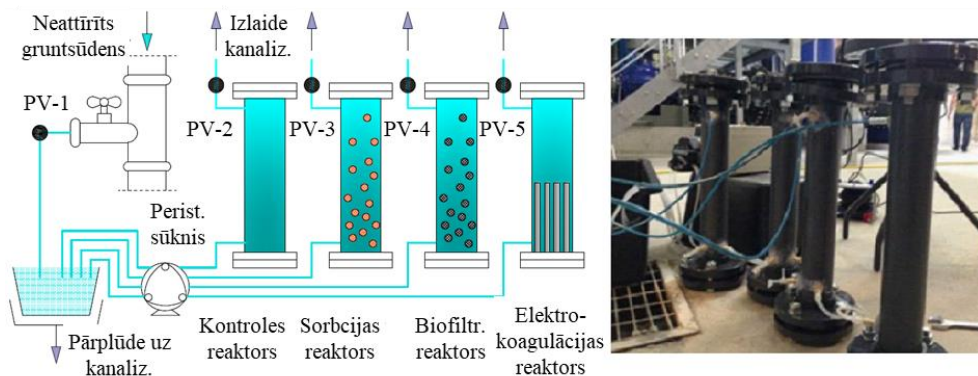
2.2. *MAP* koncentrācijas samazināšanas potenciāls

Ekspperimentu kopuma mērķis bija novērtēt vairāku salīdzinoši viegli ieviešamu metožu efektivitāti *MAP* koncentrācijas samazināšanai. Šīs metodes ietvēra sorbciju, biofiltrāciju un elektrokoagulāciju, un pētījums tika veikts trīs fāzēs.

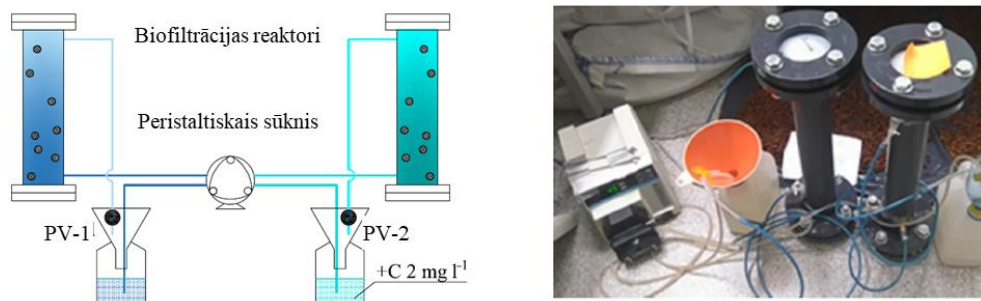
Pirmajā posmā polivinilhlorīda (*PVC*) reaktori ar metāla savienojumiem (diametrs – 7,5 cm, augstums – 50 cm) tika uzstādīti gruntsūdens maksīgās papildināšanas stacijā Baltezerā, Rīgā (2.1. att.). **Sorbcijas reaktors** saturēja plastmasas biomasas nesējus (*Bioflow 9*, *RVT Process Equipment*, Vācija), kas dabīgi pārklāti ar dzelzs oksīdiem, noņemot dzelzi no gruntsūdens. **Biofiltrācijas reaktorā** tika izmantoti līdzīgi biomasas nesēji, kas pārklāti ar bioplēvi, kas tika audzēta mēnesi, izmantojot 1/3 Daugavas upes ūdens un 2/3 krāna ūdens maisījumu. Maisījums tika ieliets sterilizētās stikla pudelēs pildītās ar bionesējiem, kas tika pārklātas ar alumīnija foliju, lai novērstu aļģu augšanu, un katru nedēļu tās tika sakratītas. **Elektrokoagulācijas reaktors** sastāvēja no četriem alumīnija elektrodiem (60/60 klase), kas bija novietoti 10 cm attālumā cits no cita, ar kopējo virsmas laukumu 622 cm², un to darbināja laboratorijas strāvas avots, sasniedzot strāvas blīvumu 4 mA cm⁻².

Otrajā fāzē tika izvērtēta temperatūras un papildu substrāta ietekme uz biofiltra darbību (2.2. att.). Gruntsūdens temperatūra ir suboptimāla baktēriju augšanai, tāpēc tika pārbaudīti paaugstinātas temperatūras apstākļi, kā arī pievienots acetāta ogleklis, lai pārbaudītu iespējamus uzlabojumus *MAP* samazināšanas efektivitātē.

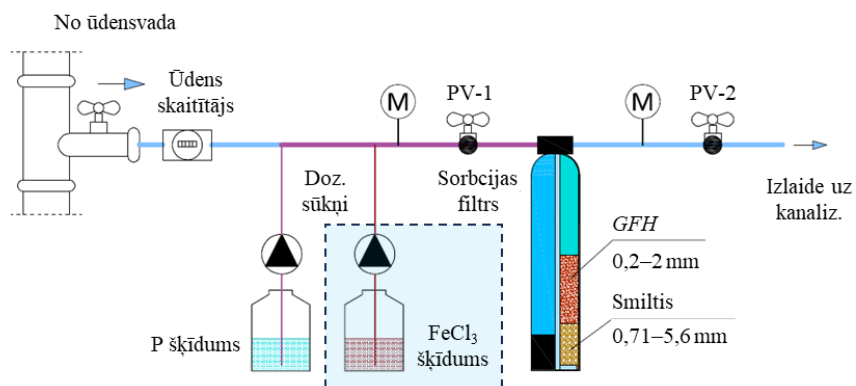
Noslēgumā tika pārbaudīta izvēlētā *MAP* samazināšanas metode laboratorijas mēroga iekārtā (2.3. att.), izmantojot komerciāli pieejamus materiālus, kas sertificēti dzeramā ūdens attīrīšanas procesiem.



2.1. att. Caurplūdes konfigurācijas reaktori gruntsūdens stacijā “Baltezers”. PV – paraugu ņemšanas vietas.



2.2. att. Recirkulācijas konfigurācijas biofiltrācijas reaktori. PV – paraugu ņemšanas vietas.



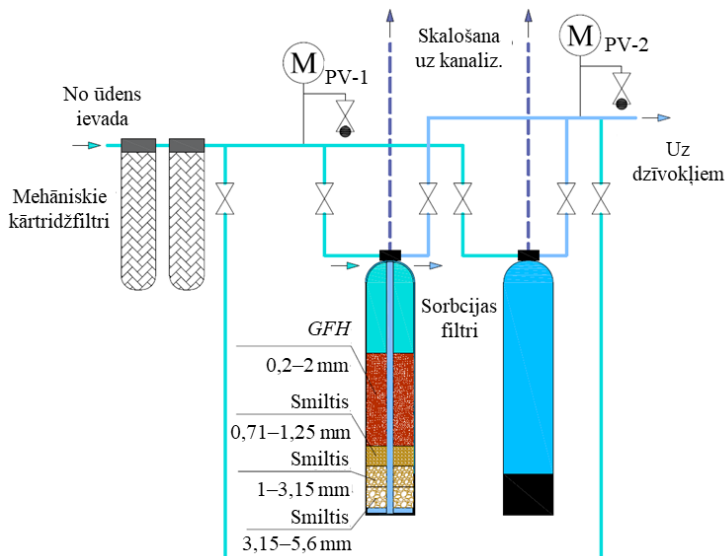
2.3. att. Laboratorijas mēroga filtrēšanas iekārta ar granulētā dzelzs hidroksīda (GFH) sorbcijas filtru, fosfora (P) koncentrāta dozēšanu un papildu FeCl_3 koagulanta dozēšanas sistēmu. PV – paraugu ņemšanas vietas.

2.3. Pilotpētījums

Pilotpētījuma objekts ietvēra divas piecstāvu dzīvojamās ēkas, kas atradās apmēram 100 metru attālumā viena no otras. Iekšējās ūdensapgādes sistēmā bija ietvertas apmēram 22 gadus vecas polipropilēna caurules. Ieplūdes ūdens bija no gruntsūdens ūdensguves vietām. Lai nodrošinātu līdzvērtīgu sākuma punktu, abās ēkās tika veikta centralizēta iekšējo ūdensvadu ķīmiskā skalošana un dezinfekcija. Sākotnēji, lai noņemtu nogulsnes, karstā ūdensapgādes (KŪ) cauruļvadu sistēma tika attīrīta ar fosfātus nesaturošu skābu reaģentu, kura aktīvā sastāvdaļa bija skudrskābe (*ALBILEX®-KALK-EX*, Vācija). Pēc tam tika izmantots dezinfekcijas līdzeklis (*ALBILEX®-SUPER-des*, Vācija), kas ietvēra ūdeņraža peroksīda un sudraba jonus. Tas tika ievadīts ienākošajā aukstā ūdenī, tādējādi nodrošinot gan aukstā, gan karstā dzeramā ūdensapgādes sistēmu dezinfekciju.

Karstais ūdens tika sagatavots plāksņu siltummaiņos, kas atradās individuālajos siltummezglos katras ēkas pagrabstāvā. Pirmajās 14 nedēļās siltummaiņi darbojās standarta temperatūras režīmā, iestatītā ūdens sagatavošanas temperatūra – 57 °C. Savukārt, sākoties apkures sezonai 2022. gada oktobra vidū, temperatūras iestatījums tika mainīts uz dinamisku režīmu kā enerģijas taupīšanas pasākums enerģētikas krīzes laikā. Šis režīms ietvēra trīs mainīgus temperatūras iestatījumus – 48 °C naktīs (23.00–7.00) no pirmdienas līdz piektdienai, 52 °C pārējā diennakts laikā un 57 °C brīvdienās.

Viena no ēkām tika aprīkota ar lokāli uzstādītu filtrācijas ierīci (*POU*) *MAP* samazināšanai ieplūdes ūdenī (2.4. att.). Šī ēka turpmāk apzīmēta kā “*POU* ierīces ēka”. Otrā ēka tika izmantota kā salīdzinājuma objekts un apzīmēta kā “References ēka”.



2.4. att. Granulētā dzelzs hidroksīda (*GFH*) sorbcijas filtru shēma, kas pieslēgti aiz esošajiem kārtidzju filtriem. PV – paraugu ņemšanas vietas. M – mehāniskie manometri filtra aizsērēšanās kontrolei. Attēls pielāgots no (Zemīte u. c., 2023).

Paraugi tika ņemti no četrām paraugu ņemšanas vietu kategorijām – virtuves krāni, kas reprezentēja iekšējā aukstā ūdensapgādes (AŪ) sistēmu, dušas galvas un cirkulācijas atgaitas ūdens pirms ieejas siltummainī, kas reprezentēja KŪ sistēmu, kā arī ēkas ietilpdes ūdens, ņemts netālu pēc ēkas ūdens ievada mezgla. POU ierīces ēkā tika ievākti paraugi arī izplūdē no sorbcijas filtra. Paraugus no dzīvokļiem ievāca iedzīvotāji, sekojot paraugu ņemšanas protokolam. Kopumā visi paraugi galvenokārt tika ievākti tajā pašā dienā, ar reti izņēmumiem, kas bija saistīti ar iedzīvotāju pieejamību. POU ierīces ēkā paraugu ņemšanā piedalījās piecu dzīvokļu iedzīvotāji – trīs piektajā stāvā, viens otrajā stāvā un viens pirmajā stāvā. References ēkā paraugi tika ņemti no trim dzīvokļiem – divi atradās piektajā stāvā, viens pirmajā stāvā.

2.4. Analītiskās metodes

Temperatūra tika mērīta uz vietas pilotpētījuma objektā tieši pēc paraugu ievākšanas. Elektrovadītspēja, pH, kopējais organiskais ogleklis (*TOC*), baktēriju šūnu koncentrācijas un *MAP* koncentrācija tika noteikti Ūdens sistēmu un biotehnoloģiju institūta laboratorijā, kur analīzes veica darba autore. Pilotpētījuma laikā noteiktās Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Fe un Pb koncentrācijas, kā arī kultivējamo *Legionella* baktēriju skaits un klasifikācija tika noteikti Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskajā institūtā “BIOR” (Rīga, Latvija).

2.5. Statistiskā analīze un datu prezentācija

Statistiskā analīze tika veikta, izmantojot *IBM SPSS Statistics* (23. versiju), nosakot divpusēju nozīmīguma līmeni $\alpha = 0,05$. Parametriskais *t* tests tika izmantots normāla sadalījuma gadījumā. Alternatīvi tika lietots neparametriskais *Mann-Whitney U* tests. Saistīto paraugu gadījumā, kas bija sorbcijas optimizācijas pētījuma paraugiem, normāla sadalījuma gadījumā tika izmantoti parametriskie pāru *t* testi vai alternatīvi neparametriskais *Vilkoksona* divu izlašu rangū tests. Standartu kalibrācijas līkņu novērtējumi tika veikti *MS Excel* programmā, savukārt parametriskās korelācijas, izmantojot *Pīrsona* koeficientu, tika veiktas arī *SPSS*.

Dati tika prezentēti saskaņā ar *SAMPL* vadlīnijām (*Lang un Altman, 2015*), norādot vidējo vērtību un standartnovirzi (*SD*) normāli sadalītiem datiem. Alternatīvi tika norādītas mediānas (*min-max*). Grafiskā vizualizācija tika veikta *MS Excel, Origin Pro 2019* un *SPSS* programmās.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. *MAP* kvantitatīva noteikšana, izmantojot bioanalīzes metodi

Heterotrofo baktēriju koloniju skaitīšanas metode (*HPC*) un plūsmas citometrijas metode (*FCM*), kā arī *Ps. brenneri* tīrkultūras un dabīgā minerālūdens baktēriju inokulāta izmantošana tika izvērtēta mikrobiāli pieejamā fosfora (*MAP*) kvantificēšanai vietējos laboratorijas apstākļos.

Šūnu kvantificēšanas metožu salīdzinājums. *HPC* un *FCM* šūnu skaitīšanas metodes parādīja statistiski nozīmīgu korelāciju ar $R^2 = 0,996$. *FCM* ļāva kvantificēt kopējo šūnu koncentrāciju, analizējot paraugus jebkurā brīdī inokulāta stacionārās augšanas fāzes laikā. Turpretī *HPC* būtiski bija specifiski paraugu ņemšanas laiki, kas ierobežoja tās elastīgumu, kā arī šī metode bija ievērojami laikietilpīgāka.

Inokulāta ietekme. *FCM* skaitīšanas metode ļāva izmantot dabīgo dzeramā ūdens mikroorganismu inokulātu, kas ietver dažādu mikrobu kopienas, spējīgu efektīvāk izmantot paraugā esošo *MAP* daudzumu. Vietējos apstākļos iegūtais baktēriju daudzuma pieauguma faktors, izmantojot dabīgo minerālūdeni, bija $3,0 \times 10^9$, kas ir vairāk nekā 10 reizes lielāks nekā tas, kas iegūts ar tīrkultūras inokulātu (3.1. tab.), tādējādi būtiski palielinot metodes jutīgumu. Tomēr bioanalīzes, kurās izmantotas dabiskās baktēriju kopienas, uzrādīja lielu nevienmērību gan laika gaitā, gan starp paraugu atkārtojumiem, kas prasīja ieviest datu atlases nosacījumus, lai uzlabotu precizitāti. Lai samazinātu noteikto kopējā šūnu skaita (*TCC*) vērtību izkliedi un nodrošinātu uzticamāku baktēriju skaita konversiju *MAP* koncentrācijās, tika izlemts izslēgt no vidējās parauga vērtības aprēķina tādus paraugus, kuros kopējais šūnu skaits parādīja vairāk nekā 30 % logaritmisko atšķirību no pārējiem diviem paraugiem trīs atkārtojumu ietvaros.

3.1. tabula

Inokulāta pieaugums *MAP* standartu testos

Inokulāts	Pieauguma faktors	Kvantificēšanas metode	Atsauce
<i>Ps. brenneri</i> P17	$1,3 \times 10^8$	<i>HPC</i>	Šis pētījums
<i>Ps. brenneri</i> P17	$3,2 \times 10^8$	<i>HPC</i>	(Polanska, Huysman un Van Keer, 2005)
<i>Ps. brenneri</i> P17	$3,7 \times 10^8$	<i>HPC</i>	(Lehtola u. c., 1999)
<i>Ps. brenneri</i> P17	$1,1 \times 10^9$	<i>HPC</i>	(Jiang, Chen un Ni, 2011)
<i>Ps. brenneri</i> P17	$1,6 \times 10^8$	<i>FCM</i>	Šis pētījums
<i>Ps. brenneri</i> P17	$1,8 \times 10^8$	<i>FCM</i>	(Wen u. c., 2016)
<i>Evian</i>	$9,4 \times 10^8$	<i>FCM</i>	(Wen u. c., 2016)
<i>Evian</i>	$3,0 \times 10^9$	<i>FCM</i>	Šis pētījums

3.2. MAP daudzuma samazināšanas metodes

Sākotnēji trīs metodes – elektrokoagulācija, sorbcija uz dzelzs bāzes materiāliem un biofiltrācija – tika testētas MAP frakcijas noņemšanai. Tālāk izvēlētā metode tika pielāgota, lai nodrošinātu drošu izmantošanu dzeramā ūdensapgādes sistēmā pilotpētījuma ēkā.

MAP samazināšanas efektivitāte kolonnu reaktoros. Elektrokoagulācija sniedza gandrīz pilnīgu MAP noņemšanu (3.2. tab.), taču tās izmantošanai bija vairāki tehniski ierobežojoši faktori, tostarp ievērojama dūņu veidošanās un nepieciešamība pēc rezerves barošanas sistēmas nepārtrauktas darbības nodrošināšanai strāvas pārtraukumu gadījumā.

Biofiltrācija dabiskā gruntsūdens temperatūrā nebija efektīva. Tomēr, paaugstinot ūdens temperatūru, tā spēja noņemt vidēji aptuveni 60 % MAP. Papildu oglekļa avota pievienošana neradīja būtiskus papildu uzlabojumus MAP samazināšanas efektivitātē (*Mann-Whitney* U tests, $p = 0,686$).

Sorbcija, izmantojot ar dzelzi pārklātus plastmasas nesējus (dzelzs noņemšanas procesā iegūts blakusprodukts), nodrošināja vairāk nekā 70 % MAP noņemšanu. Kā salīdzinoši efektīva un viegli ieviešama metode tā turpmāk tika pielāgota, lai nodrošinātu drošu izmantošanu pilotpētījuma apstākļos.

3.2. tabula

Izvēlēto ūdens apstrādes metožu MAP samazināšanas potenciāls

Metode	Ilgums, dienas	Paraugu sk.	Konfigurācija	Ūdens temp., °C	min / vidējais / max MAP samazinājums, %
Elektrokoagulācija	17	7	CT	8,1 ± 0,1	76 / 96 / 100
Sorbcija	17	9	CT	8,1 ± 0,1	32 / 71 / 87
Biofiltrācija	17	9	CT	8,1 ± 0,1	7 / 29 / 72
Biofiltrācija	1,9	6	RT	19,2 ± 0,3	0 / 61 / 92
Biofiltrācija	1,9	6	RT, +C	19,5 ± 0,5	11 / 68 / 88

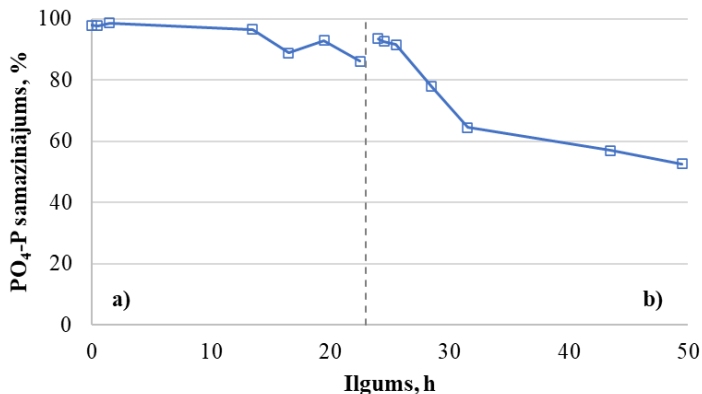
CT – caurplūdes tipa, RT – recirkulācijas tipa, +C – ar papildu acetāta oglekli (pievienotā koncentrācija 2 mg l⁻¹).

Sorbcijas optimizācija izmantošanai dzeramā ūdensapgādes sistēmā. Pirmkārt, no komerciāli pieejamām opcijām tika izvēlēts sertificēts sorbcijas materiāls uz dzelzs bāzes. Pēc tam tas tika novērtēts vidēja izmēra eksperimentālā iekārtā laboratorijas apstākļos. Visbeidzot, lai novērtētu iespējamu P noņemšanas efektivitātes uzlabošanu, kā arī nodrošinātu papildu barjeru P daudzuma samazināšanai, tika izvērtēta dzelzs hlorīda (FeCl₃) koagulanta dozēšana. Lai paātrinātu testu veikšanu un nodrošinātu ātrāku fosfora koncentrācijas noteikšanu, fosfors tika papildus dozēts un analizēs tika noteikts ortofosfātu P.

Granulētā dzelzs hidroksīda (GFH) sorbcijas filtrs vidēji noņēma 94 % dozētā PO₄-P (3.1. att.), nodrošinot samazinājumu no 0,55 mg l⁻¹ uz 0,01 mg l⁻¹. Ķīmiskās koagulācijas

izmantošana nedeva papildu uzlabojumus, savukārt koagulanta dozācija palielināja sistēmas sarežģītību, līdz ar to tā netika izvēlēta kā papildu metode.

Tādējādi *GFH* sorbcijas filtrs tika izvēlēts kā viegli instalējama un apkopjama P koncentrācijas samazināšanas iekārta, ko izmantot pilotpētījuma mērogā.

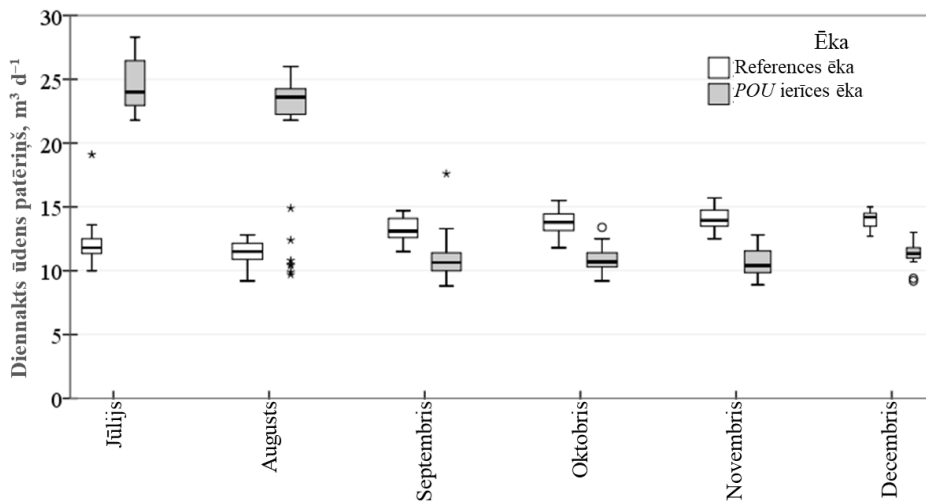


3.1. att. Granulētā dzelzs hidroksīda sorbenta PO₄-P samazināšanas efektivitāte a) bez papildu un b) ar papildu FeCl₃ koagulanta dozāciju.

3.3. Ienākošā ūdens raksturojums

Lai novērtētu, vai abas pilotpētījuma ēkas patērēja ūdeni līdzīgi, tika analizēti ūdens patēriņa paradumi un daudzumi, izmantojot datus no ūdens ievades mezgla skaitītāja, kas tika reģistrēti ar impulsa modeli (*Zenner*, Vācija) portālā ar 20 min laika soli, izmantojot *Metbox GSM/GPRS* attālinātās skaitītāju datu nolasīšanas ierīci (*Teliko*, Latvija). Savukārt, lai novērtētu, vai abas ēkas saņēma līdzīga sastāva ūdeni, katras ēkas ūdens ieklūdes caurulē tika uzstādīta elektrovadītspējas zonde (*Comeco Control & Measurement*, Bulgārija), un rādījumi tika reģistrēti ik pēc 10 min, izmantojot *GSM IoT* bezvadu datu reģistrētāju (*COMET System*, Čehija). Papildus tika veikta ieklūdes ūdens paraugu ņemšana un analīze.

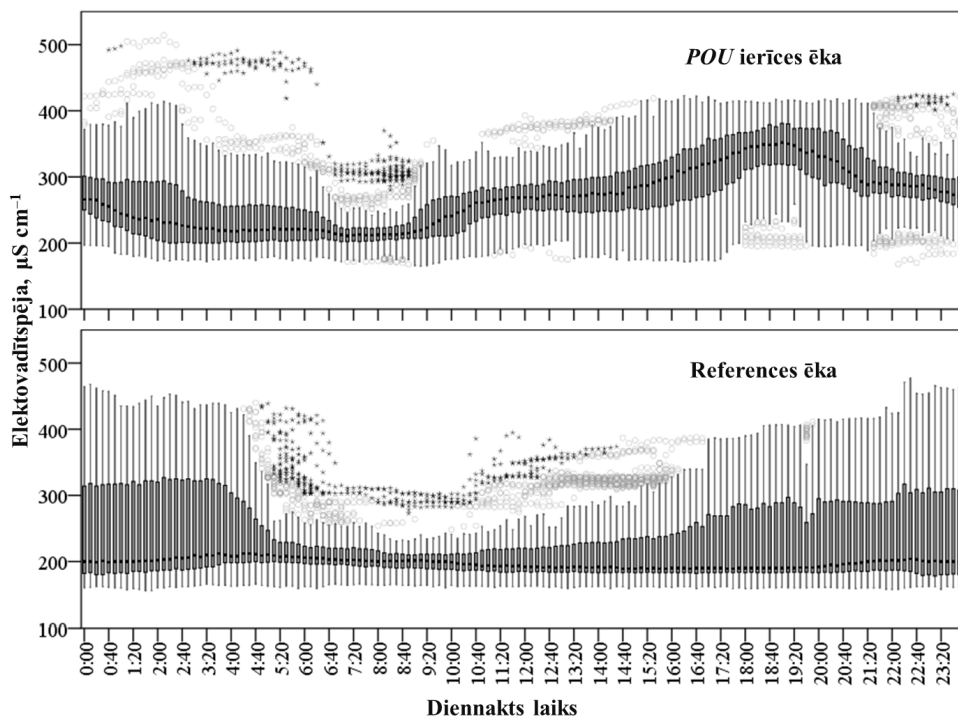
Ūdens patēriņa nevienmērība. Abas piecstāvu dzīvojamās ēkas uzrādīja līdzīgas, tipiski izkliedētas ikdienas ūdens patēriņa svārstības, kā tas ir sagaidāms iekšējo ūdensapgādes sistēmu gadījumā. Tomēr *POU* ierīces ēkā tika patērēts vairāk ūdens vasaras mēnešos (3.2. att.). Tas sekmēja to, ka pilotpētījuma veikšanas perioda beigās kopējais ūdens patēriņš *POU* ierīces ēkā bija par 250,6 m³ lielāks nekā References ēkā.



3.2. att. Statistiskie dati ūdens patēriņa svārstībām abās ēkās. Punkti atbilst novirzēm, zvaigznītes – ekstremālām novirzēm. Taisnstūru platums ir mērogots atbilstoši gadījumu skaitam ($n = 13-31$).

Ieplūdes ūdens no vairākām ūdensguves vietām. Ieplūdes ūdens elektrovadītspēja būtiski svārstījās gan diennakts laikā (3.3. att.), gan visa pilotpētījuma veikšanas perioda garumā, liecinot par jauktiem ūdens avotiem. Saskaņā ar ūdens piegādātāja hidrauliskā modeļa datiem, ūdens avoti atbilda mākslīgi papildināta pazemes ūdens sagatavošanas stacijai “Baltezers”, kur tiek izmantota bioloģiskā dzelzs un mangāna noņemšana un hlorēšana, un pazemes ūdens sūkņu stacijām “Zaķumuiža” un “Remberģi”, kas veic tikai dezinfekciju ar hloru bez citu attīrīšanas posmu nepieciešamības.

Lielākas elektrovadītspējas vērtības *POU* ierīces ēkas ieplūdē liecina par iespējamu atšķirību ūdens izcelsmē starp ēkām (*Mann-Whitney* U tests, $p < 0,05$), lai gan, izmantojot elektrovadītspēju kā vienīgo parametru, nevarēja sasaistīt rādījumus ar noteiktu ūdens avotu.



3.3. att. Elektrovadītspējas vērtību svārstības diennakts griezumā 22 nedēļu laikā *POU* ierīces ēkā (augšā) un References ēkā (apakšā). Punkti atbilst novirzēm un zvaigznes – ekstremālām novirzēm.

Ieplūdes ūdens sastāvs. Paņemtie ūdens paraugi, kas, visticamāk, atspoguļoja unikālu vairāku ūdens avotu maisījumu, kas bija tīklā paraugu ņemšanas brīdī, parādīja sezonālas svārstības temperatūrā, elektrovadītspējā un, nelielā mērā, arī pH. Kalcija, magnija, mangāna, vara, cinka, dzelzs un svina koncentrācijas saglabājās samērā stabilas pilotpētījuma norises laikā. *POU* ierīces ēkā tika konstatēta nedaudz augstāka kalcija koncentrācija (par $3,23 \text{ mg l}^{-1}$) un magnija koncentrācija (par $1,95 \text{ mg l}^{-1}$), savukārt vara līmenis bija zemāks (par $4,15 \text{ μg l}^{-1}$), salīdzinot ar References ēku.

TOC līmenis bija augstāks jūlijā, bet pēc tam saglabājās relatīvi nemainīgs. *POU* ierīces ēkā vidējā *TOC* vērtība bija par $0,93 \text{ mg l}^{-1}$ augstāka nekā References ēkā. *MAP* koncentrācijas mainījās visā paraugu ņemšanas periodā, kas, iespējams, liecina par dažādu ūdens avotu mainīgo *MAP* saturu. Vērtības abās ēkās svārstījās līdzīgi – no $3,3 \text{ μg l}^{-1}$ līdz $16,3 \text{ μg l}^{-1}$.

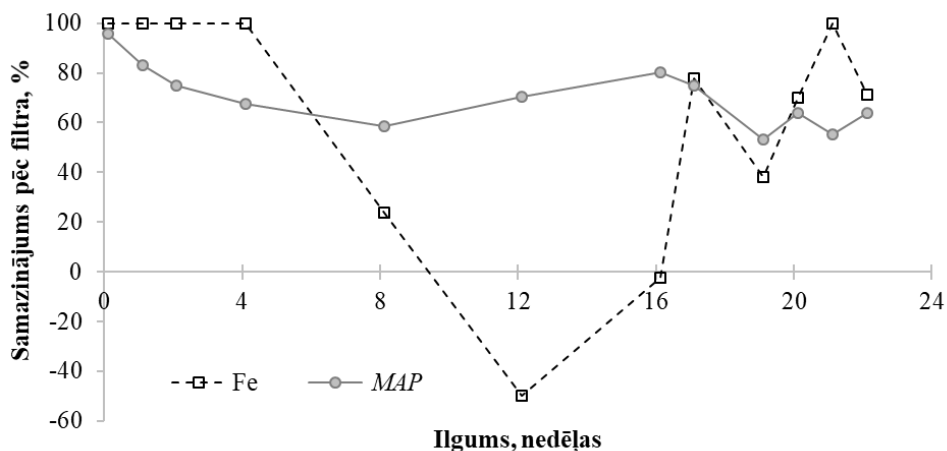
Mikroorganismu koncentrācijas analīze uzrādīja relatīvi stabilu zemu (*LNA*) un augsta (*HNA*) nukleīnskābju satura šūnu skaitu laika gaitā, taču tika novērota pieaugoša bojāto šūnu skaita proporcija, īpaši *POU* ierīces ēkā. *Legionella* baktērijas ieplūdes ūdens paraugos tika konstatētas reti, ar maksimālo koncentrāciju 400 CFU l^{-1} . Tomēr to klātbūtne apvienojumā ar iespējamu nepietiekamu novērtējumu, kas saistīts ar laikā izklīdētu paraugu ņemšanu, liecina par periodisku oportūnistisko patogēnu pieplūdi iekšējās ūdensapgādes sistēmās no ārējās ūdensapgādes.

Kopumā, lai gan abās ēkās bija vērojamas līdzīgi izkliedētas ūdens patēriņa svārstības, rezultātu analīze parādīja atšķirības kopējā ūdens patēriņa apjomā. Papildus tam atšķirības ienākošā ūdens kvalitātē liecināja par iespējamām atšķirībām ieplūdes ūdens avotos starp ēkām. Šie aspekti sarežģī pētījumu, ieviešot papildu nezināmo faktoru pilotmēroga pētījumā, apgrūtinot iegūto rezultātu izvērtēšanu. Šāda vairāku ūdens avotu klātesamība potenciāli varētu kalpot kā barības vielu apmaiņas rezervuārs, potenciāli ietekmējot ūdens kvalitāti iekšējās ūdensapgādes sistēmās. Turpmākajos pētījumos būtu jāņem vērā šādu dinamisku apstākļu papildu ietekme uz kopējo ūdens apgādes drošību.

3.4. Ūdens kvalitāte iekšējā dzeramā ūdensapgādē

Šajā nodaļā tika izvērtēta *POU* sorbcijas filtra darbības efektivitāte, kā arī vispārējās izmaiņas ieplūdes ūdens sastāvā, salīdzinot ar paraugiem, kas paņemti ūdens izlaides vietās.

Dzelzs hidroksīda sorbcijas filtra efektivitāte *MAP* samazināšanai ieplūdes ūdenī. Piecstāvu dzīvojamās ēkas ūdens ievadā tika uzstādīts granulētā dzelzs hidroksīda sorbcijas filtrs (*POU*), lai samazinātu *MAP* daudzumu ēkas ieplūdē. Filtrs konsekventi samazināja *MAP* koncentrāciju vidēji par 70 % (3.4. att.), kā rezultātā vidējā koncentrācija, kas nonāca iekšējās sadales tīklā, bija $3,56 \mu\text{g MAP l}^{-1}$ ($SD 1,5 \mu\text{g l}^{-1}$). Tas būtiski neietekmēja citus ūdens kvalitātes parametrus, izņemot dzelzi, kuras daudzums galvenokārt tika samazināts. Tomēr, visticamāk, hidraulisko svārstību dēļ, filtra izplūdē tika novērota periodiska dzelzs izskalošanās.



3.4. att. Mikrobioloģiski pieejamā fosfora (*MAP*) un dzelzs samazināšana ieplūdes ūdenī, izmantojot lokāli uzstādītu sorbcijas filtru (*POU*). Datu punkti ataino vidējās vērtības trīskāršajam parauga mērījumam. Attēls pielāgots no (Zemīte u. c., 2023).

Ūdens kvalitātes izmaiņas iekšējos tīklos. Iekšējā dzeramā ūdensapgāde ietver divas atsevišķas sistēmas – aukstā ūdensapgādes (AŪ) un karstā ūdensapgādes (KŪ). KŪ sistēma bieži ietver cirkulācijas līniju, kas sekmē ātrāku atbilstošas temperatūras ūdens nodrošināšanu izlaides vietās. Iekšējā ūdensapgādē tika novērotas izmaiņas vairākos ielūdes ūdens parametros (3.3. tab.).

3.3. tabula

Ielūdes ūdens kvalitātes parametru izmaiņas ($p < 0,05$) iekšējās karstā ūdensapgādes laikā

Parametrs	POU ierīces ēka, dušu galvas	POU ierīces ēka, cirkulācija	References ēka, dušu galvas	References ēka, cirkulācija
Fizikālie un ķīmiskie parametri				
Temperatūra	↑	↑	↑	↑
pH	→	↑	→	↑
Elektrovadītspēja	→	→	→	→
Ca	→	→	→	→
Mg	→	→	→	→
Mn	→	→	(↓)	→
Cu	↑	↑	↑	↑
Zn	↑	↑	↑	↑
Fe	(→)	↑	↓	↓
Pb	↑	(→)	↑	↑
Galvenie biogēnie elementi				
<i>TOC</i>	→	→	→	→
<i>MAP</i>	↓	↓	↓	↓
Mikrobioloģiskie parametri				
Kopējais šūnu skaits	↑	→	↑	→
Bojāto šūnu skaits	↑	→	↑	→
Veselo šūnu skaits	↑	→	↑	→
<i>LNA</i> šūnas	↓	↓	↓	↓
<i>HNA</i> šūnas	↑	↑	↑	↑
<i>L. pneumophila</i>	↑	↑	↑	↑
Iekavas norādīta potenciālo novirzi, jo tika novērota salīdzinoši liela maksimālās vērtības atšķirība, salīdzinot ar mediānu. Ierobežotā datu kopas lieluma dēļ netika izslēgtas paraugu novirzes.				
<i>TOC</i> – kopējais organiskais ogleklis; <i>MAP</i> – mikrobioloģiski pieejamais fosfors; <i>LNA</i> – zema nukleīnskābes saturs; <i>HNA</i> – augsta nukleīnskābes saturs.				

AŪ sistēmā ūdens temperatūra nakts laikā būtiski palielinājās ($p < 0,001$) termiskās izlīdzināšanās ar apkārtējās vides temperatūru dēļ. Tas savukārt var potenciāli negatīvi ietekmēt ūdens kvalitāti, veicinot mikroorganismu augšanu. Aukstā ūdensapgādes laikā pH nedaudz samazinājās, savukārt elektrovadītspēja palika nemainīga. *POU* ierīces ēkā veselo šūnu skaits pieauga par 35 %, sliecoties uz lēnāk augošām *LNA* baktēriju populācijām, kas liecina par oligotrofu baktēriju izplatīšanos nakts stagnācijas laikā.

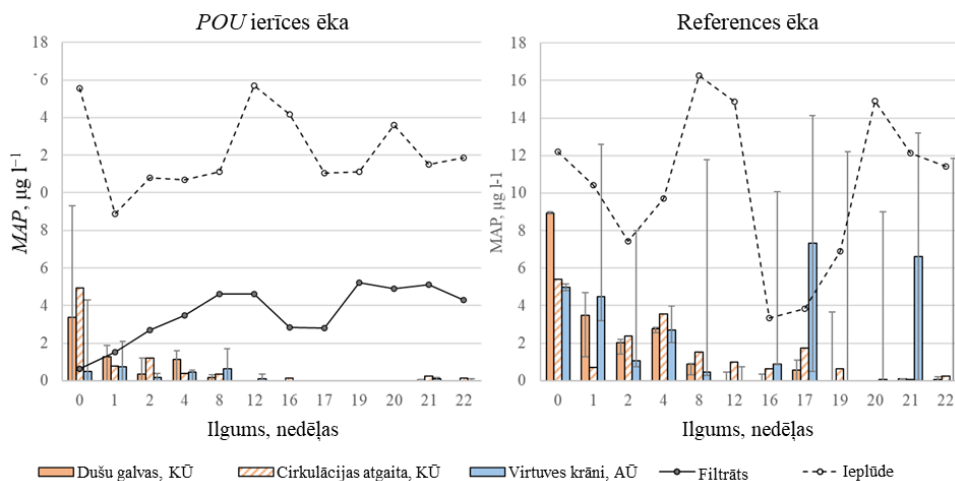
KŪ sistēmā ūdens sildīšana un sadale sekmēja vara koncentrācijas pieaugumu (par 93–232 $\mu\text{g l}^{-1}$) un cinka koncentrācijas palielināšanos (par 30–80 $\mu\text{g l}^{-1}$) ar mangāna, dzelzs un svina koncentrācijas svārstībām atkarībā no paraugu ņemšanas vietas. Mikrobioloģiskais sastāvs mainījās ar lielāku noslieci uz *HNA* frakciju, potenciāli liecinot par metaboliski aktīvāku baktēriju populāciju klātbūtni.

Nakts stagnācija dušas galviņās sekmēja ūdens atdzišanu un palielinātu mikroorganismu augšanu, kas rezultējās ar veselo šūnu skaita pieaugumu par 38–48 %. Tomēr *Legionella* baktēriju skaits neuzrādīja būtiskas atšķirības starp dušas galviņu un cirkulācijas atgaitas ūdens paraugiem.

Dažādi karstā ūdensapgādes temperatūras režīmi. Statiskā (57 °C) karstā ūdens uzsildes temperatūras iestatījuma laikā (0.–12. nedēļas paraugi), mikroorganismu koncentrācija gan dušu galviņās, gan cirkulācijas atgaitā bija līdzīga abās ēkās. Tomēr, pārejot uz dinamisko temperatūras režīmu (paraugi no 14.–22. nedēļai), parādījās ievērojamas atšķirības. *POU* ierīces ēkā dušu galviņu izplūdē bija vērojama lielāka bojāto šūnu koncentrācija, līdz ar to arī lielāks kopējais šūnu skaits nekā References ēkā. Līdzīgu tendenci atspoguļoja arī karstā ūdens cirkulācijas atgaitas ūdens paraugi, kuros savukārt bija arī lielāks veselo šūnu skaits un lielāks *HNA* šūnu īpatsvars nekā References ēkā.

***MAP* koncentrācijas samazināšanās iekšējos dzeramā ūdens sadales tīklos.** Pārsteidzoši, ka *MAP* koncentrācija būtiski samazinājās gan aukstā, gan karstā ūdensapgādes sistēmās abās ēkās neatkarīgi no filtra esamības (3.5. att.). *MAP* koncentrācijas samazināšanu potenciāli varēja sekmēt tādi faktori kā hidrauliskās uzturēšanās laiks, adsorbēšana uz cauruļvadu un savienojumu materiāliem, kā arī *MAP* varēja tikt patērēts mikroorganismu augšanas procesu nodrošināšanai.

Korelācijas analīze parādīja, ka *MAP*, iespējams, bija mikroorganismu augšanu ierobežojošais elements, jo īpaši *POU* ierīces ēkās karstā ūdensapgādes sistēmā, kur mikroorganismu skaita pieaugumu potenciāli sekmēja gan *MAP* pieejamība, gan temperatūra. Turpretī paraugi no dažām paraugu ņemšanas vietām References ēkā, kā gaidīts, liecināja par iespējamu organiskā oglekļa limitāciju.



3.5. att. Mikrobioloģiski pieejamā fosfora koncentrācijas dinamika. Dzīvokļu paraugiem dati attēlo mediānas vērtības, vertikālās līnijas atbilst diapazonam. Attēls pielāgots no (Zemīte u. c., 2023).

Patiesais *MAP* samazinājuma iemesls iekšējās dzeramā ūdensapgādes sistēmās joprojām ir neskaidrs, un tā noskaidrošanai nepieciešami turpmāki pētījumi, lai izprastu faktorus, kas veicina biogēno barības vielu samazināšanos gan karstā, gan aukstā ūdens cauruļvadu tīklos. Papildu izpēte nepieciešama, lai noskaidrotu bioloģisko un ķīmisko procesu relatīvo īpatsvaru šajā procesā. Kopumā, virsmas-tilpuma attiecībai ir būtiska nozīme, ne tikai veicinot bioplēves veidošanos, kas savukārt ietekmē baktēriju augšanas dinamiku, bet arī nosakot, kuras barības vielas kļūst limitējošas.

3.5. *Legionella* baktēriju kontrole daudzstāvu dzīvojamās ēkās

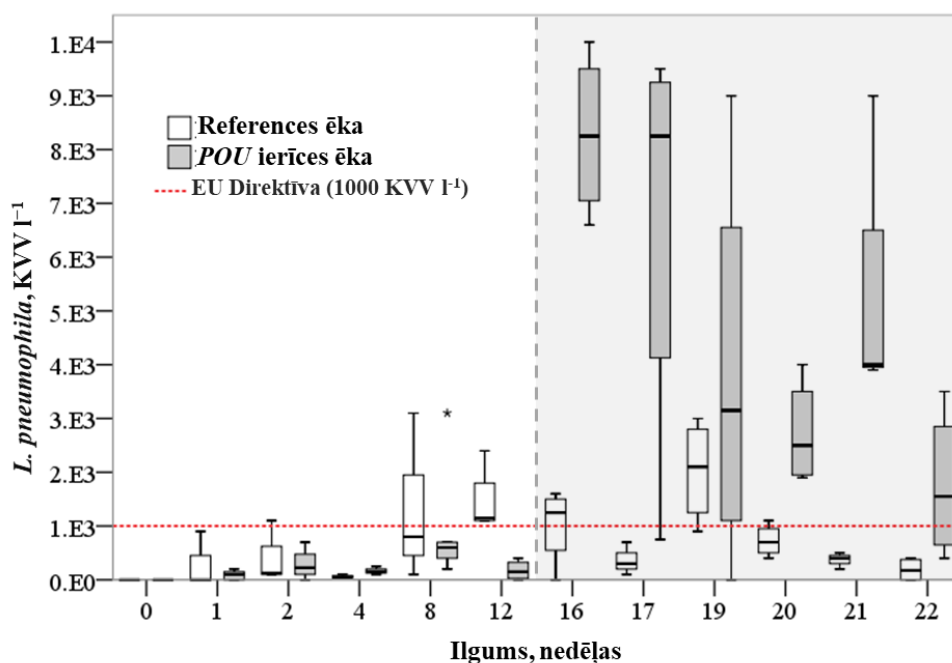
Šajā nodaļā tika izvērtēta *Legionella* baktēriju kontroles pasākumu, kuros ietilpa centralizēta cauruļvadu ķīmiskā skalošana un dezinfekcija, efektivitāte, kā arī lokāli uzstādītā *MAP* sorbcijas filtra ietekme. Papildus tika novērtēta analizēto ūdens paraugu kopējā atbilstība normatīvu vērtībām.

Centralizētas ķīmiskās skalošanas un dezinfekcijas efektivitāte. Centralizētā ķīmiskā skalošana ar skudrskābes reaģentu, kam sekoja dezinfekcija ar ūdeņraža peroksīdu un sudraba jonus saturošu līdzekli, bija efektīva, lai īslaicīgi novērstu kultivējamo *Legionella* baktēriju klātbūtni. Tomēr jau pēc nedēļas tās tika konstatētas 36 % ūdens paraugu (3.6. att.). References ēkā visu paraugu vidējā *Legionella* baktēriju koncentrācija pārsniedza ES Direktīvas robežvērtību (1000 KVV l^{-1}) pēc diviem mēnešiem, savukārt *POU* ierīces ēkā sākotnējais šo baktēriju pieaugums bija zemāks. Kopumā, lai gan centralizēta dezinfekcija ir efektīva īstermiņā, tā nav pietiekama ilgstošai *Legionella* baktēriju kontrolei.

Sorbcijas filtra un siltummaiņa temperatūras iestatījumu ietekme. MAP sorbcijas filtrs būtiski nesamazināja *Legionella* baktēriju koncentrāciju standarta temperatūras režīma laikā, taču pēc ūdens uzsildes režīma maiņas uz dinamisko *POU* ierīces ēkā tika novērots gandrīz desmitkārtējs kultivējamo *Legionella* baktēriju pieaugums (3.6. att.). Tas, visticamāk, bija savstarpēji saistīts ar tādiem faktoriem kā:

- 1) barības vielām bagātāku ieplūdes ūdeni (augstāka *TOC*, magnija un veselo šūnu koncentrācija, salīdzinot ar References ēku);
- 2) izmaiņām savstarpējā mikroorganismu konkurences balansā, ko izraisīja barības vielu pieejamības trūkums;
- 3) svārstībām karstā ūdensapgādes sistēmas temperatūrā, kas sekmēja termofilas vides nomaiņu uz mezofilu vidi, labvēlīgu *Legionella* baktēriju augšanai.

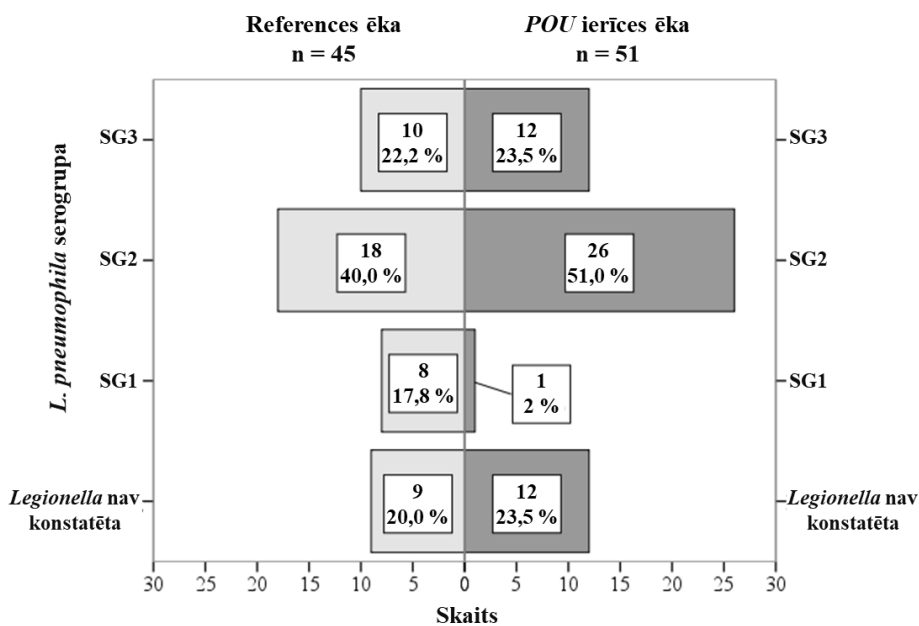
Korelācijas analīze parādīja vāju līdz mērenu sakarību starp *Legionella* baktēriju koncentrāciju un tādiem ūdens kvalitātes parametriem kā *TOC*, *MAP* un magnijs. Pētījumā tika konstatēta arī pozitīva korelācija starp *Legionella* baktērijām un dzelzs līmeni References ēkā, kas liecina par mikroelementu ietekmi uz mikroorganismu augšanas dinamiku.



3.6. att. Statistiskie dati ar kultivējamo *Legionella* baktēriju skaitu KŪ sistēmas ūdens paraugos statiskā (0–14 nedēļas) un dinamiskā (14–22 nedēļas) temperatūras iestatījuma laikā. Zvaigznīte – ekstremāla novirze, kas šajā gadījumā atbilst cirkulācijas atgaitas paraugam. Attēls pielāgots no (Zemīte u. c., 2023).

KŪ temperatūras pazemināšana zem termofilās robežas veicināja *Legionella* baktēriju vairošanos, savukārt periodiskas termiskas apstrādes, kas tika veiktas nedēļas nogalēs, varēja veicināt barības vielu izdalīšanos, tādējādi papildus stimulējot *Legionella* baktēriju izplatību. Neskatoties uz temperatūras paaugstināšanu dinamiskajā temperatūras iestatījumā, barības vielu dinamika un mikroorganismu savstarpējās konkurences līdzsvara traucējumi radīja *Legionella* baktērijām labvēlīgu vidi īpaši *POU* ierīces ēkā, uzsverot šī oportūnistiskā patogēna kontroles sarežģītību mainīgas vides apstākļos.

***Legionella* baktēriju sugu raksturojums.** Vienīgā konstatētā suga pēc ēkas skalošanas bija *Legionella pneumophila*. Visizplatītākais serogrupas (SG) veids, kas tika konstatēts abās ēkās, bija *Legionella pneumophila* SG 2, kas bija sastopams 51 % KŪ sistēmas paraugos *POU* ierīces ēkā un 40 % KŪ sistēmas paraugos References ēkā (3.7. att.). *MAP* sorbcijas filtra ieviešana, iespējams, sekmēja satopamo *Legionella pneumophila* veidu, potenciāli sekmējot ne-SG1 subtipu sastopamību *POU* ierīces ēkā, jo SG1 tika biežāk konstatēts References ēkā. Tas potenciāli norāda, ka sorbcijas filtrs, iespējams, var samazināt noteiktus *Legionella* baktēriju subtipus (SG1), kas atbildīgi par lielāko daļu saslimšanas gadījumu. Tomēr barības vielu ierobežošanas ietekmei uz *Legionella* baktēriju serogrupām nepieciešama papildu izpēte.



3.7. att. Kopējais *Legionella pneumophila* serogrupu biežums paraugos, kas ņemti no abām karstā ūdensapgādes apakšsistēmām.

Normatīvā atbilstība. Piekļuve drošam dzeramajam ūdenim ir būtiska sabiedrības veselībai. Lai gan dzeramā ūdens apstrāde parasti veicina droša ūdens padevi, ūdens kvalitāte var pasliktināties iekšējās cauruļvadu sistēmās tieši pirms nonākšanas pie patērētāja.

Veiktais pilotpētījums liecināja par augstām *Legionella pneumophila* koncentrācijām, kas pārsniedza vadlīnijās noteikto robežu 1000 KVV l⁻¹ abās pētījuma ēkās. Daži paraugi norādīja pārsniegtas robežvērtības mangāna, vara, dzelzs un svina koncentrācijās, taču tie galvenokārt bija saistīti ar cauruļvadu izskalošanos pēc ķīmiskās tīrīšanas procedūrām un tādējādi neradīja ilgtermiņa veselības riskus. Tomēr daži paraugi liecināja arī par paaugstinātām elementu koncentrācijām ēku ienākošajā ūdenī.

Lai uzlabotu ūdens drošību, būtu nepieciešama obligāta dzeramā ūdens kvalitātes uzraudzība arī ēku līmenī, lai proaktīvi identificētu un novērstu potenciālus veselības riskus, nodrošinot to, ka arī ūdensapgādes pēdējos posmos tiek ievēroti drošības standarti.

SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Galvenā mērķa adresēšana

Plaši izmantotā biostabila ūdens piegādes koncepcija, samazinot augšanu veicinošu barības vielu, tostarp bioloģiski pieejamā fosfora (*MAP*), daudzumu, var novērst ūdens kvalitātes pasliktināšanos. Šī koncepcija nosaka, ka ūdens mikrobioloģiskajam sastāvam ūdensapgādes laikā jābūt nemainīgam, un līdzīgs princips var tikt attiecināts arī uz *Legionella* baktēriju un citu oportūnistiski patogēno ūdens mikroorganismu augšanu. Tomēr šāds princips varētu būt efektīvs tikai tad, ja sistēma ir stabila, tajā nav neparedzētu izmaiņu.

Šajā pētījumā dinamiskais karstā ūdensapgādes siltummaiņa iestatījums sekmēja ievērojamu *Legionella* baktēriju skaita pieaugumu ēkā, kurā papildus tika samazināts *MAP*, un to koncentrācija pārsniedza kontroles ēkas līmeni vairāk nekā desmitkārtēji. **Līdz ar to hipotēze, ka *MAP* ierobežošana vien varētu kavēt *Legionella* baktēriju augšanu, tika noraidīta.**

Attiecībā uz **galveno mērķi**, lai gan *MAP* ierobežošana varētu būt efektīva stabilos apstākļos, kur dominē nepatogēnie organismi, šo apstākļu uzturēšana praksē ir izaicinājums. To sarežģī sezonālās svārstības, apkopes darbi un sistēmu darbības izmaiņas. Tāpēc uzmanība būtu jāpievērš nevis vienkāršai barības vielu ierobežošanai, bet gan selektīvas vides inženiertehniskai izveidei, kas sekmētu nepatogēno organismu augšanu.

Galvenie secinājumi

1. *MAP* samazināšana par 70 % līdz $3,56 \mu\text{g MAP l}^{-1}$ (SD $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$) ar granulētā dzelzs hidroksīda sorbcijas filtru nebija pietiekama, lai samazinātu *Legionella pneumophila* izplatību, kad sistēma tika pakļauta dinamiskam temperatūras režīmam (48°C , 52°C un 57°C), taču filtra esamība, iespējams, sekmēja *Legionella* baktēriju sastopamo sugu maiņu uz ne-SG1 subtipiem.
2. Ēkas tika apgādātas ar atšķirīga sastāva ūdeni, kas nāca no dažādiem ūdensguvju avotiem un atšķīrās pēc elektrovadītspējas, Ca, Mg, Cu, TOC un bojāto šūnu skaita vērtībām.
3. *MAP* samazinājās līdz zemām vērtībām iekšējās ūdensapgādes sistēmā. Temperatūras, pH, Cu, Zn, Fe, Pb un mikrobiālo parametru vērtības arī mainījās karstā un aukstā ūdensapgādes sistēmās.
4. Centralizēta ķīmiskā ēku skalošana un dezinfekcija bija efektīva divus mēnešus, pēc tam *Legionella* baktēriju vidējās vērtības pārsniedza EU Direktīvas noteiktās 1000 KVV l^{-1} , turklāt *Legionella* baktērijas tika konstatētas paraugos jau pēc nedēļas un periodiski sasniedza Direktīvas robežvērtības pēc divām nedēļām References ēkā.
5. *Legionella* baktēriju daudzums palielinājās vairāk nekā desmitkārt *MAP* ierobežotajā ēkā, bet īpaši nemainījās ēkā bez papildu *MAP* samazināšanas. To potenciāli var izskaidrot ar r/K teoriju, kad temperatūras pazemināšanās radīja optimālus apstākļus, ļaujot *Legionella pneumophila* pārspēt barības vielu trūkuma nomāktos pārējos mikroorganismus. Šo stāvokli pastiprināja periodiska temperatūras paaugstināšana līdz 57°C , kas varēja izraisīt

fosfora apriti fosfora limitētajā sistēmā, tādējādi vēl vairāk veicinot strauju *Legionella* baktēriju augšanu.

Pētījuma trūkumi

1. Nelielais paraugu ņemšanas vietu skaits, ko izraisīja ierobežotā iedzīvotāju vēlme piedalīties, mazināja iespēju iegūt statistiski pietiekamus datus un samazināja potenciālu identificēt skaidras tendences.
2. Ierobežotais ēku skaits, kas tika iekļauts pētījumā, ierobežoja iespēju salīdzināt rezultātus dažādās vidēs. Lielāka izlase būtu devusi labāku ieskatu par atrašanās vietas, ūdens lietošanas paradumu un ienākošā ūdens kvalitātes ietekmi uz rezultātiem.
3. Ienākošā ūdens sastāva mainīgums, kas radās no dažādu avotu iekļūdes ūdens, sarežģīja pētījuma dinamisko, reālo testēšanas vidi.
4. Nepietiekams paraugu ņemšanas biežums, ko izraisīja ierobežotās paraugu apstrādes un analīzes iespējas, ietekmēja spēju noteikt *Legionella* baktēriju skaita dinamiku.
5. Ierobežotais mikrobioloģisko analīžu apjoms – metagenoma analīze un *qPCR* iekļaušana kopā ar kultivējamo *Legionella* baktēriju noteikšanu – būtu sniedzis dziļāku izpratni par mikroorganismu sugu dinamiku.
6. Ierobežots ķīmisko analīžu klāsts; pievienojot tādus rādītājus kā asimilējamais organiskais ogleklis, būtu iespējams gūt papildu ieskatu par barības vielu dinamiku sistēmā.

Plašāka nozīmība un turpmākie pētījumi

Pilotmēroga pētījums parādīja sarežģītas mijiedarbības iekšējās ūdensapgādes sistēmās. Iegūtie rezultāti apšaubā pieņēmumu par tiešu mijiedarbību starp *MAP* un citām baktērijām – lai prognozētu baktēriju vairošanos ūdens sistēmās, ir nepieciešama niansētāka izpratne par mikroorganismu savstarpējo konkurenci un nišu diferenciaciju.

Turpmākajos pētījumos galvenā uzmanība jāpievērš tam, lai uzlabotu izpratni par mikroorganismu savstarpējo konkurenci attiecībā uz barības vielu pieejamību dzeramā ūdensapgādē, jo īpaši saistībā ar r/K selekcijas teoriju, kas izriet no makroekoloģijas. Galvenā uzmanība būtu jāpievērš labvēlīgu apstākļu noteikšanai, kas dod attīstības priekšroku nišas aizpildīšanai “K stratēģistiem” (jeb nekaitīgiem mikroorganismiem), salīdzinot ar “r stratēģistiem” (jeb oportūnistiskiem patogēniem), tādējādi uzlabojot dzeramā ūdens drošību.

Daži specifiski aspekti, kam jāpievērš papildu uzmanība turpmākos pētījumos:

- Iepriekš pētīto mikroorganismu augšanu veicinošo barības vielu, piemēram, oglekļa un fosfora, ietekmes izpēte uz mikroorganismu savstarpējo konkurenci, īpaši dinamiskā vidē, ko ietekmē ūdens temperatūras svārstības. To var veikt, kombinējot matemātisko modelēšanu un laboratorijas pētījumus.
- Oligotrofu dzeramā ūdens baktēriju pieradināšanas pētījumi, lai sekmētu turpmāku eksperimentu veikšanas iespēju kontrolētos apstākļos.

- Paplašināts paraugu analīžu klāsts, iekļaujot metodes, kas apraksta gan iekššūnu procesus, gan mikroorganismu kopienas kopējo dinamiku.

DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas

1. **Frolova, M.**, Zemītis, J., Tihomirova, K., Mežule, L., Rubulis, J., Gruškeviča, K. un Juhna, T. (2017) “Approbation of microbially available phosphorus (MAP) determination method by flow cytometry”, no *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Rezekne, Latvia, lpp. 89–92. Pieejams: <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2533>.
2. **Frolova, M.**, Tihomirova, K., Mežule, L., Rubulis, J., Gruškeviča, K. un Juhna, T. (2017) “Evaluation of pre-Treatment technologies for phosphorous removal from drinking water to mitigate membrane biofouling”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012127>.
3. **Zemīte, M.**, Mežule, L., Gruskevica, K., Kokina, K., Rubulis, J., Juhna, T., Gottschalk, N., Dömer, F., Jagau, R., Röwe, K., Augustin, W., Scholl, S., Pereira, A., Barros, A. C., Machado, I. un Melo, L.F. (2022) “Affordable Pretreatment Strategy for Mitigation of Biofouling in Drinking-Water Systems”, *Journal of Environmental Engineering*, 148 (2). Pieejams: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001968](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001968).
4. **Zemīte, M.**, Pūle, D., Kiriljina-Gūtmane, O., Ķimse, L., Strods, M., Zemītis, J. J., Mežule, L., Valciņa, O. un Juhna, T. (2023) “Effect of microbially available phosphorous removal on Legionella spp. in multi-storey residential dwellings in Latvia”, *Environmental Science: Water Research and Technology*, 10 (1), lpp. 193–204. Pieejams: <https://doi.org/10.1039/d3ew00588g>.

Konferences

- RTU 57. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Viedās biotehnoloģijas”; prezentācija: **Membrānu aizsērēšanas novēršana, izmantojot biotehnoloģijas**. 17.10.2016, Rīga, Latvija.
- RTA 11. starptautiskā zinātniski praktiskā konference “Vide. Tehnoloģijas. Resursi”; prezentācija: **Mikrobiāli pieejamā fosfora (MAP) noteikšanas metodes aprobācija izmantojot plūsmas citometriju**. 15.–17.06.2017, Rēzekne, Latvija.
- 3. starptautiskā konference “Inovatīvi materiāli, konstrukcijas un tehnoloģijas”; stenda referāts: **Ekonomiski pieejamas tehnoloģijas membrānu (bio)aizsērēšanās mazināšanai, optimizējot priekšapstrādes metodes**. 27.–29.09.2017, Rīga, Latvija.
- RTU 58. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas”; prezentācija: **Fosfora recirkulācija spiediena vadītās membrānu filtrācijas sistēmās**. 12.10.2017, Rīga, Latvija.
- Seminārs “Viedās biotehnoloģijas”; prezentācija: **Bioreaktori – priekšapstrādes metode membrānu tehnoloģijām**. 18.04.2018, Rīga, Latvija.

- RTU 59. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas”; prezentācija: **Polifosfātu uzkrāšanās dzeramā ūdens baktērijās**. 19.10.2018, Rīga, Latvija.
- RTU 61. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Būvzinātne”; prezentācija: **Dzeramā ūdens bioloģiskās stabilitātes palielināšana iekšējos tīklos**. 22.10.2020, *online*.
- Seminārs “Bioenerģijas tehnoloģijas un biotehnoloģijas”; prezentācija: **Dzeramā ūdens bioloģiskā stabilitāte**. 21.10.2021, *online*.
- RTU 63. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija “Būvzinātne”; prezentācija: **Pilotmēroga pētījums par *Legionella* baktēriju augšanas inhibīcijas efektivitāti ar dzelzs hidroksīda priekšapstrādi**. 10.11.2022, Rīga, Latvija.

LITERATŪRAS SARAKSTS

Cassell, K., Gacek, P., Rabatsky-Ehr, T., Petit, S., Cartter, M. un Weinberger, D.M. (2019) "Estimating the True Burden of Legionnaires' Disease", *American Journal of Epidemiology*, 188 (9), 1686.–1694. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1093/aje/kwz142>.

Centrālā statistikas pārvalde (2021) "Tradicionālie mājokļi pēc ēkas uzcelšanas laika un nodrošinājuma ar labierīcībām reģionos, republikas pilsētās, novados un apkaimēs – Ēkas uzcelšanas laiks, Laika periods un Mājokļa apdzīvotība".

Chauhan, D. un Shames, S. R. (2021) "Pathogenicity and Virulence of Legionella: Intracellular replication and host response", *Virulence*, 12 (1), 1122. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1080/21505594.2021.1903199>.

European Center for Disease Prevention and Control (2023) *Legionnaires' disease, ECDC. Annual Epidemiological Report for 2021*. Stockholm: ECDC.

Falkinham, J. O. (2015) "Common Features of Opportunistic Premise Plumbing Pathogens", *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12 (5), 4533.–4545. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/ijerph120504533>.

Fields, B. S., Benson, R. F. un Besser, R. E. (2002) "Legionella and legionnaires' disease: 25 Years of investigation", *Clinical Microbiology Reviews*. American Society for Microbiology (ASM), 506.–526. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1128/CMR.15.3.506-526.2002>.

Frolova, M., Tihomirova, K., Mežule, L., Rubulis, J., Gruškeviča, K. un Juhna, T. (2017a) "Evaluation of pre-Treatment technologies for phosphorus removal from drinking water to mitigate membrane biofouling", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012127>.

Frolova, M., Zemītis, J., Tihomirova, K., Mežule, L., Rubulis, J., Gruškeviča, K. un Juhna, T. (2017b) "Approbation of microbially available phosphorus (MAP) determination method by flow cytometry", no *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Rezekne, Latvia, 89.–92. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2533>.

Jiang, D., Chen, Y. un Ni, G. (2011) "Effects of Total Phosphorus (TP) and Microbially Available Phosphorus (MAP) on Bacterial Regrowth in Drinking Water Distribution System", *Systems Engineering Procedia*, 1, 124.–129. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.08.021>.

Jiang, D., Chen, Y. un Ni, G. (2012) "Phosphorus in Drinking Water And It's Removal in Conventional Treatment Process", 461, 453.–456. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.461.453>.

Kushkevych, I. (2022) *Bacterial Physiology and Biochemistry, Bacterial Physiology and Biochemistry*. Elsevier. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/C2022-0-00345-7>.

Lang, T. A. un Altman, D. G. (2015) "Basic statistical reporting for articles published in Biomedical Journals: The "Statistical analyses and methods in the published literature" or the SAMPL guidelines", 5.–9. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2014.09.006>.

Lautenschlager, K., Hwang, C., Liu, W.-T. T., Boon, N., Köster, O., Vrouwenvelder, H., Egli, T. un Hammes, F. (2013) "A microbiology-based multi-parametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks", *Water Research*, 47 (9), 3015.–3025. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.002>.

LeChevallier, M. W., Prosser, T. un Stevens, M. (2024) “Opportunistic Pathogens in Drinking Water Distribution Systems – A Review”, *Microorganisms* 2024, 12 (5), 916. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS12050916>.

LeChevallier, M. W., Schulz, W. un Lee, R. G. (1991) “Bacterial nutrients in drinking water”, *Applied and Environmental Microbiology*, 57 (3), 857.–862. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1128/AEM.57.3.857-862.1991>.

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Keinänen, M. M., Kekki, T. K., Laine, O., Hirvonen, A., Vartiainen, T. un Martikainen, P. J. (2004) “Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes”, *Water research*, 38 (17), 3769.–3779. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2004.06.024>.

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Vartiainen, T. un Martikainen, P. J. (1999) “A new sensitive bioassay for determination of microbially available phosphorus in water”, *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (5), 5.–8. lpp.

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Vartiainen, T. un Martikainen, P. J. (2002) “Changes in content of microbially available phosphorus, assimilable organic carbon and microbial growth potential during drinking water treatment processes”, *Water Research*, 36 (15), 3681.–3690. lpp. Pieejams: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00100-8).

Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Vartiainen, T., Myllykangas, T. un Martikainen, P. J. (2001) “Microbially available organic carbon, phosphorus, and microbial growth in ozonated drinking water”, *Water Research*, 35 (7), 1635.–1640. lpp. Pieejams: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00449-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00449-8).

Lehtola, M. J., Torvinen, E., Kusnetsov, J., Pitkänen, T., Maunula, L., Von Bonsdorff, C. H., Martikainen, P. J., Wilks, S. A., Keevil, C. W. un Miettinen, I. T. (2007) “Survival of Mycobacterium avium, Legionella pneumophila, Escherichia coli, and Caliciviruses in Drinking Water-Associated Biofilms Grown under High-Shear Turbulent Flow”, *Applied and Environmental Microbiology*, 73 (9), 2854. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1128/AEM.02916-06>.

Nescerecka, A., Juhna, T. un Hammes, F. (2018) “Identifying the underlying causes of biological instability in a full-scale drinking water supply system”, *Water Research*, 135, 11.–21. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.006>.

Polanska, M., Huysman, K. un Van Keer, C. (2005) “Investigation of microbially available phosphorus (MAP) in flemish drinking water”, *Water Research*, 39 (11), 2267.–2272. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.019>.

Prest, E. I., Hammes, F., Kötzsch, S., Van Loosdrecht, M. C. M. un Vrouwenvelder, J. S. (2016a) “A systematic approach for the assessment of bacterial growth-controlling factors linked to biological stability of drinking water in distribution systems”, *Water Science and Technology: Water Supply*, 16 (4), 865.–880. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.2166/ws.2016.001>.

Prest, E. I., Hammes, F., van Loosdrecht, M. C. M. un Vrouwenvelder, J. S. (2016b) “Biological stability of drinking water: Controlling factors, methods, and challenges”, *Frontiers in Microbiology*, 7 (FEB), 1.–24. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00045>.

Rittmann, B. E. un Snoeyink, V. L. (1984) “Achieving biologically stable drinking water”, *Journal / American Water Works Association*, 76 (10), 106.–114. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1984.tb05427.x>.

Santos-Beneit, F. (2015) “The Pho regulon: A huge regulatory network in bacteria”,

Frontiers in Microbiology, 6 (APR), 138714. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3389/FMICB.2015.00402/BIBTEX>.

Sathasivan, A. un Ohgaki, S. (1999) “Application of new bacterial regrowth potential method for water distribution system – a clear evidence of phosphorus limitation”, *Water Research*, 33 (1), 137.–144. lpp. Pieejams: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00158-4).

Valciņa, O., Pūle, D., Ķibilds, J., Labecka, L., Terentjeva, M., Krūmiņa, A. un Bērziņš, A. (2023) “Evaluation of Genetic Diversity and Virulence Potential of *Legionella pneumophila* Isolated from Water Supply Systems of Residential Buildings in Latvia”, *Pathogens*, 12 (7), 884. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/pathogens12070884>.

Valciņa, O., Pūle, D., Mališevs, A., Trofimova, J. un Makarova, S. (2019) “Co-occurrence of free-living amoeba and legionella in drinking water supply systems”, *Medicina (Lithuania)*, 55 (8), 492. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/medicina55080492>.

Vrouwenvelder, J. S., Beyer, F., Dahmani, K., Hasan, N., Galjaard, G., Kruithof, J. C. un Van Loosdrecht, M. C. M. (2010) “Phosphate limitation to control biofouling”, *Water Research*, 44 (11), 3454.–3466. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.026>.

Wen, G., Deng, Q., Huang, T.-L. un Ma, J. (2016) “An improved method for determining microbially available phosphorus in drinking water”, *Water Science and Technology: Water Supply* [Preprint].

Wen, G., Ma, J., Huang, T. L. un Egli, T. (2014) “Using coagulation to restrict microbial re-growth in tap water by phosphate limitation in water treatment”, *Journal of Hazardous Materials*, 280, 348.–355. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2014.08.020>.

WHO (2022) *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*, Geneva: World Health Organization.

van der Wielen, P. W. J. J., Brouwer-Hanzens, A., Italiaander, R. un Hijnen, W. A. M. (2023) “Initiating guidance values for novel biological stability parameters in drinking water to control regrowth in the distribution system”, *Science of the Total Environment*, 871. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161930>.

Zemite, M., Mezule, L., Gruskevica, K., Kokina, K., Rubulis, J., Juhna, T., Gottschalk, N., Dömer, F., Jagau, R., Röwe, K., Augustin, W., Scholl, S., Pereira, A., Barros, A. C., Machado, I. un Melo, L. F. (2022) “Affordable Pretreatment Strategy for Mitigation of Biofouling in Drinking-Water Systems”, *Journal of Environmental Engineering*, 148 (2). Pieejams: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001968](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001968).

Zemīte, M., Pūle, D., Kiriļina-Gūtmane, O., Ķimse, L., Strods, M., Zemītis, J. J., Mežule, L., Valciņa, O. un Juhna, T. (2023) “Effect of microbially available phosphorous removal on *Legionella* spp. in multi-storey residential dwellings in Latvia”, *Environmental Science: Water Research and Technology*, 10 (1), 193.–204. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.1039/d3ew00588g>.

Zimoch, I. un Paciej, J. (2020) “Use of water turbidity as an identifier of microbiological contamination in the risk assessment of water consumer health”, *Desalination and Water Treatment*, 199, 499.–511. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.5004/DWT.2020.26426>.

Zimoch, I., Parafiński, J. un Filipek, B. (2023) “Analysis of the impact of domestic distribution systems on the dynamics of changes in tap water quality as a necessary element of risk management in the Warsaw Water Supply System – a case study, Poland”, *Desalination and Water Treatment*, 315, 205.–219. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.5004/DWT.2023.30127>.



Marta Zemīte (dzim. Frolova) dzimusi 1990. gadā Rēzeknē. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju (2013) un profesionālo maģistra grādu (2014) siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmās. Kopš 2013. gada strādājusi inženiersistēmu projektēšanas uzņēmumā SIA "*MEP solutions*". Kopš 2016. gada strādā RTU, ieņemot zinātniskās asistentes, kopš 2019. gada – pētnieces amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar dzesamā ūdens bioloģisko stabilitāti, ūdens attīrīšanas membrānu aizsērēšanās mazināšanas tehnoloģijām un nokrišņu notekūdeņu kvalitāti.