

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē

Vides un būvzinātņu fakultātē

Vides un ūdenssaimniecības katedrā



Mg. sc. ing. Linda Grinberga 

Promocijas darbs

**ŪDEŅU KVALITĀTES
UZLABOŠANAS EFEKTIVITĀTE UN RISINĀJUMI
MĀKSLĪGAJOS MITRĀJOS LATVIJĀ
The Efficiency and Solutions
for Water Quality Improvement
in Constructed Wetlands in Latvia**

Zinātniskā doktora (*Ph. D*) grāda iegūšanai

Vides inženierijas un enerģētikas zinātņu nozarē

Promocijas darba vadītājs
profesors, **Dr.sc.ing. Ainis Lagzdīņš** _____

Promocijas darba autore
Mg.sc.ing. Linda Grinberga _____

Jelgava

2022

VISPĀRĪGĀ INFORMĀCIJA PAR DARBU

Promocijas darba izpildes vieta: Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, Vides un būvzinātņu fakultāte, Vides un ūdenssaimniecības katedra.

Pētījuma rezultātu publicēšana vispāratzītos recenzējamos izdevumos

1. Kill, K., Grinberga, L., Koskiahio, J., Mander, U., Wahlroos, O., Lauva, D., Pärn, J., Kasak, K. (2022) Phosphorus removal efficiency by in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff: Influence of vegetation and design. *Journal of Ecological Engineering*, Volume 180, 106664, 11 p. ISSN 0925-8574. doi:10.1016/j.ecoleng.2022.106664.
2. Grinberga, L., Grabuža, D., Grīnfelde, I., Lauva, D., Celms, A., Sas, W., Gluchowski, A., Dzieciol, J. (2021) Analysis of the Removal of BOD₅, COD and Suspended Solids in Subsurface Constructed Wetland in Latvia. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura* 20 (4), 21-28. doi:10.22630/ASPA.2021.20.4.31.
3. Grinberga, L., Lauva, D., Lagzdins, A. (2021) Treatment of Storm Water from Agricultural Catchment in Pilot Scale Constructed Wetland. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), p. 640–649. doi:10.2478/rtuect-2021-0048.
4. Grinberga, L. (2020) Water Quality Assurance with Constructed Wetlands in Latvia. *Springer Water*, p. 87–103. doi:10.1007/978-3-030-39701-2_5.
5. Valujeva, K., Pilecka, J., Grinberga, L., Grīnfelde, I., Burlakovs, J. (2019) Environmental Management of Remediative and Revitalization Initiatives in Baltic Sea Region. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 19(5.1), p. 253–259. doi:10.5593/sgem2019/5.1/S20.032.
6. Lagzdīnš, A., Jansons, V., Sudars, R., Grinberga, L., Veinbergs, A., Abramenko, K. (2015) Nutrient losses from subsurface drainage systems in Latvia. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* this link is disabled, 65, p. 66–79. doi:10.1080/09064710.2014.983962
7. Eihe, P., Vebere, L.L., Grīnfelde, I., Pilecka, J., Sachpazidou, V., Grinberga, L. (2019) The Effect of Acidification of Pig Slurry Digestate Applied on Winter Rapeseed on the Ammonia Emission Reduction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 390(1), 012043, 6 p. doi: 10.1088/1755-1315/390/1/012043
8. Sachpazidou, V., Vebere, L.L., Eihe, P., Grinberga, L., Butenaite, D. (2019) The Exploration of Seaweed Biomass as a Fuel for Energy Production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 390(1), 012049, 7 p. doi:10.1088/1755-1315/390/1/012049
9. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2017) Nutrient Removal by Subsurface Flow Constructed Wetland in the Farm Mezaciruli. *Research for Rural Development*, Volume 1, p. 160–165. doi: 10.22616/rrd.23.2017.024
10. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2016) Drainage Water Management in Open Ditches - Solutions and Effects in Latvia. *10th International Drainage Symposium 2016*, American Society of Agricultural and Biological Engineers. Minneapolis : ASABE, p. 70–75.
11. Sudars, R., Berzina, L., Grinberga, L. (2016) Analysis of Agricultural Run-off Monitoring Program Results for Estimation of Nitrous Oxide Indirect Emissions in Latvia. *Engineering for Rural Development*, Volume 2016-January, p. 1030–1035. ISSN: 16913043.

12. Tilgalis, E., Grinberga, L. (2011) Energy-efficient Wastewater Treatment Technologies in Constructed Wetlands. Civil Engineering '11 - 3rd International Scientific Conference, Proceedings, p. 263–266.

Pētījuma rezultātu publicēšana konferenču tēžu krājumos

1. Grabuža, D., Grinberga, L. (2021) Analysis of BOD₅, COD and Suspended Solids Efficiency in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. 16th International Scientific Conference “Students on their way to science” (undergraduate, graduate, post-graduate students): collection of abstracts, Latvia University of Life Sciences and Technologies Jelgava, 2021. 67 p. URL: https://llufb.llu.lv/conference/Students_their_Way_Science/Latvia_SWS_16th_Collection_of_Abstracts_2021.pdf. ISSN 2255-9566.
2. Lagzdins, A., Grinberga, L., Veinbergs, A., Sudars, R., Abramenko, K. (2020) The Effects of Flooding and Drought on Water Quantity and Quality in Agricultural Drainage Systems and Streams in Latvia. Hydrological processes in agricultural lands under changing environment: EGU General Assembly 2020, EGU2020-11637. doi:10.5194/egusphere-egu2020-11637.
3. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2020) The Improvement of Water Quality Indicators in Constructed Wetland Treatment Systems in Latvia. Hydrological processes in agricultural lands under changing environment: EGU General Assembly 2020, EGU2020-1267. doi:10.5194/egusphere-egu2020-12678.
4. Libiete, Z., Bardule, A., Lagzdins, A., Grinberga, L., Lazdins, A., Lupikis, A., Lazdina, D. (2019) Nature-based Solutions for Soil and Water Quality Protection – Experiences from the Nordic-Baltic Region. International scientific conference Mechanization in agriculture & Conserving of the resources, Volume 65, Issue 4, p. 142–145. URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2019/4/142>. ISSN 2603-3712.
5. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2018) Storm Water Treatment in a Subsurface Constructed Wetland in a Farmyard in Latvia. 4th International Conference on Pollution Control & Sustainable Environment and 6th Edition of International Conference on Water Pollution & Sewage Management. J Environ Res 2018, Volume: 2.
6. Burlakovs, J., Jani, Y., Grinberga, L., Kriipsalu, M., Anne, O., Grinfelde, I., Hogland, W. (2019) Managing the Baltic Sea Region Resilience – Prevention, Treatment Actions and Circular Economy. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental and Ecological Engineering, Vol:13, No:4, p. 256–260.
7. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2018) Practical Actions for Holistic Agricultural Drainage Management for Reduced Nutrient Losses: a Case Study in Latvia. EGU General Assembly 2018. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-13241.
8. Lagzdins, A., Sudars, R., Veinbergs, A., Abramenko, K., Grinberga, L., Siksnane, I. (2018) Assessment of Hydrological Processes and Nutrient Losses in Agricultural Landscape as Affected by Drainage Systems. Nordic Hydrological Conference 2018 “Hydrology and Water Resources Management in a Changing World”, Report 68, ISSN 1501-2832.
9. Lagzdins, A., Sudars, R., Veinbergs, A., Abramenko, K., Grinberga, L., Siksnane, I. (2018) Evaluating the Status and Trends in Water Quality Using Long-term Agricultural Runoff Monitoring Data. EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts, Vol. 20. EGU2018-16203.

10. Grinberga, L., Lagzdins, A., Siksnane, I. (2018) Nitrogen, Phosphorus and Suspended Solid Retention Efficiency in Two Constructed Wetlands in Latvia. EGU General Assembly 2018. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-12205-2.
11. Grinberga, L., Lagzdins, A., Siksnane, I. (2018) The Seasonal Impacts on Nutrient Retention in Two Constructed Wetlands in Latvia. EGU General Assembly 2018. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-16727.
12. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2017) Nutrient Retention in Surface Flow Constructed Wetland in Agricultural Land in Latvia. Proceedings of the 8th International Scientific Conference "Rural Development 2017: Bioeconomy Challenges". Academia: Aleksandras Stulginskis University, p. 593 – 598. doi:10.15544/RD.2017.179.
13. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2016) Drainage Water Management in Open Ditches – Solutions and Effects in Latvia. Proceedings of the 10th International Drainage Symposium. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 70 – 75.
14. Lagzdins, A., Jansons, V., Veinbergs, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2016) The Effects of Water Level Control Structures on Nutrient Reduction in Agricultural Runoff. In: Abstracts of The XXIX Nordic Hydrological Conference "The Role of Hydrology Towards Water Resources Sustainability", ISSN 1650-8610, ISBN 978-609-449-096-5, p. 73.

Pētījuma rezultātu publicēšana latviešu valodā

1. Bērziņa, L., Grinberga, L., Lagzdīņš, A., Sudārs, R. (2018) Izskatotā slāpekļa ietekme uz N₂O emisiju apjomu. Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas iespējas ar klimatam draudzīgu lauksaimniecību un mežsaimniecību Latvijā: monogrāfija. Jelgava, 2018. 219.-246.lpp. ISBN 9789984483085.
2. Lagzdīņš, A., Grinberga, L., Veinbergs, A., Trifane, A. (2018) Rokasgrāmata par videi draudzīgu elementu ierīkošanu meliorācijas sistēmās. Centrālā Baltijas jūras reģiona programmas 2014. - 2020. gadam līdzfinansēts projekts "Praktiski pasākumi vienotā meliorācijas sistēmu apsaimniekošanā ar mērķi samazināt biogēno elementu ieplūdi Baltijas jūrā/NUTRINFLOW". Jelgavas tipogrāfija, 96 lpp. ISBN 9789934197550.
3. Jansons, V., Grinberga, L. (2012) Mākslīgie mitrāji ūdens piesārņojuma samazināšanai. Jelgavas tipogrāfija, 41 lpp.

Pētījuma rezultātu prezentēšana zinātniskās konferencēs

1. Grinberga, L., Lagzdins, A., Lauva, D. (2021) Treatment of storm water from agricultural catchment in pilot scale constructed wetland. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2021), Riga, Latvia, May 12-14, 2021. (Online oral presentation)
2. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2020) The improvement of water quality indicators in constructed wetland treatment systems in Latvia. European Geosciences Union General Assembly 2020, May 6, 2020. (Online oral presentation)
3. Lagzdins, A., Grinberga, L., Veinbergs, A., Sudars, R., Abramenko, K. (2020) The effects of flooding and drought on water quantity and quality in agricultural drainage systems and streams in Latvia. European Geosciences Union General Assembly 2020, May 8, 2020. (Online oral presentation)

4. Lagzdins, A., Grinberga, L. (2020) Ekstremālu meteoroloģisko apstākļu ietekme uz augu barības vielu zudumiem no nosusinātām lauksaimniecības zemēm. Latvijas Universitātes 78. Starptautiskā zinātniskā konference, sekcijas sēde "Latvijas klimats un ūdeņi - mainība, tendences un ietekmes", Rīga, Latvia, 2020. gada 29. janvāris. (Oral presentation)
5. Grinberga, L. (2019) Nutrient mitigation practice in constructed wetlands in Latvia. 8th international symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control Wetpol2019, Denmark, Aarhus, Aarhus University. (Oral presentation)
6. Lagzdins, A., Sudars, R., Grinberga, L., Veinbergs, A., Abramenko, K. (2019) Effects of Extreme Weather Conditions on Runoff and Nutrient Losses in Agricultural Landscapes in Latvia. The International Scientific Practical Conference "Aspects of Sustainable Development: Theory and Practice", Utena, Lithuania, 28 March, 2019. (Oral presentation)
7. Lībiete, Z., Bārdule, A., Lagzdins, A., Grinberga, L., Lazdins, A., Lupikis, A., Lazdina, D. (2019) Nature-based solutions for soil and water quality protection – experiences from the Nordic-Baltic region. International Scientific Conference "Conserving Soils and Water", Burgas, Bulgaria, 28 – 31 August, 2019. (Oral presentation)
8. Grinberga, L. (2018) Atļauj dabai strādāt tavā labā. Research Slam, contest for master and doctoral students, organized by Riga Technical university Doctoral school. Riga, Latvia. 31.01.2018. (Oral presentation)
9. Grinberga, L. (2018) Storm water treatment in a subsurface constructed wetland in a farmyard in Latvia. Joint event 4th International Conference on Pollution Control & Sustainable Environment and 6th Edition of International Conference on Water Pollution & Sewage Management. Roma, Itālija, 2018. 26 - 27 July. (Oral key note presentation)
10. Grinberga, L., Lagzdins, A., Siksnane, I. (2018) Nitrogen, phosphorus and suspended solid retention efficiency in two constructed wetlands in Latvia. European Geosciences Union General Assembly 2018 and Outstanding Student Poster and PICO (OSPP) Award. Austrija, Vīne, 2018. gada 8. - 13. aprīlis. (Poster presentation)
11. Grinberga, L., Lagzdins, A., Siksnane, I. (2018) The seasonal impacts on nutrient retention in two constructed wetlands in Latvia. European Geosciences Union General Assembly 2018, Austrija, Vīne, 2018. gada 8. - 13. aprīlis. (Poster presentation)
12. Grinberga, L. (2018) Gaisa temperatūras ietekme uz noteces attīrīšanu mākslīgajās mitrzemēs. Latvijas Universitātes 76. Starptautiskā zinātniskā konference Sekcijas sēde "Klimata mainība un tās ietekme uz vidi" LU Dabaszinātņu akadēmiskais centrs, Jelgavas iela 1, 2018. gada 31. janvāris. (Oral presentation)
13. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2018) Evaluating the status and trends in water quality using long-term agricultural runoff monitoring data. European Geosciences Union General Assembly 2018. (Oral presentation)
14. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2018) Practical actions for holistic agricultural drainage management for reduced nutrient losses: a case study in Latvia. European Geosciences Union General Assembly 2018. (Poster presentation)
15. Lagzdins, A., Veinbergs, A., Sudars, R., Grinberga, L. (2018) Klimata mainības ietekme uz lauksaimniecības notecņu kvalitāti un kvantitāti. Latvia University 76th international scientific conference Section "Klimata mainība un tās ietekme uz vidi". Riga, Latvia, 31.01.2018. (Oral presentation)
16. Leveika, R., Grinberga, L. (2018) Stormwater Impact on Wastewater amount in Jelgava Wastewater Treatment Plant (WTP). International conference "Students on Their Way to Science". Jelgava, 2018. 20. April. (Oral presentation)

17. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2017) Nutrient Removal by Subsurface Flow Constructed Wetland in the Farm Mezaciruli. 23rd International Scientific Conference "Research for Rural Development 2017", Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 17 - 19, 2017. (Oral presentation)
18. Grinberga, L., Lagzdins, A. (2017) The retention of nitrogen, phosphorus and suspended solids in two constructed wetlands in Latvia. 13th Annual CWA Conference "Constructed wetlands: natural systems for water management", Slimbridge Wetland Centre, Gloucestershire, UK, September 27 – 28, 2017. (Poster presentation)
19. Lagzdins, A., Grinberga, L. (2017) Suspended solids and nutrients retention in agricultural open ditches using water level control structures. 13th Annual CWA Conference "Constructed wetlands: natural systems for water management", Slimbridge Wetland Centre, Gloucestershire, UK, September 27 – 28, 2017. (Poster presentation)
20. Grinberga, L. (2017) Nutrient retention in surface flow constructed wetland in agricultural land in Latvia. 8th international scientific conference "Rural Development 2017: Bioeconomy Challenges". Lithuania, Kaunas, Aleksandras Stulginskis University, 24th of November, 2017. (Oral presentation)
21. Lagzdins, A., Grinberga, L., Siksnane, I. (2016) Drainage Water Management in Open Ditches – Solutions and Effects in Latvia. 10th International Drainage Symposium, Minneapolis, Minnesota, USA, September 6 - 9, 2016. (Oral presentation)
22. Lagzdins, A., Jansons, V., Veinbergs, A., Grinberga, L., Siksnāne, I. (2016) The Effects of Water Level Control Structures on Nutrient Reduction in Agricultural Runoff. The XXIX Nordic Hydrological Conference "The Role of Hydrology Towards Water Resources Sustainability". Kaunas, Lithuania, August 8 – 10, 2016. (Oral presentation)

Dalība projektos, kas saistīti ar promocijas darba tēmu

1. Lauku atbalsta dienesta un Zemkopības ministrijas subsīdiju tēmas projekts "Virszemes ūdeņu un gruntsūdeņu kvalitātes pārraudzība īpaši jutīgajās teritorijās un lauksaimniecības zemēs lauksaimniecības noteču monitoringa programmā" (S414), 01.01.2022 – 30.11.2022.
2. LIFE programmas integrētais projekts "LIFE GOODWATER IP - Latvijas upju baseinu apsaimniekošanas plānu ieviešana laba virszemes ūdens stāvokļa sasniegšanai" (LIFE02), 23.01.2020 – 31.12.2027.
3. Vaučers Nr. VP-V-2021/33, Līgums Nr. 3.2.2.-9/15, TEPV114 "Veikt uz zinātniskiem pētījumiem balstītu izpēti par fosfora savienojumu samazināšanu notekūdeņos, izmantojot bioloģiskās attīrīšanas iekārtas, un atlasītu piemērotāko fosfora attīrīšanas metodi. Balstoties uz pieejamām tehnoloģiskajām iespējām, sagatavot bioloģiskās attīrīšanas iekārtas ar papildu fosfora koncentrāciju samazināšanas funkciju prototipu", 01.05.2021 – 31.03.2022.
4. ES Kohēzijas fonda projekta Nr. 5.4.2.2/17/I/002 "Valsts vides monitoringa programmu un kontroles sistēmas attīstība un sabiedrības līdzdalības veicināšana, pilnveidojot nacionālas nozīmes vides informācijas un izglītības centru infrastruktūru" (KF-1), 01.10.2017 – 30.09.2021.
5. Interreg Baltijas jūras reģiona transnacionālās sadarbības programmas 2014.-2020. gadam projekts "WATERDRIVE - Atbildīga ūdens resursu apsaimniekošanas lauku attīstībai vietējā līmenī un Baltijas jūras reģionā" (INT10), 02.05.2019 – 30.06.2021.

6. LLU programmas “Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU” projekts “Bioķīmiskā un ķīmiskā skābekļa patēriņa novērtējums pazemes plūsmas mākslīgajā mitrzemē” (P10), 01.06.2019 – 31.05.2021.
7. Lauku atbalsta dienesta un Zemkopības ministrijas subsīdiju tēmas projekts “Virszemes ūdeņu un gruntsūdeņu kvalitātes pārraudzība īpaši jutīgajās teritorijās un lauksaimniecības zemēs lauksaimniecības noteču monitoringa programmā” (S340), 01.02.2020 – 30.11.2020.
8. Lauku atbalsta dienesta un Zemkopības ministrijas subsīdiju tēmas projekts “Virszemes ūdeņu un gruntsūdeņu kvalitātes pārraudzība īpaši jutīgajās teritorijās un lauksaimniecības zemēs lauksaimniecības noteču monitoringa programmā” (S319), 02.01.2019 – 29.11.2019.
9. Centrālā Baltijas jūras reģiona pārrobežu sadarbības programmas 2014.-2020. gadam projekts “NUTRINFLOW - Praktiski pasākumi vienotā meliorācijas sistēmu apsaimniekošanā ar mērķi samazināt biogēno elementu ieplūdi Baltijas jūrā”, (INT2), 01.09.2015 – 28.02.2019.
10. Bonus programmas projekts “MIRACLE - Mediating integrated actions for sustainable ecosystem services in a changing world”, 01.04.2015 – 31.03.2018.

Promocijas darbs izskatīts un akceptēts LBTU Vides un ūdenssaimniecības paplašinātajā katedras sēdē Jelgavā, 2022. gada 21. aprīlī protokola Nr. 5

ANOTĀCIJA

Grinberga L. **Ūdeņu kvalitātes uzlabošanas efektivitāte un risinājumi mākslīgajos mitrājos Latvijā:** promocijas darbs zinātņu doktora (Ph. D.) zinātniskā grāda iegūšanai. Jelgava, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, 2022. 118 lpp., 72 att., 6 tab., 96 inform. avoti.

Promocijas darbs balstīts aktualitātē, aprobēt videi draudzīgu un uz dabīgiem procesiem balstītu ūdeņu kvalitātes uzlabošanas metodi, kas citviet pasaulē tiek izmantota plaši, taču mākslīgo mitrāju kā attīrīšanas iekārtu izmantošanai Latvijā līdz šim bijis gadījuma raksturs. Promocijas darba pirmajā nodaļā sniegts izklāsts par mākslīgo mitrāju pielietojuma iespējām dažāda veida notekūdeņu attīrīšanā. Apkopota informācija par dažādu mitrāju konstruktīvajiem risinājumiem atbilstoši Latvijas apstākļiem un vajadzībām. Pētījuma pamatā ir divi mākslīgo mitrāju monitoringa objekti Mežacīruļos, kas projektēti, būvēti un ekspluatēti promocijas darba izstrādāšanas ietvaros, un viens mākslīgā mitrāja monitoringa objekts Zantē. Monitoringa objekti, izmantotās pētījuma un datu apstrādes metodes aprakstītas promocijas darba otrajā nodaļā. Promocijas darba rezultātu un diskusijas nodaļā ir izpētīta mākslīgo mitrāju darbības efektivitāte Latvijas klimatiskajos un ekspluatācijas apstākļos, ko pamato analizētie monitoringa dati trīs atšķirīgas konstrukcijas mākslīgajos mitrājos. Amonija slāpekļa, nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju samazinājums pēc attīrīšanas pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos novērots vidēji attiecīgi 17%, 67% un 54%. Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos konstatēts nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa vidējo koncentrāciju samazinājums attiecīgi par 10%, 24% un 9%. Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Zantē slāpekļa savienojumu izmaiņu vidējās un mediānu vērtības uzrāda palielinājumu. Ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora koncentrācijas ūdens attīrīšanas procesu norises rezultātā samazinātas vidēji par 67% un 72% attiecīgi abiem rādītājiem pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā, 5% līdz 27% samazinājums novērots virszemes plūsmas mitrājā Mežacīruļos, bet Zantē palikušas nemainīgas. Kopējās suspendēto vielu koncentrācijas samazinātas vidēji par 62% pazemes plūsmas un par 11% virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos, vidējais suspendēto vielu samazinājums Zantē ir 8%. Pazemes plūsmas mitrājā Mežacīruļos biokīmiskā skābekļa patēriņa un ķīmiskā skābekļa patēriņa koncentrāciju mediānu vērtību samazinājums novērots attiecīgi par 91% un 83%. Balstoties uz pētījuma ietvaros novēroto mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti monitoringa objektos, aprobēta mākslīgo mitrāju dimensiju aprēķinu metodika un izstrādāts aprēķinu algoritma modelis nozīmīgāko mākslīgā mitrāja dimensiju aprēķiniem.

Promocijas darba mērķis

Balstoties uz empīriskiem novērojumiem pētījumu objektos, aprobēt mākslīgo mitrāju tehnisko risinājumu un izveidot dimensionēšanas metodiku saimnieciskās darbības izraisīta ūdens piesārņojuma samazināšanai Latvijā.

Izvirzītie pētnieciskie uzdevumi mērķa sasniegšanai

1. Izvērtēt dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju pielietojuma iespējas Latvijā pēc izcelsmes, sastāva un apjoma dažādu notekūdeņu attīrīšanai.
2. Noteikt un analizēt piesārņojošo vielu, tai skaitā slāpekļa un fosfora savienojumu, suspendēto vielu, biokīmiskā un ķīmiskā skābekļa patēriņa, koncentrāciju mainību notecē pēc notekūdeņu attīrīšanas mākslīgajā mitrājā.
3. Novērtēt piesārņojošo vielu samazināšanas efektivitāti divu dažādu tipu mākslīgajos mitrājos, ņemot vērā nozīmīgākos mitrāju darbību ietekmējošos ģeogrāfiskos un fizikālos faktorus.
4. Izstrādāt un pielietot aprēķinu metodiku un modeli dažāda veida, apjoma un sastāva notekūdeņu attīrīšanai, izmantojot mākslīgos mitrājus.

Promocijas darba hipotēze

Atbilstošas konstrukcijas un dimensiju mākslīgie mitrāji uzlabo ūdens kvalitāti, samazinot vienas vai vairāku piesārņojošo vielu koncentrāciju ūdenī.

Atslēgas vārdi

Mākslīgais mitrājs, notekūdeņu attīrīšana, ūdeņu kvalitāte.

ANNOTATION

Grinberga L. **The Efficiency and Solutions for Water Quality Improvement in Constructed Wetlands in Latvia**: dissertation to receive scientific doctoral degree (Ph. D.). Jelgava, Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2022. 118 p, 72 pictures, 6 tables, 96 inform. sources.

The dissertation prepared by Linda Grinberga “**The Efficiency and Solutions for Water Quality Improvement in Constructed Wetlands in Latvia**” is based on the topicality to examine the environmentally oriented and nature-based biological method for water quality improvement. Constructed wetlands are well known in different countries and include widely used method for water treatment, but in Latvia wetlands haven't been proved as surely effective. Constructed wetlands are the wastewater treatment method based on physical, biological and biochemical processes and doesn't require electricity. The first chapter of the dissertation provides an overview of the possibilities of using constructed wetlands in treating different types of wastewater. Various constructive solutions of wetlands are provided according to the conditions and needs in Latvia. The research is based on the data from two objects in study site Mezaciruli, where two separate constructed wetlands were designed, built and operated, and one monitoring object with constructed wetland in the study site Zante. All the information of the study sites, monitoring data and methods are described in the second chapter of the dissertation. In the chapter of results and discussion the efficiency of nutrient removal in study sites is analysed and the impact of climate, maintenance and conditions of Latvia on the removal efficiency is investigated.

The average reduction of concentrations of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen was observed by 17%, 67% and 54%, respectively, in the subsurface flow constructed wetland. During the study period in the surface flow constructed wetland in Mezaciruli the average concentrations of nitrate nitrogen, ammonia nitrogen and total nitrogen were reduced by 10%, 24% and 9%, respectively. The median and average concentrations of nitrogen compounds showed an increase in the surface flow constructed wetland in Zante. The average concentrations of orthophosphate phosphorous and total phosphorus were reduced by 67% and 72% in the subsurface flow constructed wetland, and decreases by 5% to 27% in the surface flow wetlands in Mezaciruli, and with no changes in Zante. The concentrations of suspended solids were reduced on average by 62% at the subsurface flow wetland and by 11% at the surface flow constructed wetland in Mezaciruli, and by 8% in Zante. The median value for biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand concentrations decreased by 91% and 83%, respectively. Based on the efficiency of constructed wetlands observed during this study at the monitoring sites, the methodology for calculations of the dimensions of constructed wetlands has been approbated and a calculation algorithm model for dimensions has been developed.

The aim of the study

Based on the empirical observations at the study sites, to approbate the technical solutions and develop dimensioning methodology of constructed wetlands in Latvia in order to reduce water pollution caused by economic activities.

Research objectives

1. To evaluate the possibilities of application of different design constructed wetlands in Latvia according to origin, composition and volume of various wastewaters.
2. To determine and analyse the reduction of pollutants including nitrogen and phosphorus compounds, suspended solids, biochemical and chemical oxygen demand after wastewater treatment in constructed wetland.
3. To evaluate the efficiency of pollutant reduction in two different types of constructed wetlands considering the most significant geographical and physical influencing factors.

4. To develop and apply a calculation methodology and tool for the constructed wetlands to improve the quality of different types, volume and content of wastewater.

Research hypotheses

Properly designed and dimensioned constructed wetlands improve water quality by reducing the concentrations of one or several pollutants in the water.

Key words

Constructed wetland, wastewater treatment, water quality.

SATURS

Tabulu saraksts	13
Attēlu saraksts	13
Darbā lietotie apzīmējumi un saīsinājumi	16
Ievads.....	17
1. Literatūras apskats	22
1.1. Dabīgie mitrāji	22
1.2. Dažādas konstrukcijas mākslīgie mitrāji	24
1.2.1. Virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji	25
1.2.2. Pazemes plūsmas mākslīgie mitrāji	27
1.2.3. Kombinēti mākslīgie mitrāji	29
1.3. Mitrāju pielietojums atkarībā no notekūdeņu veida	31
1.3.1. Mākslīgie mitrāji lietus notekūdeņu uzkrāšanai un attīrīšanai	31
1.3.2. Mākslīgie mitrāji sadzīves notekūdeņu attīrīšanai.....	32
1.3.3. Mākslīgie mitrāji ražošanas notekūdeņu attīrīšanai.....	35
1.3.4. Mākslīgie mitrāji lauksaimniecības noteces attīrīšanai	36
1.3.5. Konstrukcijas izvēle.....	41
1.4. Bioķīmiskie un fizikālie procesi, kas nodrošina attīrīšanas procesus mākslīgajā mitrājā	43
1.5. Mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti noteicošie nozīmīgākie faktori	45
1.5.1. Temperatūra.....	45
1.5.2. Ūdens uzturēšanās laiks.....	46
1.5.3. Veģetācija	47
1.5.4. Apsaimniekošana.....	47
2. Materiāli un metodika.....	50
2.1. Monitoringa vietu raksturojums	50
2.1.1. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos	51
2.1.2. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos	53
2.1.3. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zante	56
2.2. Ūdeņu paraugu ievākšanas un ķīmiskā sastāva noteikšanas metodika.....	58
2.3. Datu matemātiskās apstrādes metodika	62
2.4. Mākslīgo mitrāju aprēķinu metodikas un modeļa izstrādes principi	63
2.4.1. Lietus notekūdeņi.....	67
2.4.2. Sadzīves notekūdeņi	70
2.4.3. Ražošanas notekūdeņi.....	72
2.4.4. Notekūdeņi no lauksaimnieciskās darbības	74
2.4.5. Citi notekūdeņi.....	77
3. Rezultāti un diskusija	79
3.1. Piesārņojuma izmaiņu analīze dažādas konstrukcijas mākslīgajos mitrājos Latvijā.....	79
3.1.1. Ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora izmaiņu analīze	83
3.1.2. Nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa, kopējā slāpekļa izmaiņu analīze	86
3.1.3. Suspendēto vielu izmaiņu analīze.....	90
3.1.4. BSP ₅ un KSP izmaiņu analīze pazemes plūsmas mitrājā	93
3.2. Piesārņojuma izmaiņu dinamika pa sezonām	95
3.3. Aprēķinu modeļa pielietojums.....	101
3.4. Mākslīgo mitrāju ekonomiskais un vides novērtējums	105
Secinājumi	110
Izmantotie informācijas avoti	111
Pielikumi.....	119

TABULU SARAKSTS

2.1. tabula. Mākslīgo mitrāju pētījuma objektu galvenās konstruktīvās dimensijas	51
2.2. tabula. Analīzes metodes, Latvijas standarti un iekārtas ūdeņu kvalitātes parametru ķīmiskajai analīzei.....	61
3.1. tabula. Analizēto ūdeņu kvalitātes parametru vidējās koncentrācijas, vidējā aizturēšanas efektivitāte, koncentrāciju un piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas	80
3.2. tabula. Analizēto ūdeņu kvalitātes parametru vidējās koncentrācijas, vidējā aizturēšanas efektivitāte, koncentrāciju un piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas	94
3.3. tabula. Galveno izmaksu pozīciju salīdzinājums.....	107
3.4. tabula. Mākslīgo mitrāju SVID analīze	108

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. Mākslīgo mitrāju iedalījums atkarībā no konstrukcijas un plūsmas režīma.....	25
1.2. att. Virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju shēmas	26
1.3. att. Horizontālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja shēma.....	28
1.4. att. Vertikālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja shēma.....	29
1.5. att. Kombinētu mākslīgo mitrāju shēmas	30
1.6. att. Ventspils pilsētas Vidumgrāvis ar mākslīgā mitrāja posmiem.....	31
1.7. att. Sadzīves notekūdeņu attīrīšanas shēma mākslīgajā mitrājā	33
1.8. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Lietuvā.....	36
1.9. att. Mākslīgā mitrāja izvietojuma shēma lauksaimniecības noteces attīrīšanai.....	37
1.10. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja shēma lauksaimniecības noteces attīrīšanai...	37
1.11. att. Hirsjarvi virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Somijā	38
1.12. att. Enajarvi kombinēts virszemes plūsmas un pazemes pūsmas mākslīgais mitrājs Somijā.....	38
1.13. att. Mākslīgais mitrājs pavasarī Norvēģijā	39
1.14. att. Mākslīgais mitrājs pēc tīrīšanas Norvēģijā.....	40
1.15. att. Mākslīgo mitrāju pielietojums dažādu notekūdeņu attīrīšanai atkarībā no notekūdeņu izcelsmes.....	41
1.16. att. Shēma lēmumu pieņemšanai mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlē.....	42
2.1. att. Mākslīgo mitrāju monitoringa vietas Latvijā	50
2.2. att. Lietus notekūdeņu attīrīšanas iekārtu shēma ar pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju Mežacīruļos	52
2.3. att. Pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos šķērsgriezums.....	52
2.4. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos	53
2.5. att. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos	54
2.6. att. Virszemes plūsmas un pazemes plūsmas mākslīgie mitrāji Mežacīruļos	54
2.7. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos sateces baseins.....	55
2.8. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē plāns.....	56
2.9. att. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē.....	56
2.10. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē sateces baseins	57
2.11. att. Paraugu ņemšanas vietas pētījumu objektos Mežacīruļos.....	59
2.12. att. Paraugu ņemšanas vietas pētījumu objektā Zantē	61
2.13. att. Mākslīgo mitrāju aprēķina modeļa struktūra.....	64
2.14. att. Modeļa sākuma skats, notekūdeņu veida izvēle	67
2.15. att. Modeļa shēma lietus notekūdeņiem	68
2.16. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma lietus	

notekūdeņiem	69
2.17. att. Modeļa shēma sadzīves notekūdeņiem.....	71
2.18. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma sadzīves notekūdeņiem	71
2.19. att. Modeļa shēma ražošanas un citiem notekūdeņiem.....	73
2.20. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma ražošanas notekūdeņiem	73
2.21. att. Modeļa shēma drenu un virszemes notecei no lauksaimniecības platībām.....	74
2.22. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma drenu un virszemes notecei no lauksaimniecības platībām.....	75
2.23. att. Modeļa shēma virszemes notecei no zemnieku saimniecību pagalma.....	75
2.24. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma virszemes notecei no zemnieku saimniecību pagalma	76
2.25. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma cita veida notekūdeņiem	77
3.1. att. Novērotie 15 dienu vidējie caurplūdumi un 15 dienu nokrišņu summas pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	81
3.2. att. Novērotie 15 dienu vidējie caurplūdumi un 15 dienu nokrišņu summas virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	82
3.3. att. PO_4 -P un P_{kop} attīrīšanas efektivitātes rezultāti pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos.....	83
3.4. att. Vidējās kopējā fosfora koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	84
3.5. att. Vidējās kopējā fosfora koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	85
3.6. att. PO_4 -P un P_{kop} attīrīšanas efektivitātes rezultāti, secīgi virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos Mežacīruļos un Zantē.....	85
3.7. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes pazemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos	87
3.8. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	87
3.9. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos	88
3.10. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	88
3.11. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē.....	89
3.12. att. Suspendēto vielu aizturēšanas efektivitāte	90
3.13. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	91
3.14. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos	92
3.15. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē	92
3.16. att. BSP_5 koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	93
3.17. att. $ḲSP$ koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	93
3.18. att. BSP_5 un $ḲSP$ attīrīšanas efektivitātes atkarība no šo parametru koncentrācijām pie ieplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	94
3.19. att. Vidējā novērotā gaisa temperatūra Dobeles novērojumu stacijā pa mēnešiem no	

2014. līdz 2020. gadam	95
3.20. att. Ūdeņu kvalitātes parametru samazināšanas efektivitātes un novērotās gaisa temperatūras savstarpējā atkarība virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Zantē.....	96
3.21. att. Slāpekļa savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem pazemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos	97
3.22. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos vasarā un ziemā	98
3.23. att. Nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos	98
3.24. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	99
3.25. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos vasarā un ziemā	99
3.26. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos	100
3.27. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2018. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē.....	100
3.28. att. Modeļa datu ievades skats pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežacīruļos	102
3.29. att. Modeļa rezultātu skats pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežacīruļos	103
3.30. att. Modeļa datu ievades un rezultātu skats virszemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežacīruļos.....	104
3.31. att. Modeļa datu ievades un rezultātu skats virszemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Zantē	104

DARBĀ LIETOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI

BIOR	Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts
BSP ₅	Bioķīmiskais skābekļa patēriņš piecās dienās
CE	Cilvēka ekvivalents
C _{in}	Ūdeņu kvalitātes rādītāja koncentrācija pie ieplūdes
C _{out}	Ūdeņu kvalitātes rādītāja koncentrācija pie izplūdes
CWA	Constructed Wetland Association, Mākslīgo mitrāju asociācija, Apvienotajā Karalistē
EPA	United States Environmental Protection Agency, ASV Vides aizsardzības aģentūra
HELCOM	Baltijas jūras vides aizsardzības komisija
ĶSP	Ķīmiskais skābekļa patēriņš
LBN	Latvijas būvnormatīvs
LHEI	Daugavpils universitātes Latvijas Hidroekoloģijas institūts
LVĢMC	Latvijas Vides, Ģeoloģijas un Meteoroloģijas entrs
N ₂ O	Dislāpekļa oksīds
NH ₄ ⁺	Amonija joni
NH ₄ ⁺ -N	Amonija slāpeklis
N _{kop}	Kopējais slāpeklis
NO	Slāpekļa oksīds
NO ₂	Nitrīti
NO ₃ ⁻	Nitrātjoni
NO ₃ ⁻ -N	Nitrātu slāpeklis
PE	Polietilēns
PO ₄ ⁻	Ortofosfātjoni
PO ₄ ⁻ -P	Ortofosfātu fosfors
P _{kop}	Kopējais fosfors
Q	Caurplūdums
R ²	Determinācijas koeficients
SV	Kopējās suspendētās vielas
VARAM	Vides aizsardzības un Reģionālās attīstības ministrija

IEVADS

Cilvēku saimnieciskā darbība veicina fosfora un slāpekļa savienojumu iekļūšanu dabas ūdeņos no dažāda veida antropogēnajiem piesārņojuma avotiem, piemēram, saimnieciskā un lauksaimnieciskā darbība, apbūves teritorijas, rūpniecība. Erodētās augšnes daļiņas no lauksaimniecības platībām, ceļu un laukumu segumu daļiņas suspendēto vielu veidā, tiešas notekūdeņu noplūdes, u.c. saimnieciskās darbības izraisītas sekas pazemina dabas ūdeņu kvalitāti. Fosfora, slāpekļa savienojumu un suspendēto vielu iekļūšana dabīgās ūdenskrātuvēs izraisa pastiprinātu to aizaugšanu ar ūdensaugiem jeb eutrofikāciju. Eutrofikācijas rezultātā ūdenskrātuvē var savairoties aļģes un citi ūdensaugi, samazināties caurredzamība, pazemināties skābekļa daudzums, tādējādi pazeminoties ūdens kvalitātei un izmantošanas iespējām.

Ūdeņu kvalitāte dabā galvenokārt ir atkarīga no tādām piesārņojošo vielu grupām kā organiskās vielas, biogēnie elementi un suspendētās vielas. Virszemes ūdeņu kvalitāte dabiskas izcelsmes ūdensobjektiem Latvijā, balstoties uz LVĢMC pārskatiem par virszemes un pazemes ūdeņu stāvokli, vairumā novēroto gadījumu raksturojama kā laba vai vidēja. Ūdens kā resurss saimnieciskajām vajadzībām Latvijā ir pieejams pietiekamā apjomā un kvalitātē. Vides politikas pamatnostādnes 2021.-2027. gadam (VARAM, 2021) nosaka tādus mērķus kā visu ūdensobjektu labas kvalitātes stāvokļa sasniegšana Latvijā, lauksaimnieciskās izcelsmes nitrātu slodzes samazināšana uz virszemes ūdeņiem (European Commission 91/676/EEC, 1991) un izrietoši arī pasargāt vidi no komunālo notekūdeņu nelabvēlīgas ietekmes.

Fosfora un slāpekļa savienojumi nonāk dabas ūdeņos gan cilvēka saimnieciskās darbības rezultātā (Abed et.al., 2019), gan arī kā dabiskā piesārņojuma noplūdes. Vislielākās augu barības vielu (jeb biogēno elementu) koncentrācijas notecē konstatētas reģionos ar augstu iedzīvotāju blīvumu, attīstītu rūpniecību un intensīvu lauksaimniecisko darbību (VARAM, 2021). Slāpekļa un fosfora savienojumi nerada tiešu kaitējumu jūras organismiem vai cilvēkam, taču pārmērīga šo elementu savienojumu koncentrācija un labvēlīga kombinācija ūdenī izraisa eutrofikāciju, kas noved pie izjaukta ūdeņu ekosistēmas līdzsvara (HELCOM, 2011).

Baltijas jūru no Ziemeļjūras atdala reljefa izveidots sliekšnis, pār kuru nenotiek regulāra un intensīva ūdens pieplūde no pasaules okeānu sistēmas. Tādējādi Baltijas jūra ir jutīgāka pret piesārņojumu, jo tai ir kavēta ūdens apmaiņa ar Ziemeļjūru un Atlantijas okeānu, un ir neliela iespēja atšķaidīt piesārņojumu, kas pastāvīgi ieplūst no pieguļošajām sauszemes teritorijām. Ūdens krājums jūrā tiek papildināts galvenokārt no jūrā ieplūstošo upju ūdeņiem. 19. gs. sākuma Baltijas jūra no oligotrofiskas tīra ūdens jūras ir kļuvusi par eutrofu jūras vidi (HELCOM, 2000).

Dānija, Somija, Zviedrija, Baltijas valstis, Polija, Krievija, Baltkrievija un Vācija ir atbildīgas par piesārņojuma līmeni Baltijas jūrā, jo ir izvietotas Baltijas jūras sateces baseinā (2000/60/EC, 2000). Piesārņojošās vielas jūrā nonāk no lauksaimniecības zemēm un nosusināšanas sistēmām (Berzina & Sudars, 2010), neattīrītiem vai nepietiekami attīrītiem pilsētu sadzīves kanalizācijas sistēmu ūdeņiem, piesārņotu rūpniecības notekūdeņu veidā un pat lietotus notekūdeņu veidā (European Commission 91/271/EEC, 1991), jo tie satur putekļus un nesadegušus naftas produktus no autoceļiem un automašīnu stāvvietām (Jansons & Grinberga, 2012).

Lai novērstu piesārņojošo vielu iekļūšanu upēs, viens no risinājumiem būtu pietiekami attīrīt notekūdeņus pirms to ievadīšanas virszemes dabas ūdeņos, piemēram, upēs, ezeros, dīķos, utt. (Jansons & Grinberga, 2012; Abed et.al., 2019; European Commission 2000/60/EEC, 2000). Pētījumā aprakstītie mākslīgie mitrāji ir izmantojami gan kā individuālas notekūdeņu attīrīšanas ietaises, gan kā papildus pēcatīrīšanas ietaises, ko izmanto ūdeņu kvalitātes uzlabošanai, papildinot cita veida bioloģiskās, mehāniskās vai ķīmiskās attīrīšanas metodes (Crites et.al., 2014). Mākslīgie mitrāji ir uz fizikāliem, bioloģiskiem un bioķīmiskiem procesiem balstīta notekūdeņu attīrīšanas metode, kas nepatērē elektroenerģiju vai citus energoresursus.

Piesārņojuma samazināšana mākslīgajos mitrājos saistās ar dabīgo pašattīrīšanas procesu nodrošināšanu, t.i., tiek samazināts ūdens plūsmas ātrums, ļaujot izgulsnēties suspendētajām daļiņām un organiskajām vielām, tiek dota iespēja ūdens augiem uzņemt ūdenī izšķīdušos biogēnos elementus un izmantot tos augšanas procesu nodrošināšanai, kā arī radīta labvēlīga vide mikroorganismu aktivitātei (Biebighauser, 2009). Citviet pasaulē mākslīgie mitrāji plaši izmantoti dažāda veida ūdens piesārņojuma aizturēšanai un attīrīšanai.

Mākslīgie mitrāji visā pasaulē kopš 20. gs. sešdesmitajiem gadiem tiek plaši izmantoti kā notekūdeņu attīrīšanas iekārtas (Vymazal, 2002), lai aizturētu un attīrītu augu barības vielas, suspendētās vielas un uzlabotu ūdeņu kvalitāti, samazinot piesārņojumu no dažāda veida saimnieciskās darbības objektiem (Nivala et.al., 2007, Varga et.al., 2017). Pieejamie pētījumi demonstrē laboratorijas mēroga un lauka mēroga mākslīgo mitrāju darbības rezultātus, kur pielietotas atšķirīgas mākslīgo mitrāju konstrukcijas un projektēšanas principi (Fia et.al., 2012).

Bioloģiskie procesi mākslīgajos mitrājos ir labi izskaidroti, un tos pēc konstrukcijas var pielāgot konkrētās vietas klimatiskajiem, hidroloģiskajiem un ģeoloģiskajiem apstākļiem (Ventura et.al., 2019). Piesārņojošo vielu attīrīšanas process mākslīgajā mitrājā ir balstīts uz dabiskiem procesiem (Varga et.al., 2017), un tas var būt efektīvs salīdzinājumā ar citām bioloģiskās notekūdeņu attīrīšanas metodēm. Latvijā mākslīgo mitrāju pētījumu objekti ģeogrāfiski izvēlēti un tehnoloģiski projektēti, vadoties pēc citās valstīs esošajiem pētījumiem un aprēķiniem. Iegūtie rezultāti promocijas darbā iekļautajos pētījumu objektos Mežacīruļos un Zantē apliecina mākslīgo mitrāju efektivitāti Latvijas klimatiskajos un ekspluatācijas apstākļos.

Latvijā pirmie dokumentētie mākslīgie mitrāji tika uzbūvēti 2003. gadā. Būvniecības un ekspluatācijas nepilnību dēļ pirmā pieredze par mākslīgajiem mitrājiem kā attīrīšanas iekārtām Latvijā nebija daudzsološa. Būvniecības laikā īpaša uzmanība jāpievērš mitrāja filtra materiālam. Kompetenču trūkums šajā konkrētajā jomā, visticamāk, izraisīja zemu filtrācijas spēju dažos Latvijā izbūvēto mitrāju gadījumos, kad tika izvēlēts nepiemērots filtra materiāls, un/vai filtra materiāls tika sablīvēts ar smagu būvniecības tehniku. Tomēr daži sadzīves notekūdeņu attīrīšanai izveidotie mākslīgie mitrāji uzrādīja stabilus un daudzsološus rezultātus, samazinot bioķīmiskā skābekļa patēriņa (BSP₅), ķīmiskā skābekļa patēriņa (KSP) un kopējo suspendēto vielu (SV) koncentrācijas. Ūdeņu kvalitāte tika nodrošināta saskaņā ar spēkā esošajām likumdošanas prasībām Latvijā (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002). Minētajos mitrājos analizēti neregulāri vai epizodiski ievākti ūdeņu paraugi, kas nav pamats pilnvērtīgam pētījumam.

Kopš 2013. gada papildu uzmanība tika pievērsta ūdens kvalitātei no lauksaimnieciskās darbības Latvijā. ES Ūdens struktūrdirektīvas mērķis ir sasniegt un uzturēt labu stāvokli visiem virszemes ūdeņiem un gruntsūdeņiem ES teritorijā (European Commission 2000/60/EEC, 2000). Nitrātu direktīva nosaka teritorijas, kuras ir jutīgas pret ūdens piesārņojumu ar nitrātiem, un norāda nepieciešamību ieviest pasākumus, lai ierobežotu nitrātu zudumus un negatīvās izpausmes atklātās ūdenstilpēs (European Commission 91/676/EEC, 1991). Lai sasniegtu prasības attiecībā uz labu ūdens kvalitāti virszemes ūdeņos, jānovērš nitrātu izskalošanās no lauksaimniecības teritorijām (Berzina & Sudars, 2010). Zema enerģijas patēriņa un uzturēšanas izmaksu metode ir izmantot dabiskos apstākļus un pasīvu notekūdeņu attīrīšanu mākslīgajos mitrājos. Kopš 2014. gada jūnija Latvijā tika uzbūvēti un uzraudzīti divi mitrāji ūdeņu kvalitātes uzlabošanai no lauksaimnieciskās darbības ietekmētām platībām. Ministru kabinets Latvijā ir izdevis noteikumus (spēkā kopš 31.10.2014.), kuri nosaka kritērijus videi draudzīgiem meliorācijas sistēmu elementu būvniecībai (LR MK noteikumi N.600, 2014), un par minēto elementu ierīkošanu lauksaimnieki var iegūt papildu punktus, lai saņemtu atbalstu ieguldījumiem lauksaimniecības un mežsaimniecības infrastruktūras attīstībā. Lai veicinātu lauksaimnieku interesi pieteikties šim atbalstam, lauksaimniecības teritorijās tika ieviesti vairāki noteikumos paredzētie elementi un veikts to monitorings. Lauka mēroga izpētes vietas palīdzējušas iegūt pieredzi par videi draudzīgo meliorācijas sistēmu elementu izmantošanu, ņemot vērā īpašo lauksaimniecības pieeju, un uzraudzīt ieteikto elementu efektivitāti barības

vielu aizturēšanā. Mākslīgie mitrāji ir ieteikti kā viens no šiem videi draudzīgajiem meliorācijas sistēmu elementiem.

Promocijas darbā apskatīta divu pēc kvalitātes, apjoma un pieplūdes režīma atšķirīgu lauksaimniecības notecū attīrīšanas efektivitāte, izmantojot trīs dažādu konstrukciju mākslīgos mitrājus. Lauksaimniecības zemju īpatsvars Latvijā ir 35.2% no valsts kopējās teritorijas (VZD, 2022). Biogēno elementu noplūdes no lauksaimniecībā izmantotajām platībām rada piesārņojuma slodzi uz Baltijas jūru. Ūdeņu kvalitātes aizsardzības un uzlabojumu nepieciešamību Latvijas ūdenstecēs reglamentē Baltijas jūras vides aizsardzības Komisijas (HELCOM) un Eiropas Savienības (ES) likumdošanas akti, un atbilstoši tiem izstrādātā Latvijas likumdošana. Kopš 1991. gada Nitrātu direktīvā (European Commission 91/676/EEC, 1991) un ES Ūdens struktūrdirektīvā (European Commission 2000/60/EEC, 2000) iekļautas ūdeņu kvalitātes prasības. Ieteikumi lauksaimniekiem paredz iekļaut piesārņojumu aizturošus elementus jaunbūvējamās un atjaunojamās meliorācijas sistēmās. Minētie elementi ietver buferjoslas gar ūdenstecēm un ūdenskrātuvēm, sedimentācijas baseinus, divpakāpju grāvjus, kontrolēto drenāžu, kā arī mākslīgos mitrājus u.c. Latvijā joprojām ir maz pētījumu par mākslīgo mitrāju izmantošanu dažādu piesārņojošo vielu attīrīšanai no ūdens, tai skaitā par lauksaimniecības noteces attīrīšanu. Izvērtējot piesārņojošo vielu apjoma izmaiņas dažādu tipu mākslīgajos mitrājos, kas izbūvēti Latvijas hidroģeoloģiskajos un meteoroloģiskajos apstākļos, lauksaimniekiem būs iespēja izvēlēties savā individuālajā gadījumā piemērotāko noteces attīrīšanas metodi mākslīgajos mitrājos.

Pētījuma ietvaros izbūvēti un analizēti divu dažādu konstrukciju mākslīgie mitrāji. Jelgavas novada Zaļenieku pagasta zemnieku saimniecībā “Mežacīruļi” drenu un virszemes noteces attīrīšanai no lauksaimniecībā izmantotajām platībām izbūvēts virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs. Virszemes noteces uztveršanai un attīrīšanai no zemnieku saimniecības pagalma teritorijas ar cieto virsmas segumu izbūvēts akumulējošais krājbaseins priekšattīrīšanai un horizontālas pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs drenu un virszemes noteces attīrīšanai no lauksaimniecībā izmantotajām platībām izbūvēts arī Tukuma novada Zantes pagasta zemnieku saimniecībā “Vilciņi-1”.

Mākslīgo mitrāju darbības efektivitāte ūdeņu kvalitātes uzlabošanā šī pētījuma ietvaros vērtēta, vadoties pēc fosfora un slāpekļa savienojumu un suspendēto vielu, kā arī bioķīmiskā skābekļa patēriņa piecās dienās un ķīmiskā skābekļa patēriņa koncentrācijām pirms un pēc mākslīgajiem mitrājiem. Minātie ūdeņu kvalitātes rādītāji iekļauti Eiropas Komisijas sagatavotā Ietekmes uz vidi novērtējumā kā galvenie lauksaimnieciskās darbības radītā virszemes ūdeņu piesārņojuma veicinātāji (European Commission 91/676/EEC, 1991).

Pētījuma novitāte ir uz aprēķinu algoritma balstīts modelis piemērotākās mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlei atkarībā no attīrāmā notekūdeņu veida, apjoma, ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas un kombinācijas attīrāmajos ūdeņos, kā arī no vēlamās ūdeņu kvalitātes izplūdē. Šis aprēķina modelis piedāvās atbilstošu mākslīgā mitrāja tehnisko risinājumu un attiecīgā risinājuma optimālo platību un nozīmīgākās dimensijas. Pētījuma rezultāti dos iespēju saimnieciskās darbības veicējiem sabalansēt mākslīgā mitrāja praktisko, ekonomisko un vides nozīmi katrā konkrētajā notekūdeņu attīrīšanas gadījumā. Aprēķina metode izstrādāta, balstoties uz induktīvo izziņas ceļu. Pētījumā izstrādātais aprēķinu algoritms ir balstīts uz mākslīgo mitrāju spēju samazināt lauksaimniecības difūzā (izkliedētā) un punktveida piesārņojuma noplūdes pētījumu objektos Mežacīruļos un Zantē.

Promocijas darba tēmas izvēles pamatojums un aktualitāte

Promocijas darba saturs risina aktuālu vides aizsardzības problēmu, papildinot zināšanas par slāpekļa un fosfora savienojumu, suspendēto vielu, kā arī organisko vielu koncentrācijas samazināšanu notekūdeņos un izmantojot attīrīšanas metodi mākslīgajos mitrājos Latvijas meteoroloģiskajos, hidroģeoloģiskajos un apsaimniekošanas apstākļos. Tāpēc veikts pētījums, lai novērtētu augu barības vielu un suspendēto vielu aizturēšanu vienas zemnieku saimniecības mēroga divos pētījumu objektos Zemgalē. Iegūtie rezultāti izmantoti aprēķinu modeļa

aprobācijai, kas ļaus pieņemt provizorisku lēmumu par mākslīgā mitrāja kā notekūdeņu attīrīšanas iekārtas tehnisko risinājumu un galvenajām dimensijām.

Promocijas darba mērķis ir, balstoties uz empīriskiem novērojumiem pētījumu objektos, aprobēt mākslīgo mitrāju tehnisko risinājumu un izveidot dimensionēšanas metodiku saimnieciskās darbības izraisīta ūdens piesārņojuma samazināšanai Latvijā.

Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi

1. Izvērtēt dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju pielietojuma iespējas Latvijā pēc izcelsmes, sastāva un apjoma dažādu notekūdeņu attīrīšanai.
2. Noteikt un analizēt piesārņojošo vielu, tai skaitā slāpekļa un fosfora savienojumu, suspendēto vielu, bioloģiskā un ķīmiskā skābekļa patēriņa, koncentrāciju mainību notecē pēc notekūdeņu attīrīšanas mākslīgajā mitrājā.
3. Novērtēt piesārņojošo vielu samazināšanas efektivitāti divu dažādu tipu mākslīgajos mitrājos, ņemot vērā nozīmīgākos mitrāju darbību ietekmējošos ģeogrāfiskos un fizikālos faktorus.
4. Izstrādāt un pielietot aprēķinu metodiku un modeli dažāda veida, apjoma un sastāva notekūdeņu attīrīšanai, izmantojot mākslīgos mitrājus.

Promocijas darbā izmantotie materiāli un metodes

Dati par ūdeņu kvalitātes rādītājiem ievākti trīs atšķirīgas konstrukcijas mākslīgajos mitrājos Latvijā. Ūdeņu kvalitātes monitorings veikts, manuāli ievācot ūdeņu paraugus divas vai vienu reizi mēnesī pie ieplūdes un izplūdes no mākslīgā mitrāja. Ūdeņu analīzes veiktas akreditētās laboratorijās LHEI un BIOR, un noteikti sekojoši ūdeņu kvalitātes rādītāji: NH_4^+ -N, NO_3^- -N, N_{kop} , PO_4^{3-} -P, P_{kop} , SV, BSP_5 un KSP . Ūdeņu kvantitātes monitoringam izmantoti automātiskie ūdens līmeņa mērījumi, kas pārrēķināti atbilstoši izplūdes vai, pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja gadījumā, ieplūdes struktūras parametriem. Iegūto datu apstrādei izmantotas aprakstošās statistikas metodes, kā arī neparametriskie testi.

Promocijas darbā izvirzītā hipotēze

Atbilstošas konstrukcijas un dimensiju mākslīgie mitrāji uzlabo ūdens kvalitāti, samazinot vienas vai vairāku piesārņojošo vielu koncentrāciju ūdenī.

Aizstāvamās tēzes

1. Mākslīgais mitrājs nodrošina efektīvu ūdeņu attīrīšanu, izmantojot fizikālu un bioloģisku procesu norisi.
2. Ar mākslīgā mitrāja palīdzību piesārņojuma koncentrācijas ūdenī tiek samazinātas visās mērenā klimata sezonās.

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir mākslīgo mitrāju aprēķina un dimensionēšanas metodika, kas piemērota Latvijas apstākļiem, kas tika izstrādāta, pielietojot EPA (ASV) un CWA (Lielbritānija) rekomendācijas un pamatojoties uz izmērītajiem kritērijiem pilotobjektos. Šī aprēķinu metodika pielāgota atbilstoši Latvijas hidroloģiskajiem (notece, caurplūdumi, sateces baseinu izmēri) un meteoroloģiskajiem (sezonālitate, gaisa temperatūru mainība un periodiskums, nokrišņu daudzums un sadalījums novērojuma periodā) datiem un balstīta uz novēroto darbības efektivitāti ietekmējošiem faktoriem.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Līdz šim notekūdeņu attīrīšana mākslīgajā mitrājā Latvijā nav bijusi zinātniski pamatota, un tās pielietojums balstīts uz citu valstu pieredzi un rekomendācijām. Promocijas darbs pierāda, ka mākslīgie mitrāji pēc konstrukcijas un dimensijām var tikt pielāgoti efektīvai ūdeņu kvalitātes uzlabošanai Latvijai raksturīgos apstākļos. Turklāt promocijas darba ietvaros

aprobēta aprēķinu metodika notekūdeņu attīrīšanai mākslīgajos mitrājos Latvijā, tai skaitā piemērotas konstrukcijas izvēlei un mākslīgā mitrāja virsmas platības dimensionēšanai. Sagatavots aprēķina modelis, lai palīdzētu notekūdeņu apsaimniekotājiem un projektētājiem atkarībā no attīrāmo notekūdeņu parametriem izvēlēties attīrāmo notekūdeņu sastāvam, apjomam un pieplūdes režīmam piemērotāko mākslīgā mitrāja veidu un dimensijas.

Promocijas darbā iegūtie pētījuma rezultāti izmantoti kritēriju izstrādei, kas iekļauti LR MK noteikumos Nr. 776 (2021) par atbalsta piešķiršanu par barības vielu noteces samazināšanu, ierīkojot virszemes plūsmas mākslīgos mitrājus meliorētā lauksaimniecībā izmantojamā zemē.

Promocijas darba struktūra

Ievadā sniegts pamatojums pētāmās tēmas aktualitātei, formulēts zinātniskā darba mērķis un izvirzīti pētnieciskie uzdevumi, ieskicēta pētījuma novitāte, kā arī sniegts publikāciju un konferenču saraksts, kur darba autore publicējusi pētījuma rezultātus.

Literatūras apskata nodaļā sniegts izklāsts dažādas konstrukcijas mākslīgajiem mitrājiem un piedāvāts mākslīgo mitrāju pielietojums notekūdeņu attīrīšanā. Balstoties uz citu valstu pieredzi mākslīgo mitrāju izmantošanā, aprakstīts mākslīgo mitrāju pielietojums atkarībā no notekūdeņu veida. Skaidroti bioloģiskie un fizikālie mehānismi, kas nodrošina attīrīšanas procesus mākslīgajā mitrājā. Izvērtēta mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti noteicošo faktoru ietekme.

Materiālu un metodikas nodaļā raksturotas trīs pētījumā iekļautās mākslīgo mitrāju monitoringa vietas – virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos, pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos un virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē. Aprakstīta ūdeņu paraugu ievākšanas metodika, kā arī ūdeņu paraugu ķīmiskā sastāva noteikšanas metodika un pētījuma ietvaros izmantotā datu matemātiskās apstrādes metodika. Sniegts izklāsts mākslīgo mitrāju aprēķina metodikas izstrādei.

Rezultātu un diskusijas nodaļā veikta lauksaimniecības difūzā un punktveida piesārņojuma izmaiņu analīze divu dažādu konstrukciju mākslīgajos mitrājos Latvijā, balstoties uz monitoringa rezultātiem trīs pētījumā iekļautajos mākslīgo mitrāju pētījumu objektos. Tematiski analizētas ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora koncentrāciju izmaiņas pēc attīrīšanas mākslīgajā mitrājā, nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju izmaiņas, suspendēto vielu daudzuma izmaiņas pazemes un virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos. Veikta BSP₅ un KSP rādītāju izmaiņu analīze pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos. Nodaļā analizēta piesārņojuma izmaiņu dinamika pa sezonām atkarībā no meteoroloģiskajiem apstākļiem un mākslīgo mitrāju ekspluatācijas apstākļiem un ilguma. Apkopotī mākslīgo mitrāju aprēķini, pamatojoties uz citu valstu rekomendācijām un šajā pētījumā iegūtajiem rezultātiem. Balstoties uz apkopotajiem un pielietotajiem aprēķiniem, sagatavots automātisks aprēķinu modelis dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju dimensionēšanai atbilstoši izvēlētajiem notekūdeņu ieplūdes un izplūdes parametriem.

Secinājumu sadaļā sniegta atbilde uz promocijas darbā izvirzītajiem pētnieciskajiem uzdevumiem un sagatavots pamatojums hipotēzes apstiprināšanai. Darba nobeigumā apkopotī pētījumā iekļautie informācijas avoti un sniegts to bibliogrāfisks saraksts.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Mākslīgie mitrāji ūdeņu kvalitātes uzlabošanai tiek plaši pielietoti citviet Eiropā un ASV. Mākslīgo mitrāju darbības princips aizgūts no dabīgos mitrājos noritošiem bioloģiskiem un fizikāliem procesiem. Mākslīgie mitrāji tiek projektēti un būvēti ūdens kvalitātes uzlabošanai, veicinot un intensificējot dabā notiekošos ūdens pašattīršanās procesus. Veģetācija papildina attīrīšanas funkciju mitrājā. Dažāda veida notekūdeņu attīrīšana, izmantojot dabā balstītus procesus, ir ekonomiski pamatota, efektīva un ilgtspējīga. Šajā nodaļā sniegts ieskats par mākslīgo mitrāju darbības principu, pielietojumu dažāda veida notekūdeņu attīrīšanā un to efektivitāti ietekmējošajiem faktoriem.

1.1. Dabīgie mitrāji

Mitrāji ir kā pārejas zona starp ūdens vidi un sauszemi (General considerations, 1995). Dabīgais mitrājs ir viena no izplatītākajām ūdeņu ekosistēmām humīdā klimata un hidroloģiskajos apstākļos, arī Latvijā. Ramsāres konvencijas pirmais pants nosaka, ka dabīgie mitrāji ir palienes, zāļu un kūdras purvi vai ūdeņu platības – dabīgas vai mākslīgas, pastāvīgas vai pārplūstošas, kurās ir stāvošs vai tekošs ūdens, saldūdens, iesālš vai sāļš ūdens, t.sk. jūras akvatorijas, kuru dziļums bēguma laikā nepārsniedz 6 metrus (The Ramsar Convention, 1971). Dabīgs mitrājs pēc definīcijas var tikt novērtēts kā periodiski pārmitra vai pastāvīgi mitra vai zem ūdens esoša teritorija. Arī upju palienes, zāļu un kūdras purvi un citas dabīgas teritorijas, kur augsne ir piesātināta ar ūdeni, var tikt uzskatītas par dabīgiem mitrājiem. Dabīgu mitrāju ierasti klāj veģetācija, kas piemērota augšanai paaugstinātā mitruma apstākļos. Ja augsnes virskārta ir pastāvīgi vai regulāri klāta ar ūdens slāni, mainās šīs platības veģetācija, pielāgojoties attiecīgiem apstākļiem. Šajā teritorijā attīstās mitrumu mīloši augi, līdz dabīgu procesu rezultātā izveidojas purvs, dumbrājs vai dabisks mitrājs (Feuerbrach & Strand, 2010). Dabīgie mitrāji piedalās apkārtējo teritoriju noteces regulēšanā, ūdeņu kvalitātes uzlabošanā un nodrošina bioloģisko daudzveidību.

Nozīmīgu daļu, 10.4% no Latvijas teritorijas, aizņem purvi kā viens no dabīgo mitrāju veidiem. Latvijā, atbilstoši Ramsāres konvencijas definīcijai, satopami arī citi dabīgo mitrāju veidi – palieņu pļavas, piekrastes pļavas u.c. Faktiski arī Baltijas jūras un Rīgas jūras līča akvatorija līdz 6 m dziļumam pieskaitāma pie dabiskiem mitrājiem (VARAM, 2006), kā arī ezeri un dabīgās ūdenstilpes ar dziļumu līdz 6 metriem.

Vairums no Latvijā lauksaimniecībā izmantojamajām platībām mitruma pārpalikuma ietekmē ir dabiski pārmitras vai periodiski pārplūstošas, daļa no tām ir drenētas, jo pārmērīgs mitrums kavē kultūraugu attīstību un platību apstrādāšanu. Latvijā lauksaimniecības zemju nosusināšana ar grāvju un drenu sistēmām uzsākta jau 17. gs. sasniedzot 1.6 milj. ha ar drenāžu nosusinātu platību. Liekais mitrums no lauksaimniecības zemēm, kur traucēta pilnvērtīgas kultūraugu ražas iegūšana, tiek uztverts ar drenāžas palīdzību un novadīts līdz meliorācijas sistēmu notekām. Drenu notece kopā ar izskalotajām augu barības vielām un suspendētajām augsnes daļiņām nonāk dabīgajās ūdenstilpnēs, radot nevēlamu slogu uz ūdeņu ekosistēmām (European Commission 91/676/EEC, 1991).

Mitrāji ir viena no dabas produktīvākajām ekosistēmām (Biebighauser, 2011). Raugoties no ekoloģiskā viedokļa, šīs dabiskās periodiski vai pastāvīgi ar ūdens slāni klātās platības nodrošina dabisku noteces attīrīšanu no augu barības elementiem, nepieļaujot to nokļūšanu dabīgās ūdenskrātuvēs, tiek aizturētas suspendētās vielas, kā arī tiek nodrošināta bioloģiskā daudzveidība. Seklie ūdeņi ar veģetāciju darbojas kā platforma, kur noris biogēno elementu uztveršana, akumulācija, pārveidošana un rezultātā caur seklu ūdens slāni plūstošais ūdens tiek attīrīts, piemēram, denitrifikācijas rezultātā, kur baktērijas pārveido nitrātus par slāpekļa gāzveida savienojumiem, bet ar suspendētajām vielām, augsnes daļiņām, organiskajām vai citām vielām saistītie fosfora savienojumi izgulsnējas mitrāja gultnē (Vymazal et.al., 2020).

Augi izmanto biogēnos elementus kā barības vielas savai augšanai, tālāk augi kalpo kā oglekļa avots baktērijām, un augu virszemes daļa kā barošanās vieta un patvērums putniem, abiniekiem un bezmugurkaulniekiem (Feuerbrach & Strand, 2010).

Katrai sugai ir savas prasības pēc specifiskiem vides faktoriem. Katra augu, dzīvnieku, kukaiņu, mikroorganismu suga ieņem savu zināmu vietu ekosistēmā atbilstoši tās bioloģiskā attīstības cikla posmam. Sugas nepārtraukti mijiedarbojas savā starpā, kalpojot par patvērumu, konkurējot, sadarbojoties. Šis dabas izveidotais līdzsvars pastāv ar vai bez cilvēka klātbūtnes un iejaukšanās. Viena sugas izžušana vai īpatņu skaita samazināšanās līdz minimumam var izraisīt grūti paredzamas sekas nākotnē. Diemžēl cilvēces ietekme uz dabas līdzsvaru un daudzveidību arvien biežāk ir negatīva un degradējoša. Latvijā joprojām ir sastopama liela dabisko ekosistēmu daudzveidība, tomēr daudzi cilvēka saimnieciskās darbības veidi turpina izmainīt sugu sastāvu un skaitu (LR MK noteikumi Nr. 327, 2015).

Lai saglabātu un palielinātu bioloģisko daudzveidību, ir svarīgi radīt dažādas un atšķirīgas dzīves vides (dzīvotnes), tai skaitā ūdens vides. Mitrājiem, dīķiem un citām ūdens vidēm var būt vairāk nekā viena funkcija, piemēram, vaļējs dīķis var reizē kalpot kā ūdens uzkrāšanas baseins apūdeņošanai, kā zivju dīķis makšķerēšanai, kā ugunsdzēsības dīķis vai ainavas elements. Mazliet pamainot vides apstākļus vai dimensijas, iespējams pievienot vienai ūdens dzīvotnei vēl citas funkcijas, tādējādi paaugstinot šīs dzīvotnes vērtību, īpaši bioloģisko vērtību (Feuerbrach; Strand, 2010).

Mitrāja vide ir piemērota bioloģiskās daudzveidības radīšanai (Greenway, 2017) arī tāpēc, ka iespējams izveidot atšķirīgus dzīves vides apstākļus pat viena mitrāja ietvaros – izmantojot dažādus ūdens dziļumus, izvietojot grupās vairākas atšķirīgas augu sugas. Mitrāju iespējams veidot ar savstarpēji kombinētiem tehniskajiem risinājumiem, kur vaļējs ūdens mijas ar filtrējošiem grunts posmiem (Crites et.al., 2014). Vaļējā ūdens daļā iespējams variēt ar ūdensaugu sugām – garākie augi, piemēram, parastā niedre (*Phragmites australis*) un parastā jeb smaržīgā kalme (*Acorus calamus*) mijas ar zemākiem augiem kā upes kosa (*Equisetum fluviatile*) vai purva kosa (*Equisetum palustre*) un purva purene (*Caltha palustris*). Pazemes plūsmas mitrāju sadzīves vai citu notekūdeņu attīrīšanai, kur ūdens plūst cauri filtrējošam grunts slānim, līdzīgi iespējams padarīt daudzveidīgu, izmantojot dažādas mitrumu mīlošo augu sugas, izvēloties neregulāru mitrāja formu un iekļaujot mitrāja virszemes daļu ainavā.

Lai nodrošinātu lielāku sugu daudzveidību, virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā gar malām var izveidot pārejas joslu no sauszemes uz atklātu ūdeni, dziļāks ūdens slānis tiek projektēts pamīšus ar seklūdens zonām, veidojot piemērotu patvērumu lielāku un mazāku ūdensputnu ligzdošanai un barības meklēšanai, mājvietu dažādām kukaiņu sugām no viensūņiem līdz posmkājiem un vabolēm, slēpni un medību vietu abiniekiem un zīdītājiem. Mitrāju var papildināt ar kritušu koku, ko labprāt apdzīvos kukaiņi un abinieki. Mitrāja pamatnē izvietoti lielāki akmeņi dos patvērumu vēžveidīgajiem (Jansons & Grinberga, 2012). Lai piesaistītu ūdensputnus to ligzdošanas laikā, veido aptuveni 1 m² lielas uzbērtas grunts vai peldošas salas, ko ar lokanu trosi piestiprina pie dīķa pamatnes.

Lai gan par bioloģiskās daudzveidības tēmu ir pieejams plašs zinātnisks materiāls, pieņēmumi, pierādījumi un definīcijas ir diezgan pretrunīgas. Ja mākslīgo mitrāju regulāri un atbilstoši apsaimnieko, tad ir izveidota jauna, dabiskai videi tuva ūdeņu ekosistēma, kas pēc būtības ir bioloģisko daudzveidību veicinošs faktors, kā to nosaka viena no bioloģiskās daudzveidības teorijām (Biebighauser, 2011), lai gan šajā pētniecības virzienā ir daudz pretrunu. Ja mākslīgo mitrāju neapsaimnieko, tad jaunizveidotā ūdens ekosistēmā dabiskie procesi norisinās netraucēti un periodiski notiek sukcesija jeb pāreja uz nākamo biotopa līmeni. Pie paaugstināta augu barības elementu satura ūdenī notiek pastiprināta ūdensaugu attīstība. Ūdenskrātuve aizaug sākumā ar lakstaugiem, tad ieviešas krūmi, un visbeidzot Latvijas klimatiskajā zonā dabiskais pamatstāvoklis un hidroloģiskais režīms, kas gada griezumā nosaka mitruma pārpalikumu, noved pie meža vai atsevišķos gadījumos pie purva izveidošanās.

Pētījumā iekļautā ūdeņu attīrīšanas metode balstīta uz bioloģiskiem un fizikāliem procesiem. Mākslīgais mitrājs ir bioloģiska attīrīšanas iekārta, kas paredzēta ūdeņu kvalitātes

uzlabošanai (Varga et.al., 2017), mehāniski un/vai bioloģiski attīrot dažāda veida notekūdeņus, tai skaitā ražošanas notekūdeņu, sadzīves notekūdeņu, lauksaimnieciskās darbības radīto notekūdeņu attīrīšanai. Mākslīgā mitrāja darbības princips balstīts uz dabā notiekošajiem ūdeņu pašattīrīšanās procesiem (Crites et.al., 2014), t.sk. mitrāju īpašību aizturēt suspendētās augsnes daļiņas un izšķīdušās vielas. Piesārņojuma atdalīšanai tiek izmantots ar mikroorganismiem piesātināts rupjas smilts filtrs vai sekls dīķis. Papildu vielas, kas nodrošinātu notekūdeņu attīrīšanu, ekspluatācijas laikā nav jāpievieno. Notekūdeņu attīrīšanas efektivitāti mākslīgā mitrājā uzlabo veģetācija. Smilts filtra virskārtā vai sekļajā ūdens slānī izveido parasto niedru (*Phragmites australis*) vai citu mitrumu mīlošu augu stādījumus. Veģetācijai piemērotāk izvēlēties tādus augus, kas sastopami dabā netālā apkārtnē. Tehnoloģiski mākslīgais mitrājs tiek projektēts kā ar ūdeni piesātināts filtrs vai sekls ūdens slānis, kas papildināts ar atbilstošu veģetāciju. Mākslīgais mitrājs ir cilvēka veidota būve, kas radīta ar mērķi bioloģiski attīrīt notekūdeni no piesārņojuma. Mākslīgajā mitrājā ir izmantotas dabīgā mitrāja īpašības akumulēt un filtrēt ūdeni, noārdīt organiskos savienojumus un uzņemt radušos biogēnos elementus un pārveidot tos biomasā. Mitrājus var projektēt ar mērķi attīrīt ūdens piesārņojumu, mazināt plūdu ietekmes, papildināt gruntsūdens krājumus un/vai kā ainavas elementu, kas nodrošina iedzīvotājiem iespēju vērot dzīvās dabas daudzveidību (Biebighauser, 2011). Visbiežāk mitrāji nodrošina vairākas funkcijas, kuras var pievienot arī mērķtiecīgi jau projektēšanas stadijā.

Publikācijās piedāvāti vairāki šīs notekūdeņu attīrīšanas metodes nosaukumi. Starptautiskajā literatūrā visplašāk lietots termins *constructed wetland* (konstruētā, projektētā mitrzone) (Gajewska et.al., 2020; Castellar et.al., 2022). Sastopami arī tādi nosaukumi kā *reed bed treatment systems* (niedru dobes pārstrādes sistēmas) (Crites et.al., 2014), *reed beds* (niedru dobes), attiecinot to uz pazemes plūsmas mākslīgajiem mitrājiem (Said et.al., 2021), *treatment wetlands* (attīrīšanas mitrzones) (Mader et.al., 2022), *aquatic plant systems* (ūdensaugu sistēmas) (Brown et al., 2000) u.c. Latviešu valodā dažādas nozīmes publikācijas izmantoti gan tiešie tulkojumi no angļu valodas, gan dažādi sinonīmi, piemēram, niedru dobe, augu filtrs, mitrzone, mitrene, mitraine un mitrājs. Termins “mākslīgais mitrājs” korekti ietver visas mākslīgo mitrāju pielietojuma iespējas atkarībā no konkrētās tehnoloģijas un plūsmas virziena caur filtra daļu, papildinot terminu ar attiecīgiem paskaidrojošiem vārdiem. Šajā un turpmākajos pētījumos izmantots latviskais termins “mākslīgais mitrājs”.

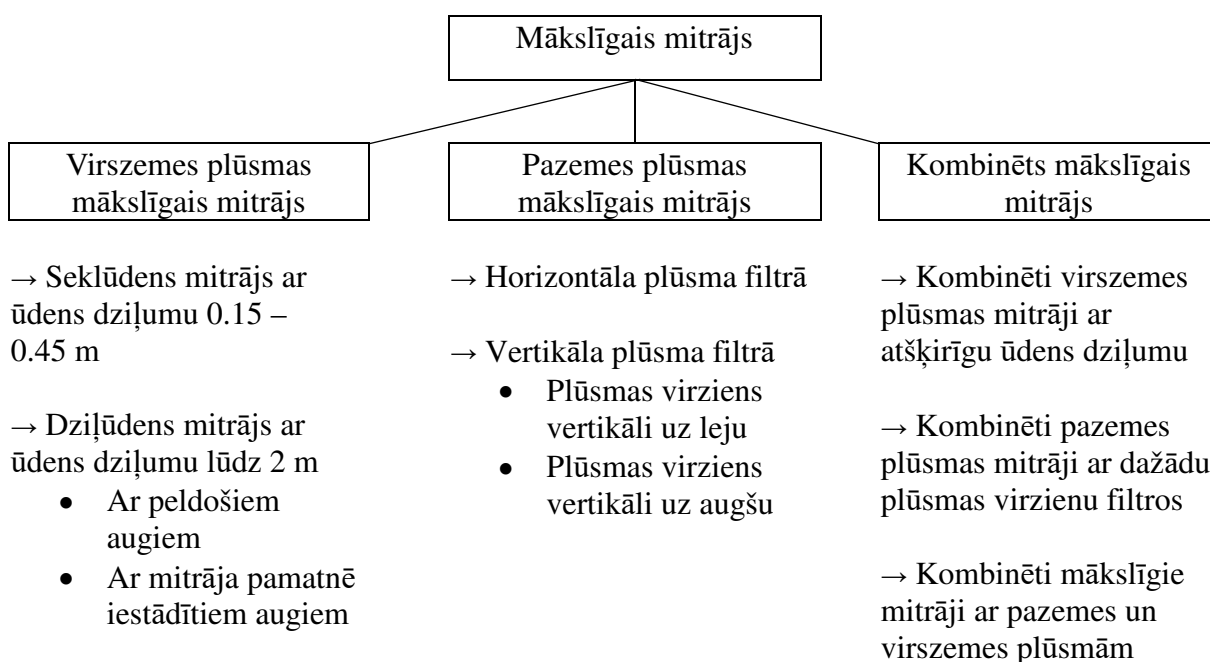
1.2. Dažādas konstrukcijas mākslīgie mitrāji

Imitējot dabiskos mitrājus pēc formas, izmēra, dziļuma, ūdens plūsmas virziena, tiek veidots mākslīgais mitrājs kā notekūdeņu attīrīšanas vai ūdens kvalitātes uzlabošanas ietaise ar mērķi uzkrāt ūdeni, aizkavēt noteci un atdalīt ūdenī esošās izšķīdušās un suspendētās piesārņojošās vielas (Castellar et.al., 2022). No tādām mitrāja dimensijām kā garums, platums, dziļums, virsmas laukums atkarīgs ūdeņu uzturēšanās laiks mitrājā un caurplūdušo ūdeņu attīrīšanas pakāpe. Ūdens attīrīšanai, ja piesārņojošo vielu koncentrācija ir augsta, nepieciešams patērēt ilgāku laiku nekā nosacīti tīrāka ūdens attīrīšanai, kurā piesārņojošo vielu koncentrācija ir zemāka. Mākslīgā mitrāja konstrukcija atšķiras arī atkarībā no piesārņojošo vielu rakstura un piesārņotā ūdens avota (notece no lauksaimniecības zemēm, sadzīves notekūdeņi, lietus notekūdeņi, ražošanas notekūdeņi). Mākslīgā mitrāja konstrukciju iespējams pielāgot arī īpaši stipri piesārņota ūdens kvalitātes uzlabošanai (Gajewska et.al., 2020), piemēram, specifisku rūpniecības notekūdeņu ar augstu bioloģiskā skābekļa patēriņu (BSP₅) attīrīšanai. Mitrāju var izmantot gan kā vienīgo attīrīšanas ietaisi, gan kā kopējās attīrīšanas sistēmas atsevišķu sastāvdaļu.

Mitrājus var ierīkot ar ūdens infiltrāciju gruntī, kur attīrītie notekūdeņi sasniedz gruntsūdeņus, vai atdalītus no gruntsūdeņiem ar hidroizolējošu materiālu mitrāja pamatnē, kur attīrītais notekūdens tiek ievadīts virszemes ūdeņos pēc pieļaujamo kvalitātes rādītāju sasniegšanas. Mitrāja plūsmas nonākšana gruntsūdeņos pieļaujama atkarībā no notekūdeņos

esošo piesārņojošo vielu veida un koncentrācijas un šo parametru atbilstības spēkā esošajiem normatīvajiem dokumentiem. Latvijā mākslīgie mitrāji šobrīd nav izplatīti un tāpēc trūkst uz Latvijas datiem balstītu pētījumu. Ieteikumi mākslīgo mitrāju pielietojumam doti balstoties uz citu valstu pieredzi un pielāgojot risinājumus Latvijas apstākļiem.

Pēc konstrukcijas mākslīgos mitrājus iedala virszemes plūsmas un pazemes plūsmas mitrājos (Mahmood et.al., 2013). Mākslīgos mitrājus var veidot arī ar kombinētu notekūdeņu plūsmas režīmu. Vienā mitrāja sistēmā iespējams apvienot vaļēja ūdens sekciju ar filtrējošu pazemes plūsmas sekciju. Tādējādi iespējams apvienot atšķirīgo konstrukciju priekšrocības. Katrs no mitrāju veidiem var tikt pielāgots dažādu piesārņotu ūdeņu attīrīšanai (Ventura et.al., 2019). Shematiski 1.1. attēlā apkopots populārāko mākslīgo mitrāju veidu iedalījums atkarībā no konstrukcijas un plūsmas režīma.



1.1. att. Mākslīgo mitrāju iedalījums atkarībā no konstrukcijas un plūsmas režīma

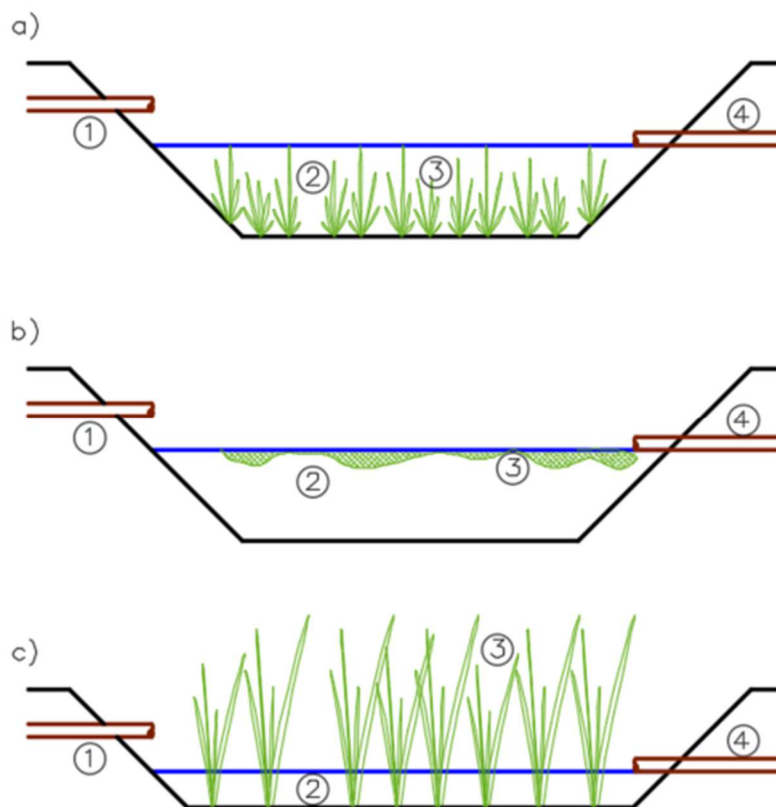
Veicot zinātniskus pētījumus un attīstoties tehnoloģiskajiem risinājumiem, tiek projektēti, pētīti un ekspluatēti dažādi inovatīvi mākslīgo mitrāju paveidi, kuru galvenais mērķis ir pastiprināt vienu vai vairākus atsevišķus attīrīšanas procesus (Ventura et.al., 2019). Šīs inovācijas ietver tādas stratēģijas kā notekūdeņu daļēja recirkulācija, plūdmaiņu režīms, periodiski paaugstinot un pazeminot ūdens līmeni mitrājā, notekūdeņu plūsmas virziena abpusēja kustība, slieku integrācija u.c. Notekūdeņu aerobo baktēriju intensifikācija notiek mākslīgajos mitrājos ar piespiedu aerāciju, gaisu vai skābekli ievadot mitrāja pamatnē ar kompresoru palīdzību (Varga et.al., 2017).

1.2.1. Virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji

Virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos attīrīšanas procesi norisinās vaļēja ūdens slānī ar ieteicamo dziļumu 0.25 – 2 m. Notekūdēns lēni plūst cauri seklajam ūdens slānim, kurā iestādīti ūdensaugi. Latvijas klimatiskajos apstākļos virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji piemēroti tādu notekūdeņu attīrīšanai, kur pieļaujama virsējā ūdens slāņa sasalšana un attīrīšanas procesu sezonāla palēnināšanās gada aukstajā periodā. Visbiežāk tos izmanto

lauksaimniecības noteces attīrīšanai un lietus ūdeņu uzkrāšanai un attīrīšanai (Gimenez-Maranges et.al., 2020). Tie labi kalpo suspendēto daļiņu atdalīšanai, ja notekūdens satur smiltis, māla daļiņas, augsnes un augu daļiņas (Gordon et.al., 2021).

Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā galvenā attīrīšana notiek seklā ūdens slānī ar veģetāciju, notekūdenim lēni pārvietojoties izplūdes virzienā (Galanopolos & Lyberatos, 2016). Projektējot šo ūdens attīrīšanas sistēmu, atkarībā no notekūdeņu kvalitātes parametriem, iespējams variēt ar vairākiem dažāda dziļuma sektoriem, jau projektēšanas laikā paredzot nogulšņu un ūdensaugu periodisku izvākšanu. Iespēju iztīrīt mitrāja pamatni no izgulsnētām daļiņām un apauguma paredz, pielāgojot mitrāja dimensijas pieejamās tehnikas iespējām. Ieplūdes daļu (tas var būt drenu kolektors, sadzīves notekūdeņu kolektors, cauruļvads vai vaļēja tekne atkarībā no notekūdeņu avota) novieto virs projektētā ūdens līmeņa mitrājā vai zem tā, ja iztekas appludināšana ir pieļaujama. Ieplūdes daļu var veidot ar grants apbērumu, kas kalpo kā filtrs rupjāko piemaisījumu atdalīšanai un pasargā cauruļvadu no aizsalšanas. Mitrāju apstāda ar mitrumu mīlošiem augiem, tos izvietojot gar krastu un seklākajās zonās, mitrāja pamatnē stāda ūdensaugus vai izmanto peldošus ūdensaugus. Veģetācija tiešā veidā var uzņemt ap 30% no ūdenī esošajiem biogēnajiem elementiem un pārveidot tos ūdensaugu zaļajā masā, tādējādi sekmējot ūdens attīrīšanas procesus. Veģetācija nodrošina arī baktēriju darbību.



1.2. att. **Virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju shēmas**

1. Ieplūdes caurule; 2. Sekls ūdens slānis; 3. Ūdensaugi; 4. Izplūdes caurule.

Atkarībā no veģetācijas veida, seklā ūdens slānī: a) iegremdēti augi; b) peldoši augi; c) daļēji iegremdēti augi.

Ja nepieciešams veikt attīrītā notekūdens uzskaiti un kontroli, kā arī tad, ja piesārņojošo vielu koncentrācija notekūdenī rada piesārņošanas risku videi, mitrāja pamatnē ieklāj hidroizolācijas slāni un paredz izbūvēt izplūdes cauruli no mitrāja uz kontrolaku. Attīrīto notekūdeni pa izplūdes cauruli ievada tuvākajos virszemes dabas ūdeņos vai infitrē gruntī. Šādā gadījumā, ja mitrājs tiek izolēts no gruntsūdeņiem, attīrītais ūdens jānovada uz tuvāko dabisko virszemes ūdenskrātuvi un jāreķinās, ka ūdens līmenis būs atkarīgs no notekūdeņu pieplūdes nevis no gruntsūdens līmeņa. Lai nepieļautu notekūdens iesūkšanos gruntī, izmanto

geomembrānu, PE plēvi vai bļietētu māla slāni. Ja grunts konkrētajā vietā ir ūdensnecaurlaidīga, tad ūdens saglabāsies mitrājā arī bez papildu hidroizolācijas.

Mitrāja pamatnes seklākajās zonās sastāda piemērotus ūdensaugus, kā arī pamatni veido nelīdzenu, izvietojot lielākus akmeņus, lai novērstu ātru un tiešu ūdens caurteci (Jansons & Grinberga, 2012). Svarīgi izvietot ieplūdi un izplūdi savstarpēji tā, lai ūdens veiktu garāko iespējamo ceļu cauri mākslīgajam mitrājam. Vēlamais ūdens apmaiņas ātrums ir vismaz 3 diennaktis atkarībā no ieplūstošās un vēlamās piesārņojošo vielu koncentrācijas ūdenī. Svarīgi, ka ūdens kvalitātes uzlabošanai tiek izmantota visa mitrāja platība, ūdens pavada mitrājā iespējami ilgāku laika posmu, tādējādi nodrošinot pilnīgāku ūdens attīrīšanu.

Virszemes plūsmas mitrājus iedala detalizētākās apakškategorijs atkarībā no ūdens slāņa dziļuma vai atkarībā no izmantotajiem augiem, jo šie parametri var izmainīt vides apstākļus mitrājā un tādējādi mainīt notiekošos attīrīšanas procesus. No tādiem apstākļiem kā vides reakcija, skābekļa daudzums, gaismas daudzums, izvēlēta augu suga u.c. atkarīgs piesārņojošo vielu samazinājums (Galanopolos & Lyberatos, 2016) pēc izplūdes no mitrāja. Nozīmīgi parametri, kurus nosaka aprēķinu veidā, ir mitrāja virsmas laukums, dziļums un tilpums. Notekūdeņu kustību cauri mitrājam dažādos literatūras avotos iesaka 30 m·dnn⁻¹ pie 0.3 m ūdens dziļuma (Brown et al., 2000).

1.2.2. Pazemes plūsmas mākslīgie mitrāji

Ūdens līmenis pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā tiek uzturēts zemāk par zemes virsmu, un vaļējs ūdens virs pazemes plūsmas mitrāja parasti nav redzams. Ūdens plūsma filtrējas cauri mitrāja filtra daļai, kas veidota pēc iespējas ūdenscaurlaidīga no rupjas smilts vai grants (Biebighauser, 2011). Filtru apstāda ar mitrumu mīlošiem augiem. Rezultātā gan suspendētās vielas, gan organiskās vielas, gan arī biogēnie elementi, kurus satur mitrājā ieplūstošais ūdens, paliek filtra daļā, tur tie uzkrājas, mineralizējas, pārveidojas no vienas formas otrā, tiek uzņemti ar augu saknēm un patērēti biomasas pieaugumam. Pazemes plūsmas mitrājus iespējams pielāgot dažādu notekūdeņu attīrīšanai, bet tie īpaši piemēroti sadzīves un citu organiskās vielas saturošu notekūdeņu attīrīšanai, jo aizkavē smaku izplatīšanos.

Filtra slānim izvēlas nešķīstošu, inertu materiālu ar labu filtrācijas spēju. Latvijas apstākļiem piemērota rupja skalota smiltis ar frakciju 4 – 6 mm ar filtrācijas koeficientu 20 m·dnn⁻¹ (Vymazal & Kropfelova, 2010). Ieplūdes un infiltrācijas daļu var veidot no rupjāka materiāla, piemēram, grants ar frakciju 5 – 20 mm, lai samazinātu ieplūdes daļas piesērēšanas risku.

Pazemes plūsmas mitrāja filtrs ir pilnībā vai daļēji piesātināts ar ūdeni. Kontrolākā iespējams paredzēt iespēju ūdens līmeņa regulēšanai mitrāja filtrā. Ja pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā paredz attīrīt notekūdeņus, kuri var pasliktināt apkārtējās vides kvalitāti un rada piesārņošanas risku, tad starp grunti un filtra bērumu iebūvē geomembrānu vai PE plēvi 2 mm biezumā, kuru klāj divās kārtās uz 0.05 – 0.1 m biezas smilts pamatnes. Plēvi savstarpēji pārsedz 1.5 m platumā, kas nodrošina tās ūdensnecaurlaidību un dod iespēju filtru iebūvēt ar mehānismiem. Drenu galos paredz ventilāciju, ko izvada virs zemes, kas veicina filtra aerāciju un piesērēšanas gadījumā iespējams drenu izskalot.

Citu valstu pētījumos norādīts, ka slāpekļa savienojumu uzņemšanas spēja mitrājā mainās atkarībā no sezonas, veģetācijas periodā tā ievērojami palielinās (Vymazal, 2007). Fosfora samazināšanās efektivitāte caurplūstošajā notekūdenī ir atkarīga no mitrāja filtra materiāla akumulēšanas spējām, kas ekspluatācijas laikā pakāpeniski samazinās (Nurmahomed et.al., 2022).

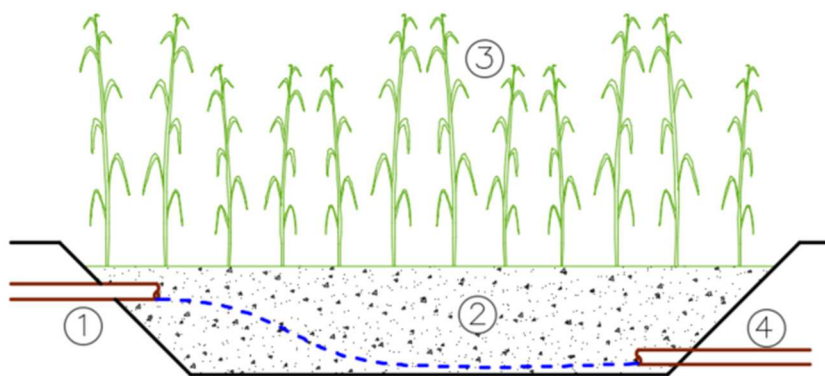
Pazemes plūsmas mitrājus var iedalīt detalizētāk atkarībā no ūdens plūsmas virziena – vertikāli uz augšu, vertikāli uz leju vai horizontāli. Labvēlīga klimata apstākļos, kur gaisa temperatūra nav zemāka par 0 °C, notekūdeņus izsmidzina vai uzpludina virs mitrāja filtra daļas, ļaujot tam iesūkties filtrā un filtrēties vertikāli no filtra virsmas līdz drenāžas caurulēm

apakšējā daļā. Latvijas apstākļos notekūdeņu padevei vēlams izmantot gruntī iegremdētus cauruļvadus, kuri pasargāti no aizsalšanas ziemas apstākļos.

Horizontālas pazemes pūsas mākslīgie mitrāji ir bioloģiska attīrīšanas iekārta, kur notekūdeņi tiek vadīti cauri rupjas smilts vai grants filtram horizontālā virzienā.

Mākslīgos mitrājus ar horizontālu filtrāciju jeb horizontālu ūdens plūsmu filtrā ierīko ar aprēķinu, lai notekūdens plūsma būtu virzīta horizontāli no ieplūdes līdz izplūdei (Gajewska et.al., 2020). Notekūdeņu plūsmas ceļa garumu paredz 5 – 8 m no infiltrācijas caurules līdz drenai, ja rēķina ūdens kustības ātrumu cauri filtra daļai atbilstoši skalotas rupjas smilts filtrācijas koeficientam. Sadalošās caurules izvieto filtra vienā malā ap 10 – 20 cm dziļumā, turklāt tās jāaizsargā, lai ziemas laikā neaizsaltu, piemēram, tās apberot ar grunti, kas izrakta no filtra daļas būvniecības laikā.

Filtra dobi-filtru mākslīgam mitrājam veido no rupjas smilts vai grants un apstāda ar niedrēm, kuras bagātina filtru ar skābekli, irdina grunti, nodrošina baktēriju darbību un rada estētisku vidi. Nepieciešamā mitrāja platība notekūdeņu attīrīšanai, ko rada 1 CE (cilvēka ekvivalents), provizoriski ir 6 – 8 m². Mitrājus var izmantot arī ražošanas notekūdeņu attīrīšanai pieņemot vienu CE vienādu ar 60 g·dnn⁻¹ BSP₅. Infiltrācijas caurule kalpo notekūdeņu izkļiedēšanai filtra platībā, tāpēc tā tiek iebūvēta rupjas grants (5 – 20 mm) apbērumā.



1.3. att. **Horizontālas pazemes pūsas mākslīgā mitrāja shēma**

1. Ieplūdes caurule; 2. Rupjas smilts vai grants filtrs; 3. Mitrumu mīloši augi; 4. Izplūdes caurule.

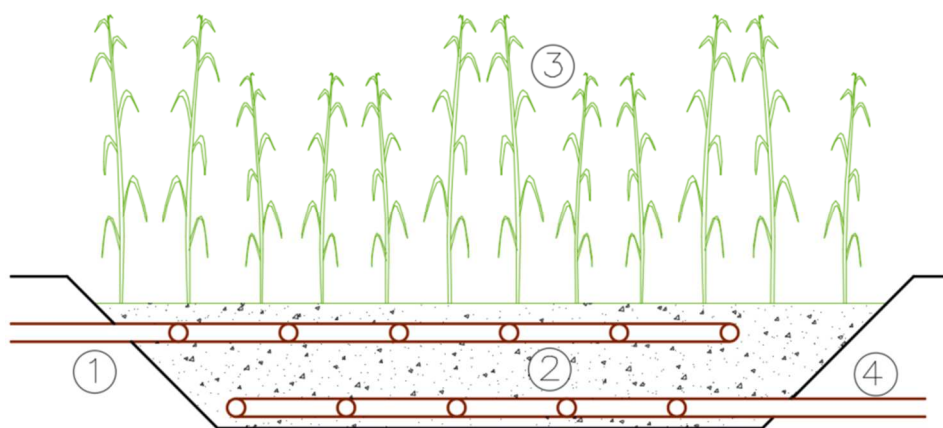
Mākslīgos mitrājus ar horizontālu plūsmas virzienu filtrā uzskata par vienu no piemērotākajām mitrāju konstrukcijām mērena klimata apstākļos, jo no piesārņojuma attīšanas viedokļa tas ir visdrošākais pret procesu palēnināšanos ziemas laikā. Bioloģiskie procesi balstīti vairāk uz nitrātu slāpekļa koncentrācijas samazināšanu, jo notekūdeņu plūsmas zonā, kā redzams arī 1.3. attēlā, skābekļa piekļuve ir ierobežota, veidojas anoksās un anaerobās zonas. Arvien plašāk pētījumos tiek iekļauti horizontālas pazemes pūsas mākslīgie mitrāji ar piespiedu aerāciju, kas piemēroti notekūdeņu attīrīšanai ar augstu organisko vielu saturu, piemēram, sadzīves notekūdeņu attīrīšanai. Tādā gadījumā mitrāja filtra apakšējā daļā tiek izvietots gaisa padeves cauruļu tīkls, kompresors pastāvīgi vai periodiski padod gaisu tieši filtra iekšpusē, tādējādi nodrošinot aerobo baktēriju darbību. Pētījumi liecina, ka šāda pieeja ļauj samazināt nepieciešamo mitrāja laukumu uz vienu cilvēka vienību jeb personas ekvivalentu (AL Falahi et.al., 2021). Izvēloties mitrāja piespiedu aerāciju, jāņem vērā ar ekspluatācijas izdevumu palielinājumu elektroenerģijas izmaksu dēļ.

Vertikālas pazemes pūsas mākslīgie mitrāji ir bioloģiska attīrīšanas iekārta, kur notekūdeņi tiek vadīti cauri rupjas smilts vai grants filtram vertikālā virzienā.

Mākslīgos mitrājus ar vertikālu notekūdens plūsmu ierīko tā, lai notekūdens kustība būtu virzīta vertikāli cauri filtram no sadales caurulēm filtra augšpusē līdz drenām filtra apakšējā daļā 0.7 – 0.8 m dziļumā. Piesārņojošo vielu samazināšanai notekūdeņos, tāpat kā mitrājos ar

horizontālu filtrāciju, sākotnēji var paredzēt notekūdeņu nostādināšanu septiķī vai nostādinātājā. Tad notekūdeni padod uz mitrāja filtra daļu, kur to pa infiltrācijas cauruļvadu sistēmu vienmērīgi izkliedē pa filtra augšējo daļu (Gajewska et.al., 2020). Pie filtra pamatnes izvietotas drenāžas caurules, kas uztver izfiltrēto notekūdeni un novada to caur kontrolaku vidē. Vertikālas pazemes plūsmas mitrājos notekūdeņu izkliedi pa mitrāja augšējo daļu var organizēt ar infiltrācijas cauruļu tīklu, ar notekūdeņu pludināšanu pāri filtra virsai vai izsmidzinot virs filtra, tādējādi bagātinot ūdeni ar skābekli. Tomēr Latvijas klimatiskajos apstākļos notekūdeņu izkļiedes risinājums, kas pakļauj ūdeni tiešam sasalšanas riskam ziemas laikā, nav piemērots. Sadalošās caurules jāaizsargā, lai ziemas laikā tās neaizsaltu. Caurules apber ar grunti, veidojot līdz 20 cm augstus valiņus. Notekūdeni, izmantojot sūkņus, vēlams padot periodiski, nelielām devām. Filtru apstāda ar niedrēm, kas bagātina filtru ar skābekli, irdina grunti, nodrošina baktēriju darbību un rada estētisku vidi. Nepieciešamā mitrāja platība 1 CE ir 4 – 6 m² (Vymazal, 2008).

Filtra bērumš ir jāveido no rupjas smilts vai grants ar daļiņu izmēriem 0.5 – 5 mm. Ūdens plūsmas ātrums filtrā pieņemts 20 m·dnn⁻¹. Ūdens plūsmas filtrācijas ceļš no infiltrācijas caurulēm līdz drenāžas caurulēm ir 0.60 m, ja filtra dobes dziļums ir 0.90 m.



1.4. att. Vertikālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja shēma

1. Ieplūdes caurule, kas sadala notekūdeni uz infiltrācijas caurulēm mākslīgā mitrāja filtra augšpusē;
2. Rupjas smiltis vai grants filtrs; 3. Mitrāju mīloši augi; 4. Izplūdes caurule, kas ar drenām filtra apakšējā daļā uztverto attīrīto ūdeni novada vidē.

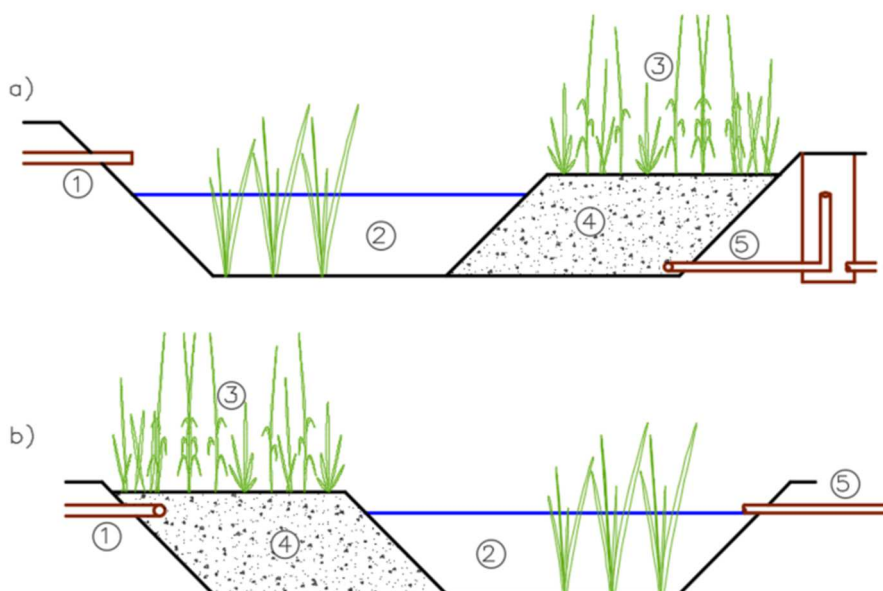
1.2.3. Kombinēti mākslīgie mitrāji

Atšķirīgi mākslīgo mitrāju veidi jeb tehnoloģiskie risinājumi var tikt projektēti kā individuālas attīrīšanas iekārtas, vai papildināt cita veida attīrīšanas metodes, arī savstarpēji kombinējot virszemes vai pazemes plūsmas mitrājus. Svarīgi ir ievērot vides aizsardzības prasības attiecībā uz gruntsūdeņu un virszemes ūdeņu iespējamo piesārņošanu. Atkarībā no tā, vai mitrājā paredzēts attīrīt sadzīves notekūdeņus, noteci no lauksaimniecības zemēm vai cita veida piesārņotus ūdeņus, jāparedz hidroizolācija vai jāsavieno mitrāja pamatne ar gruntsūdeņiem.

Mērķtiecīgi kombinējot dažādas konstrukcijas mākslīgos mitrājus, var iegūt efektīvāku notekūdeņu attīrīšanas iekārtu (AL Falahi et.al., 2021). Tas ir īpaši nozīmīgi, projektējot specifisku vai īpaši piesārņotu notekūdeņu attīrīšanu (Wojciechowska et.al., 2017). Secīgi apvienojot vienā mitrājā vairākas atšķirīgas vides zonas, kurās notiek atšķirīgi attīrīšanas procesi, tās viena otru papildina (Castellar et.al., 2022). Veicot mitrāju aprēķinus un dimensionējot šādas, kombinētas notekūdeņu attīrīšanas iekārtas ar mākslīgajiem mitrājiem,

ieteicams rēķināt katru mitrāja daļu atsevišķi, variējot ar piesārņojošo vielu koncentrācijām pie ieplūdes un izplūdes katrā atsevišķā mitrāja zonā.

1.5. attēlā a) variantā piedāvātā mākslīgo mitrāju kombinācija, kur ieplūdes daļa veidota kā vaļējas plūsmas mākslīgais mitrājs, piemērota neregulārai notekūdeņu pieplūdei, kad periodiski notiek izteiktas caurplūdumu svārstības. Rupjākās suspendētās vielas izgulsnēsies, ko ietekmēs plūsmas ātrums. Pirmā daļa kalpos notekūdeņu uzkrāšanai un nodrošinās lēnu, vienmērīgu filtrāciju otrajā, pazemes plūsmas mitrāja daļā. Tādējādi tiks samazināts mitrāja pārplūšanas risks. Jārēķinās ar ieplūdes daļas iespējamo aizsalšanu ziemas laikā. Ja izvēlas nelielu ūdens slāņa dziļumu, ap 0.35 m, tas nodrošinās kalmju, vilkvāļišu un citu ūdensaugu attīstību, kas veicinās notekūdeņu attīrīšanas procesu. Ūdenī esošās barības vielas saules gaismas ietekmē veicina ūdensaugu, mikroorganismu un aļģu attīstību, skābeklis nokļūst sekļajā ūdens slānī caur virsmu un veicina aerobo baktēriju vairošanos un tādējādi notekūdeņu bioloģisko attīrīšanu aerobos apstākļos. Papildu ūdens kvalitātes uzlabošanai, ja tas ir nepieciešams, bioloģiski attīrīto notekūdeni var iepludināt nākamā pazemes plūsmas mitrāja sekcijā, kur attīrīšanās procesi turpināsies. Pēc tam tas nonāk drenāžas caurulē un tiek ievadīts tuvējos virszemes dabas ūdeņos. Ūdens līmeņa regulēšanu mitrājā nodrošina kontrolakā aiz izplūdes caurules.



1.5. att. **Kombinētu mākslīgo mitrāju shēmas**

1. Ieplūdes caurule; 2. Sekls ūdens slānis; 3. Mitrumu mīloši augi; 4. Rupjas smiltis vai grants filtrs;
5. Izplūdes caurule.

- a) Kombinēts mākslīgais mitrājs ar vaļējas plūsmas daļu un secīgu pazemes plūsmas daļu;
- b) kombinēts mākslīgais mitrājs ar pazemes plūsmas daļu un secīgu virszemes plūsmas daļu.

1.5. attēla b) variantā notekūdeņu ieplūdei izmantota perforēta, visā mitrāja platumā horizontāli novietota caurule. Tā ievietota pazemes plūsmas filtra daļā, kas veidota no labi filtrējošas smiltis vai grants bēruma. Filtrs aiztur neizšķīdušo piesārņojumu un pēc tā piesērēšanas iespējams nomainīt filtra materiālu ar jaunu rupjas smiltis vai grants bērumu. Sākotnēji mehāniski attīrītu notekūdeni no filtra sekcijas var tālāk padot uz dabiski aerējamu virszemes plūsmas mitrāju. Vaļējā ūdens daļu pielāgo apstākļiem atkarībā no attīrāmo notekūdeņu sastāva un sezonālātes. Notekūdenī palikušās organiskās, suspendētās un izšķīdušās vielas noārda (mineralizē) notekūdenī esošās baktērijas.

Šeit parādītas tikai divas mākslīgo mitrāju kombinācijas, bet kombinācijas var būt daudzveidīgas, atkarībā no attīrāmo notekūdeņu specifikas (Guittonny-Philippe et.al., 2014; Vymazal et.al., 2021). Var secīgi izvietot pat vairāk nekā divas atšķirīgu mitrāju zonas vai apvienot divus vienādas konstrukcijas mitrājus vienotā sistēmā.

1.3. Mitrāju pielietojums atkarībā no notekūdeņu veida

Iedalot notekūdeņus atkarībā no to izcelsmes avota jeb atkarībā no ūdens patērētāja, iegūstam provizorisku priekšstatu par sagaidāmo notekūdeņu apjomu un kvalitāti. Pieņemot šo iedalījumu un, vadoties pēc tipiskiem rādītājiem, var risināt notekūdeņu apsaimniekošanas konceptuālo pieeju. Mākslīgais mitrājs konceptuāli var kalpot dažāda veida notekūdeņu attīrīšanai, pielāgojot mitrāja tehnoloģisko izpildījumu (pazemes, virszemes plūsmas vai kombinēts mākslīgais mitrājs) un dimensijas (virsmas laukums, dziļums u.c.) (Vymazal et.al., 2021). Četrus veidu notekūdeņus atkarībā no izcelsmes nosaka atšķirīgu pieeju mitrāja pielietojumā. Literatūrā plašāk pielietotie ieteikumi apkopoti turpmākajās apakšnodaļās.

1.3.1. Mākslīgie mitrāji lietus notekūdeņu uzkrāšanai un attīrīšanai

Pilsētu lietussūdeņu notece veidojas no dažādām ūdensnecaurlaidīgām vai vāji caurlaidīgām virsmām, piemēram, automašīnu stāvvietas, ēku jumti, ielas, vai ūdensnecaurlaidīgām, piemēram, apstādījumi un zālāji. Nokrišņu veidotā notece var saturēt biogēnos elementus, smagos metālus, naftas produktus, patogēnās baktērijas un vīrusus, kā arī tādus suspendētos piemaisījumus kā augsnes un augu daļiņas, ceļu segumu erozijas produktus (Wang et.al., 2021). Jo ilgāks pārtraukums starp lietussūzēm, jo lielāka var būt piesārņojošo vielu koncentrācija (Jansons & Grinberga, 2012).

Mākslīgie mitrāji, kas izveidoti kā lietuss kanalizācijas sistēmas sastāvdaļa, pilda lietussūdeņu plūsmas maksimumu izlīdzināšanas un attīrīšanas funkciju (Gimenez-Maranges et.al., 2020). Izvietojot mitrāju lietuss kanalizācijas tīkla beigu posmā, tuvu iztekai virszemes ūdeņos, mitrājs darbosies kā aizsargbarjera un pasargās dabas ūdeņus no piesārņojošo vielu noplūdes. Latvijā šādi risinājumi daudzviet jau tiek izmantoti, arī 1.6. attēlā redzamajā Ventspils pilsētas Vidumgrāvī, kas darbojas kā lietuss novadīšanas ietaise ar posmiem, kur integrēts mākslīgais mitrājs, un kā rekreācijas elements ar iebūvētām strūklakām (Jansons & Grinberga, 2012; Greenway, 2017).



1.6. att. Ventspils pilsētas Vidumgrāvis ar mākslīgā mitrāja posmiem

Mitrāji labi noder īslaicīgo maksimālo caurplūdumu uzņemšanai. Cita veida lietus notekūdeņu attīrīšanas ietaises jāprojektē ar jaudu, kas ir atbilstoša maksimālajai nokrišņu intensitātei, bet tas stipri sadārdzina ietaišu izmaksas. Turklāt sausuma periodu laikā šādas ietaises atradīsies dīkstāvē, kas var kaitēt attīrīšanas kvalitātei, atkarībā no lietotās attīrīšanas tehnoloģijas. Ja ietaisēs paredzēs ar mazāku jaudu nekā maksimālā iespējamā lietusgāze, tad plūdu laikā nāksies novadīt neattīrītus lietus notekūdeņus vidē. Mākslīgais mitrājs turpina darboties kā attīrīšanas ietaise arī pēc ilgāka sausuma perioda, kā arī spēj uzņemt īslaicīgus un paaugstinātus ūdens caurplūdumus, kuri veidojas lietusgāžu laikā (Jansons & Grinberga, 2012; Gimenez-Maranges et.al., 2020).

Piemērojot mākslīgos mitrājus Latvijas apstākļiem, jāņem vērā konkrētās vietas hidroloģiskie apstākļi, jo daudzviet gruntsūdens līmenis atrodas tuvu zemes virsmai. Mitrāja konstrukcija jāizvēlas atbilstoši teritorijas hidroģeoloģiskajiem apstākļiem, kur to paredzēts ierīkot, lai neradītu pārplūšanas risku lietusgāžu laikā. Attīrīto ūdeņu infiltrēšanu gruntī var apgrūtināt vāji caurlaidīgas gruntis – māls, smilšmāls.

Attīrīšanas procesu bioloģiskā aktivitāte mitrājā samazināsies, pazeminoties ūdens temperatūrai. Īpaši izteikti temperatūra var pazemināties ziemas periodā atkušņu laikā, kā arī pavasaros palu laikā, kad palielinās sniega kušanas ūdeņu pieplūde, kā arī, ja ir augsts gruntsūdens līmenis. Šādos gadījumos attīrāmie ūdeņi izplūdis caur mitrāju pārāk ātri, lai notiktu pietiekama organisko daļu mineralizācija vai slāpekļa un fosfora asimilācija augos (General consideration, 1995). Lai novērstu situāciju, kad palielināts nepilnīgi attīrītu lietusūdeņu daudzums ieplūst virszemes dabas ūdeņos, ieteicams variēt ar mitrāja formu vai veidot vairākas atsevišķas sekcijas. Mākslīgā mitrāja smilšu filtra daļa nodrošina suspendēto daļiņu un ar tām saistītā piesārņojuma filtrāciju, bet vaļējā ūdens daļa, ja tāda tiek veidota, nodrošina sedimentāciju caurtecī (Jansons & Grinberga, 2012). Augu sakņu daļa mākslīgajā mitrājā absorbē notekūdeņos esošās augu barības vielas un smagos metālus.

1.3.2. Mākslīgie mitrāji sadzīves notekūdeņu attīrīšanai

Latvijā visizplatītākā sadzīves notekūdeņu attīrīšanas metode ir bioloģiskās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas ar aerāciju un aktīvajām dūņām (aerotenkos), kur notekūdenī esošās organiskās vielas tiek pārstrādātas ar aktīvajām notekūdeņu dūņām skābekļa klātbūtnē. Aktīvās dūņas ir sīkas nogulu kopas, kam piesaistījušies viēnšūņi un baktērijas. Organisko vielu daudzumu notekūdenī izsaka kā bioķīmisko skābekļa patēriņu (BSP₅). BSP₅ nelielu apdzīvotu vietu sadzīves notekūdeņos ir ap 250 mg·l⁻¹ vai 65 g no viena iedzīvotāja dienā.

Nelielām apdzīvotām vietām un atsevišķām saimniecībām vispiemērotākās ir notekūdeņu attīrīšanas iekārtas, kas nepatērē vai minimāli patērē elektroenerģiju un rada pēc iespējas mazāk blakusproduktu. Mākslīgais mitrājs parasti apmierina šīs prasības (Castellar et.al., 2022), turklāt prasa vienkāršu apsaimniekošanu, ļauj īslaicīgi iepludināt notekūdeni ar augstāku piesārņojošo vielu koncentrāciju un spēj īslaicīgi uzņemt lielākus notekūdens apjomus. Arī periodisks notekūdeņu pieplūduma pārtraukums mākslīgā mitrāja darbību nepasliktina (AL Falahi et.al., 2021).

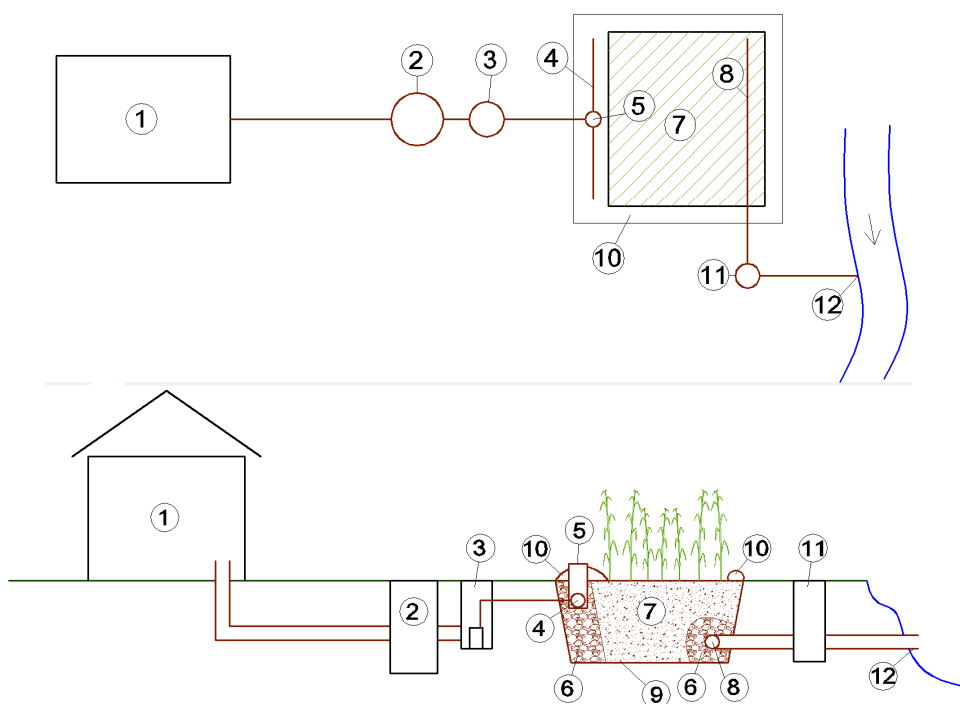
Mākslīgajā mitrājā par konstrukcijas pamatu ir ņēmti agrākos gados plaši pielietotie smilts – grants filtri, kuri papildināti ar ūdensaugu, parasti niedru (*Phragmites australis*), stādījumu un izmainīta notekūdeņu padeves un savākšanas tehnoloģija.

Mitrāju pielāgošanu sadzīves notekūdeņu attīrīšanai var īstenot, variējot ar ūdens plūsmas virzienu, gan ar mitrāja filtra daļas tilpumu un virsmas laukumu, gan pielāgojot augu sugas attīrāmo notekūdeņu īpatnībām (Kadlec, 2009). Iespējami vairāki tehnoloģiski līdzīgi varianti, jo tikai pareizi pielāgots un kopts mākslīgais mitrājs dos vēlamos rezultātus.

Ziemeļvalstīs notekūdeņu attīrīšanai lauku apvidos plaši izmanto pazemes plūsmas mākslīgos mitrājus jeb augsnes filtrus. Šādus filtrus ierīko kā infiltrācijas gultnes, kurās

attīrītais notekūdens ūdens papildina gruntsūdeņus, vai kā smilšu filtrus, kuros attīrītais ūdens tiek izvadīts virszemes ūdens avotos – grāvjos, upēs vai citos ūdensobjektos (Vymazal, 2009). Abos gadījumos sākotnēji veic notekūdeņu nostādināšanu septiķī. Notekūdeņi pēc sākotnējās nostādināšanas tiek izkliedēti pa cauruļvadiem mitrāja gultnes virspusē. Piemērota reljefa apstākļos iespējama notekūdeņu padeve ar paštecī. Mitrāja gultne tiek izbūvēta dziļāk par iespējamo augsnes sasalšanas punktu vai arī jānodrošina infiltrācijas caurules pret aizsalšanu. Lielākām sistēmām vai nelabvēlīga reljefa apstākļos, lai nodrošinātu vienmērīgu ūdens padevi pa visu mitrāja virsmu, var būt nepieciešama pārsūkņēšana. Filtra gultnē attīstās mikroorganismi, kas sadala organiskās vielas. Notekūdeņu slodze parasti ir $30 - 60 \text{ mm} \cdot \text{dnn}^{-1}$, un filtri var nodrošināt BSP_5 un suspendēto vielu samazināšanu vairāk nekā par 90%. (Scholz, 2011) Fosfora samazināšanās pakāpe ir atkarīga no augsnes vai smilts akumulēšanas spējām (Sharma et.al., 2022), bet parasti tā apmēram 20 gadu laikā pakāpeniski samazinās no 80% līdz 25%. Šajā gadījumā regulāri jānomaina smilšu filtru pildījums.

Sadzīves notekūdeņu attīrīšana mitrājā notiek līdzīgi kā bioloģiskajās attīrīšanas iekārtās ar aktīvajām dūņām, tikai ilgākā laika periodā. Organisko vielu mineralizācija mākslīgajos mitrajos balstās uz baktēriju darbību skābekļa klātbūtnē. Mitrāja filtra daļā aerobajām baktērijām nepieciešamo skābekļa daudzumu nodrošina virs filtra augošā veģetācija, tādējādi neprasot elektrības patēriņu. Lai nodrošinātu nepieciešamā notekūdens daudzuma attīrīšanu īsākā laika posmā, jāpalielina mitrāja izmērs, kas ir galvenais mitrāja kā attīrīšanas ietaises trūkums. Salīdzinot ar rūpnieciski ražotajām bioloģiskajām attīrīšanas iekārtām, mitrājs aizņem lielāku platību (sadzīves kanalizācijas attīrīšanai pazemes plūsmas mitrājā, uz vienu iedzīvotāju nepieciešams aptuveni 6 m^2 platības). Latvijā, īpaši lauku teritorijās, platība bieži nav noteicošais faktors attīrīšanas iekārtu izvēlē, turklāt mitrājam ir daudz priekšrocību.



1.7. att. Sadzīves notekūdeņu attīrīšanas shēma mākslīgajā mitrājā

1. Dzīvojamā ēka; 2. Nostādināšanas tvertne (septiķis); 3. Sūkņētava (ja nepieciešams); 4. Infiltrācijas caurule; 5. Aka ar aizbīdņiem; 6. Rupjas grants apbērums; 7. Smilts/grants filtrs ar niedru stādījumu; 8. Drenāža; 9. Hidroizolācija; 10. Grunts valniši; 11. Kontrolaka; 12. Izlaide virszemes dabas ūdeņos.

Virszemes plūsmas mitrājus jeb caurplūstošus dīķus ar veģetāciju sadzīves notekūdeņu attīrīšanai sekmīgi var pielietot nelielos objektos lauku apvidos, jo tie labi iekļaujas lauku ainavā, ir vienkārši ierīkojami un ekspluatējami. Šādi mitrāji var uzņemt pēkšņus, neparedzētus palielinātus piesārņojuma daudzumus, kas mazos objektos gadās salīdzinoši bieži. Labvēlīgos

reljefa apstākļos šādu mitrāju būvniecība ir lēta. Jāņem vērā, ka mitrājus sadzīves notekūdeņu attīrīšanai vēlams novietot vismaz 100 m attālumā no dzīvojamām ēkām un sabiedriskām vietām.

Ierasti visu piesārņojošo un barības vielu samazināšana mitrāja filtra daļā norit sekmīgi un smilšu filtrs spēj nodrošināt pat patogēno baktēriju samazināšanu (Vymazal, 2002). Iespēja, ka augu barības vielas varētu atgriezties ūdens apritē, nav liela. Pat ja visu ar fosfora savienojumiem piesātināto filtra materiālu izkļiedētu uz aramzemes, augiem tas būtu neliels daudzums, jo fosfors būs pārveidojies nešķīstošos savienojumos.

Notekūdēns rādītāji, tam izplūstot no mitrāja, neatpaliek ar klasiskām metodēm (aerotenkā) attīrīta notekūdēns. Kopēja slāpekļa un fosfora samazināšanās mitrājos ir efektīvāka nekā aerotēnos. Mikroorganismu kopums mitrājā ir vēl daudzpusīgāks, jo augsnes filtrs satur vairāk nekā 5000 dažāda veida baktērijas, salīdzinājumam cita tipa bioloģiskajās attīrīšanas iekārtās ir ap 200 – 300 baktēriju veidu (Ecotechnologies International, 2000).

1.7. attēlā parādīta sadzīves notekūdeņu attīrīšanas shēma mākslīgajā mitrājā. Notekūdeņi uz nostādināšanas tvertni padod paštecē, ja to ļauj teritorijas reljefs. Lai nodrošinātu vienmērīgu notekūdēns sadalījumu, uzlabotu un paildzinātu mākslīgā mitrāja optimālu darbību, sadzīves notekūdeņus pēc nostādināšanas vēlams padot uz mitrāju periodiski, nelielos apjomos ar sūkņa palīdzību, kas nodrošinās vienmērīgu un regulāru notekūdēns pieplūdi mitrāja infiltrācijas caurulēs. Ja notekūdeņu apjoms ir neliels un nevienmērīgs, kā, piemēram, vasarnīcās, notekūdēns padevi uz mitrāju var nodrošināt ar paštecī. Sūknētavas nepieciešamību nostādināto notekūdeņu padošanai uz mitrāju izvērtē, vadoties pēc reljefa apstākļiem objektā.

1.7. attēlā piedāvāts risinājums, ka notekūdeņi uz mitrāju tiek padoti caur aku ar aizbīdņiem, kura pie ieplūdes mitrājā sadala notekūdēns plūsmu un nodrošina iespēju pārmaiņus darbināt vienu vai otru mitrāja filtra sekcijas daļu. Periodiski notekūdeņu padeves pārtraukumi ļauj labāk mineralizēties organiskajām daļām, un šādu risinājumu var ierīkot objektos ar intensīvu un nepārtrauktu notekūdeņu pieplūdi, attiecīgi rēķinot mitrāja platībai divas reizes lielāku virsmas laukumu.

Notekūdeņu attīrīšanas iespējas mākslīgajos mitrājos Latvijā nav identiskas kā tajās valstīs, kas atrodas siltāka klimata joslā. Galvenais faktors, kas neļauj tiešā veidā pārņemt šo valstu pieredzi mitrāju pielietošanā, ir ziemas periods, kad jānodrošina sistēmas pilnvērtīga darbība arī pie gaisa temperatūras, kas ir zemāka par 0 °C. Notekūdēns padeves, pārplūdes un izlaides caurules jāparedz iebūvēt gruntī zem caursalšanas dziļuma vai jāsiltina, veidojot mākslīgus, filtra daļā izraktās grunts uzbērumus – valnīšus. Baktēriju un mikroorganismu darbība filtra daļā balstās uz aerobiem un anaerobiem procesiem, kur abos notiek organisko vielu noārdīšana un mineralizēšana. Procesu rezultātā izdalās siltuma enerģija, kas uztur filtrā temperatūru augstāku par 5 °C, kas ļauj baktērijām un mikroorganismiem turpināt darbību, un tādējādi notekūdeņu attīrīšanas process netiek pārtraukts. Turklāt sadzīves notekūdeņi neatdziest līdz sasalšanai, ja vien tiem nepievada sniega kušanas ūdeņus, kas var strauji pazemināt notekūdeņu temperatūru un tādējādi kavēt attīrīšanas procesu.

Mākslīgie mitrāji dod iespēju notekūdeņus ne tikai attīrīt, bet arī uzkrāt, akumulēt noteiktu ūdens daudzumu. Mitrāja izmēri ir atkarīgi no iedzīvotāju skaita, kas veidos notekūdeņus jeb notekūdeņu daudzuma, kura attīrīšanai tiks izmantots konkrētais mākslīgais mitrājs (Vymazal, 2009). Mitrājus lieto notekūdeņu tīrīšanai nelielos objektos (lauku sēta, apdzīvota vieta, mazpilsēta), kur iedzīvotāju skaits nepārsniedz tūkstoši.

Ja uz mitrāju padodamā notekūdēns BSP₅ pārsniedz 150 mg·l⁻¹, tad jāparedz pasākumi, kas novērsīs attīrīšanas efektivitātes samazināšanos, ko var izsaukt organisko daļiņu uzkrāšanās filtra daļā. Pirms notekūdeņu padošanas uz mitrāju tos var nostādināt septiķī vai vaļējā nosēdbaseinā. Nostādināšanas optimālais ilgums 3 diennaktis. Notekūdēns nostādināšanai izvēlas vaļējus nosēdbaseinus vai segtus rezervuārus, nepieļaujot notekūdēns izplūdi apkārtējā vidē. Izvēloties nostādināšanai vaļēju nosēdbaseinu, tas jāizvieto vismaz 100 m attālumā no apdzīvotām vietām valdošo vēju virzienā, lai izvairītos no smaku radīta diskomforta. Sadzīves notekūdeņu nostādināšanai piemērotāki ir segti rezervuāri (septiķi) ar ventilāciju, ko būvē no

dzelzsbetona grodiem, polimera materiāliem vai stiklšķiedras. Notekūdens nostādināšanas tvertni izvēlas atkarībā no nepieciešamā nostādināšanas tilpuma, t.i., notekūdens apjoma nostādināšanai 3 diennaktis.

Cilvēku ekvivalentos izteikto piesārņojuma daudzumu aprēķina, pamatojoties uz maksimālo nedēļas vidējo piesārņojuma daudzumu, kas normālos laika apstākļos komunālo notekūdeņu attīrīšanas iekārtās nonāk gada laikā. Īslaicīgu un epizodisku spēcīga lietus un citu netipisku apstākļu radīto pārslodzi šajos aprēķinos neņem vērā. Plānošanas vajadzībām cilvēku ekvivalentos izteikto piesārņojuma daudzumu var aprēķināt, pamatojoties uz iedzīvotāju un strādājošo skaitu, kam plānots pieslēgums, un atkarībā no tiem raksturīgā ūdens patēriņa un notekūdeņu bioķīmiskā skābekļa patēriņa (BSP₅) vērtībām. Cilvēku ekvivalenta viena vienība ir organisko vielu piesārņojuma daudzums, kas atbilst bioķīmiskajam skābekļa patēriņam 60 g O₂ dienā (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002). Vienam cilvēka ekvivalentam pēc notekūdeņu apjoma atkarībā no labiekārtotības pakāpes atbilst 100 – 200 l dienā. Mitrāja formu iespējams izvēlēties atkarībā no ainavas vai pasūtītāja vēlmēm un pielāgot esošajai vai plānotajai reljefa un apvidus situācijai. Pieļaujami gan regulāras formas (taisnstūrveida, kvadrātiski, aplūveida un ovāli), gan neregulāras formas mitrāji.

Filtru ierīkošanai izrakto grunti daļēji var izmantot valnīšu veidošanai, pārējo izlīdzina turpat tuvākā apkārtnē, saglabājot augsnes virskārtu, un apsēj ar zāli. Visu filtra teritoriju iežogo ar stieplu pinuma žogu, ja tā ir tuvāk apdzīvotai vietai, līdz 50 m vai 3 rindu dzelonstieplu žogu, ja tā atrodas tālāk par 50 m no apdzīvotas vietas. Mitrāju izbūvē ne tuvāk par 15 m no dzīvojamām mājām. Pie izplūdes attīrītie notekūdeņi būs attīrīti atbilstoši MK noteikumiem Nr. 235, BSP₅ līdz 25 mg·l⁻¹; suspendētās vielas (SV) līdz 35 mg·l⁻¹; ķīmiskais skābekļa patēriņš (KSP) līdz 125 mg·l⁻¹. Septiņiem regulāri, divas reizes gadā, ir jāizsūknē tur sakrājušās nogulsnes. Jāatstāj 10 – 20% veco dūņu kā ieraugu, pūšanas procesa uzturēšanai. Izsūknētās dūņas jāved utilizēšanai uz tuvējām notekūdeņu attīrīšanas ietaisēm vai jāizmanto ganību un mežu mēslošanai.

Mitrāja infiltrācijas caurules vajadzības gadījumā var izskalot ar lielu daudzumu ūdens, kuru iesūknē pa vēdināšanas cauruļu izplūdes galiem. Drenāžas sistēmas skalošanai tāpat var izmantot drenu vēdināšanas caurules galu, kurā sūknē spēcīgu ūdens strūklu.

Pirmajā ekspluatācijas gadā jāuzrauga niedru ieaugšana, vajadzības gadījumā tās jālaista. Mitrāja ekspluatācijā jāparedz nezāļu applāušānu no valnīšiem 3 reizes gadā. 1 – 2 reizes gadā (to nosaka ekspluatācijas laikā) mitrāja filtrs pa posmiem jāatslēdz no notekūdeņu padeves uz 60 – 100 diennaktīm, lai tas labāk attīrītos no organiskā piesārņojuma.

1.3.3. Mākslīgie mitrāji ražošanas notekūdeņu attīrīšanai

Latvijā spēkā esošie normatīvie akti nodala ražošanas notekūdeņus, kas radušies uzņēmējdarbības vai ražošanas vietās no sadzīves un lietus notekūdeņiem (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002). Tomēr ražošanas notekūdeņi, atkarībā no industriālās ražošanas nozares un no tehnoloģiskajām īpatnībām var saturēt ļoti plašu piesārņojošo vielu spektru, tai skaitā organiskas un neorganiskas vielas (Rahmadyanti et.al., 2020; Alayu & Seyoum, 2021). Pasaulē mākslīgos mitrājus kopš to tehnoloģiskās attīstības pēdējo desmitgažu laikā izmanto plaši ne vien ierastu sadzīves notekūdeņu, bet arī pārtikas, papīra, tekstila pārstrādes un citu ražošanas notekūdeņu attīrīšanai (Drotu et.al., 2017; Said et.al., 2021). Piesārņojošo vielu koncentrācija ražošanas notekūdeņos mēdz būt augstāka nekā sadzīves notekūdeņos (Nurmahomed et.al., 2022). Tādos gadījumos notekūdeņu priekšapstrāde ar 3 diennakšu nostādināšanu skeptiķos vai vaļējos nosēdbaseinos var būt nepietiekama, lai novērstu mitrāja piesērēšanu (Wojciechowska et.al., 2017). Atsevišķās publikācijās kā efektīva priekšapstrādes metode tiek rekomendēta anaerobā priekšattīrīšana (Kadlec & Wallace, 2009).



1.8. att. **Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Lietuvā**

Par mitrāja darbību arī ziemas laikā pārliecinājušies Lietuvas (1.8. attēls) Hidrotehniskā institūta pētnieki, veicot ūdeņu kvalitātes monitoringu. Kā liecina viņu pētījuma rezultāti, mākslīgais mitrājs turpina attīrīt notekūdeņus līdz vēlamajam līmenim arī tad, ja apkārtējās vides temperatūra ir zem 0 °C, taču attīrīšanas procesi palēninās (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012).

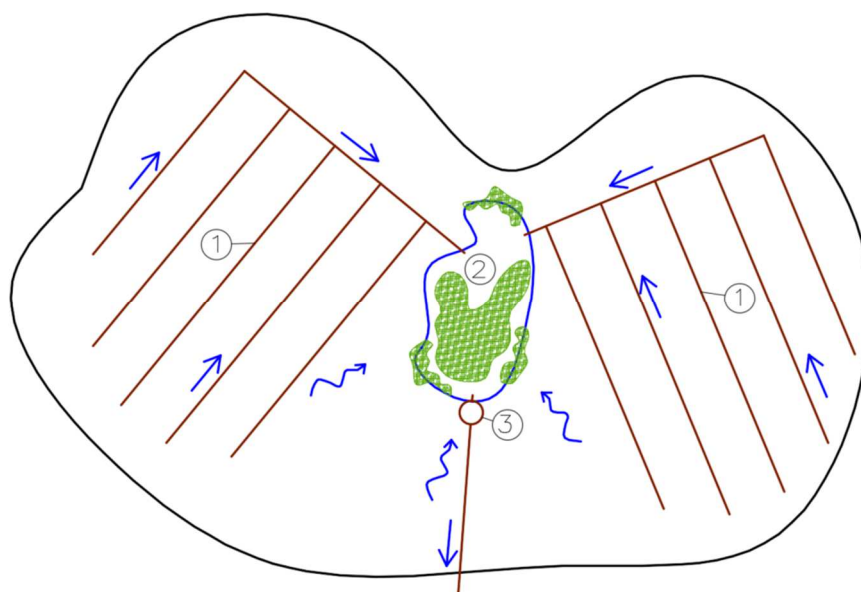
Ražošanas notekūdeņi var saturēt dažādus noturīgus piesārņotājus, piemēram, sāļus un smagos metālus, kā arī taukus, kas nelabvēlīgi ietekmē bakterioloģisko aktivitāti un var kavēt dabā balstītos attīrīšanas procesus (Mader et.al., 2022). Mākslīgos mitrājus, izvēloties piemērotus augus ar attiecīgām fitoremediācijas īpašībām, var izmantot dažādu vēsturiski piesārņotu teritoriju attīrīšanai no smagajiem metāliem un metālu savienojumiem (Guittonny-Philippe et.al., 2014). Lai mākslīgos mitrājus izmantotu tiešā veidā kā specifisku noturīga piesārņojuma saturošu ražošanas notekūdeņu attīrīšanas iekārtu, kas mērķtiecīgi samazinātu metālu, sāļu, tauku u.c. specifisko piesārņotāju koncentrācijas notekūdenī, būtu neieciešami tālāki pētījumi mērenā klimata apstākļos.

1.3.4. Mākslīgie mitrāji lauksaimniecības noteces attīrīšanai

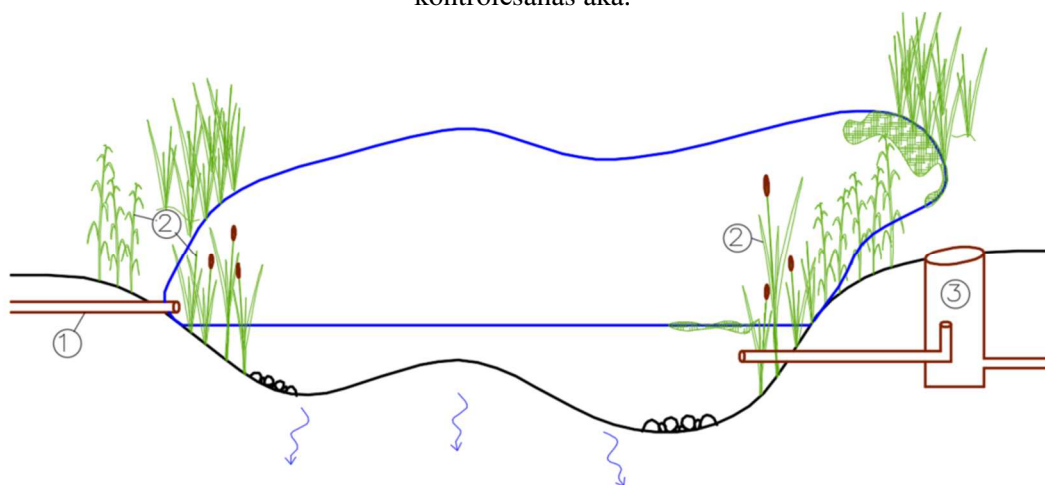
Virszemes un drenu noteces sastāvā no lauksaimniecībā izmantotajām platībām dominē suspendētās vielas, slāpekļa un fosfora savienojumi un iespējama augu aizsardzības līdzekļu (pesticīdu) klātbūtne. No piesārņojuma viedokļa virszemes un drenu notece no lauksaimniecības zemēm satur eitrofikāciju izraisošus augu barības elementus (Deelstra et.al., 2014), kā fosfora un slāpekļa savienojumus, tā arī organiskās vielas un erodētās augsnes daļiņas. Nosusināšanas sistēmas un vieglas, ūdenscaurlaidīgas augsnes pie intensīvas lauksaimnieciskās darbības veicina augu barības vielu izskalošanos (Jansons et.al., 2011; Deelstra et.al., 2014). Visbiežāk lauksaimniecības notece netiek specifiski attīrīta, bet pa drenu kolektoriem un vaļējiem grāvjiem novadīta virszemes ūdeņos.

Mākslīgais mitrājs, kas izveidots kā neliela caurplūstoša ūdenskrātuve ar ūdensaugiem, uzņem un akumulē nozīmīgu daļu no organiskajiem savienojumiem, mitrāja ūdensaugi uzņem ūdenī izšķīdušos fosfora un slāpekļa savienojumus, ko izmanto savā augšanas procesā, veidojot augu biomasu (Seres et.al., 2017). Rezultātā tiek samazināta lauksaimnieciskās darbības izraisītā augu barības vielu noplūde un ūdeņu eitrofikācija (Gordon et.al., 2021). Mākslīgie

mitrāji iekļauti atbalsta programmā kā viens no videi draudzīgas meliorācijas sistēmas elementiem (LR MK noteikumi Nr. 600, 2014).



1.9. att. **Mākslīgā mitrāja izvietojuma shēma lauksaimniecības noteces attīrīšanai**
1. Drenu vai grāvju sistēmas; 2. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs ar veģetāciju; 3. Ūdens līmeņa kontrolēšanas aka.



1.10. att. **Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja shēma lauksaimniecības noteces attīrīšanai**
1. Drenu izteka; 2. Veģetācija; 3. Ūdens līmeņa kontrolēšanas aka.

Paredzot nosusināšanas sistēmu papildināt ar mākslīgo mitrāju, rūpīgi jāapsver mitrāja novietojums attiecībā pret objekta reljefu, esošo un plānoto nosusināšanas sistēmu novietojumu un objekta novietojumu attiecībā pret dabīgām ūdenstecēm un ūdenskrātuvēm. Mitrāju izvietojot dabiski mitrās ieplakās un, padarot pārmitru ieplaku par lauksaimniecības noteces kvalitātes uzlabošanas ietaisi, ar minimālu finansiālo ieguldījumu ir iespējams panākt vides kvalitātes uzlabojumu (Vymazal & Brezinova, 2015). Turklāt lauksaimnieks zaudē vien nelielu daļu no lauksaimniecībā izmantojamās zemes, kuru parasti ir problemātiski pilnvērtīgi izmantot lauksaimnieciskās produkcijas ražošanai.

Mākslīgajā mitrājā iepludina lauksaimniecības noteci pa drenu kolektoru iztekām vai novadgrāvjiem. Vēlams mitrāju novietot tā, lai arī virszemes notece nonāktu tajā. Mitrāja izvietojuma shēma parādīta 1.9. attēlā.



1.11. att. **Hirsijarvi virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Somijā**

Attīrīto ūdeņu izplūdei no mitrāja nepieciešams paredzēt būvi ūdens līmeņa regulēšanai, piemērota reljefa apstākļos ūdens līmeņa regulēšana var nebūt nepieciešama. Attīrīto ūdeņu ievadīšanai virszemes dabas ūdeņos var izmantot vaļēju grāvju vai cauruļvadu sistēmu, atkarībā no teritorijas reljefa un mitrāja novietojuma.



1.12. att. **Enajarvi kombinēts virszemes plūsmas un pazemes pūsma mākslīgais mitrājs Somijā**

Lauksaimniecības noteces attīrīšanai no aramzemēm mākslīgā mitrāja konstrukcijai nav

nepieciešama hidroizolācija, tādējādi mitrāja ūdens plūsma nav nodalīta no gruntsūdeņiem. Parasti noteci mitrājā ievada ar paštecī, nav ūdens pārsūkņēšana un netiek patērēta elektroenerģija. Šāda mitrāja izbūve un ekspluatācija prasa nelielu finansiālu un darbaspēka ieguldījumu, jo iespējams izmantot tuvumā pieejamos materiālus un nav nepieciešams īpaši apmācīts un kvalificēts darbaspēks mitrāja būvniecībai un ekspluatācijai.

Mitrājus vēlams veidot lauka vietās, kur ir grūti nosusināmas dabīgi mitras ieplakas vai konstatēti meliorācijas sistēmu darbības defekti. Šādos mitrājos pastāvīgi būs ūdens, tajā dabiski uzkrāsies virszemes notece, un labvēlīga reljefa apstākļos samazināsies ierīkošanas būvdarbu apjoms.

Mitrāju no gruntsūdens neatdala ar hidroizolāciju, tāpēc ūdens līmenis mitrājā mazūdens periodā būs atkarīgs no gruntsūdens līmeņa un pieteces no meliorācijas sistēmām. Pirms mitrāja izveidošanas ir svarīgi platībās noskaidrot gruntsūdens līmeni un pieteci, kā arī to mainību pa sezonām, īpaši, ja plānots neliels mitrājs līdzena lauka vidū. Dažādās publikācijas ieteiktā mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas platība, lai tas funkcionētu efektīvi, ir atšķirīga no 1% līdz 10% no sateces baseina laukuma (Heistad et.al., 2006). Ja mitrāja platība būs mazāka, tas ātri piesērēs ar suspendētajām augsnes daļiņām un nespēs pietiekami efektīvi akumulēt biogēnos elementus. Ja sateces baseina laukuma platība ir lielāka par 30 ha, tad nepieciešams veikt hidroloģiskos aprēķinus ar aplēses caurplūduma pārsniegšanas varbūtību 1% un ūdeņu novadbūves dimensionēšanu.

Vairākās Eiropas Savienības valstīs mākslīgo mitrāju izmantošanu lauksaimniecības noteces attīrīšanai tiek finansiāli atbalstīta. Somijā darbojošos mitrāju piemēri redzami 1.11. un 1.12. attēlā, Norvēģijā – 1.13. un 1.14. attēlā. Lauksaimnieks Somijā savā mitrājā, kas redzams 1.11. attēlā, attīra lauksaimniecības noteci no ganībām un mitrājā audzē vēžus un zivis. Protams, lai neveidotos papildu piesārņojums, zivju piebarošana (dīķsaimniecība) nav pieļaujama.



1.13. att. Mākslīgais mitrājs pavasarī Norvēģijā

Enajarvi mākslīgais mitrājs Somijā (1.12. attēls) aizņem 0.25 ha lielu platību, kas ir 2% no sateces baseina. Tas izveidots lauksaimniecības noteces uztveršanai un attīrīšanai pirms

iepludināšanas blakus esošā ezerā. Šis ir optimāls mitrāja izvietojuma piemērs, jo vietas reljefs ļauj no apkārt esošajām lauksaimniecības zemēm mitrājā ieplūst virszemes ūdeņiem, pazemes ūdeņu laterālai plūsmai, kā arī ievadīt drenu sistēmu iztekas mitrājā, ja lauksaimniecībā izmantojamo zemi nepieciešams nosusināt. Mitrāja otrajā daļā, kas veidota kā pazemes plūsmas mitrājs, tiek attīrīti sadzīves notekūdeņi no attēlā redzamās vienas ģimenes dzīvojamās mājas.

Mākslīgie mitrāji Norvēģijā tiek izmantoti ne tikai noteces attīrīšanai no aramzemes platībām, tajos ieplūst arī virszemes notece no intensīvi izmantotām ganībām. Lai saglabātu pēc iespējas augstu attīrīšanas potenciālu mitrājā, tie tiek regulāri tīrīti, vienu reizi trīs līdz piecos gados. Mitrāja tīrīšanai var izmantot ekskavatoru nogulumu un veģetācijas izvākšanai. 1.13. attēlā redzams mākslīgais mitrājs pavasarī, kas attīra noteci no lauksaimniecībā izmantojamās zemes. 1.14. attēlā redzams tas pats mitrājs pēc kārtējās veģetācijas izvākšanas.

Norvēģijas speciālisti iesaka mitrājus sadalīt vairākās sekcijās, tās atdalot ar sliekšni, kā 1.13. attēlā jaunizbūvētā mitrājā. Izbūvējot mitrājus ar dambjiem uz ūdensbūvēm, kur iespējama vērtīgo zivju migrācija, jānodrošina zivju pārvietošanās iespējas. Sliekšnis tiek veidots no grunts bēruma, ģeotekstila un akmeņu krāvuma, un plūdu laikā ūdens brīvi plūst tam pāri. Mazūdens periodā tiek novērsta strauja ūdens caurplūde, un lielākā daļa suspendēto daļiņu nogulsnejas pirmajā sekcijā pie ieplūdes mitrājā. Tas atvieglo mitrāja tīrīšanu no piesērējuma. 1.13. un 1.14. attēlā redzamajā mitrājā veidotas trīs atsevišķas sekcijas. Ieplūdes daļa kalpo nogulšņu uzkrāšanai, vidējā seklūdens zonā ūdens kvalitāti uzlabo veģetācija, izplūdes sekcija darbojas kā dzidrīnāšanas ūdenstilpne.

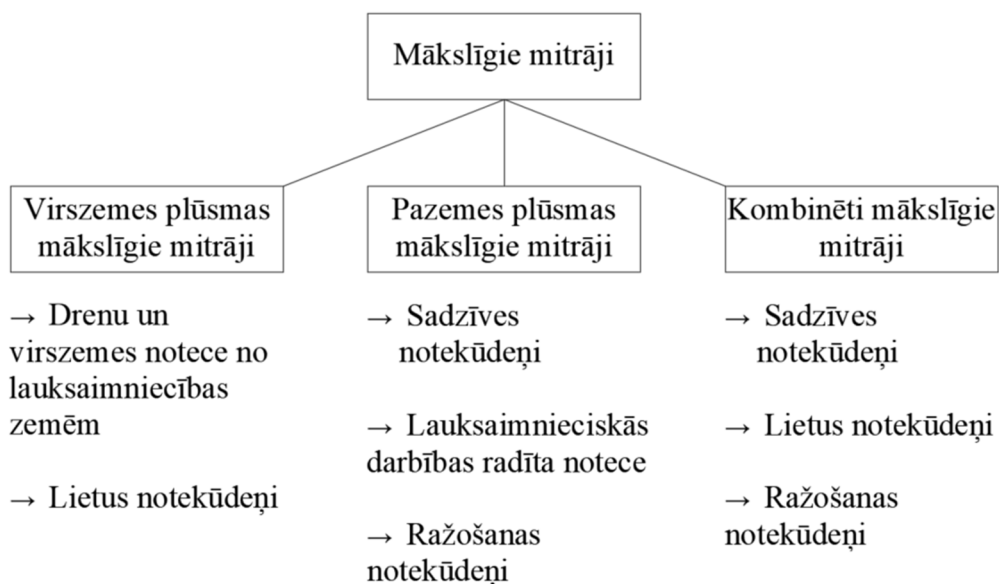


1.14. att. Mākslīgais mitrājs pēc tīrīšanas Norvēģijā

Sliekšnis līmeņa regulēšanai mitrājā var veidot ne tikai no grunts, bet arī no blīvēta māla. Tādā gadījumā ģeomembrāna nav nepieciešama, jo māla slānis kalpos kā hidroizolācija un sliekšnis netiks izskalots. Sliekšņa garumu izvēlas atkarībā no nepieciešamās ūdens līmeņu starpības, to palielinot atbilstoši augstumam.

1.3.5. Konstrukcijas izvēle

Lēmums par mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēli viena vai cita veida notekūdeņu attīrīšanai veido pamatu tālākai mākslīgā mitrāja projektēšanai. Literatūrā pieejamas citās valstīs pieņemtās vadlīnijas, rokasgrāmatas un aprēķini dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju projektēšanai un dimensionēšanai (EPA, 1982; General considerations, 1995; Galanopolos & Lyberatos, 2016). Latvijā līdz šim mākslīgie mitrāji nav bijusi viena no populārākajām bioloģiskajām notekūdeņu attīrīšanas metodēm, tāpēc līdz šim nav izstrādāti atbilstoši nosacījumi mitrāju pielietojumam un projektēšanai. Esošie mākslīgo mitrāju projekti Latvijā sagatavoti ar ārvalstu speciālistu palīdzību, vai balstoties uz citu valstu pētījumu rezultātiem. Latvijā izbūvēti un sekmīgi darbojas mākslīgie mitrāji sadzīves notekūdeņu, lauksaimniecības noteces un lietus notekūdeņu attīrīšanai, taču trūkst informācijas par regulāru ūdeņu kvalitātes un kvantitātes monitoringu šajos mitrājos. Pieejamā informācija par Latvijā ekspluatētajiem mākslīgajiem mitrājiem apkopota grāmatas nodaļā, kura izdota angļu valodā (Grinberga, 2020). Vadoties pēc šajā pētījumā iekļautajiem rezultātiem, ņemot vērā klimatiskos apstākļus, notekūdeņu apsaimniekošanas nosacījumus un spēkā esošos normatīvos aktus Latvijas teritorijā, un, ņemot vērā pēc citu valstu pieredzes notekūdeņu apsaimniekošanā, kur mākslīgie mitrāji tiek izmantoti kā galvenā attīrīšanas metode, piedāvāta vienkāršota shēma lēmumu pieņemšanai mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlē.



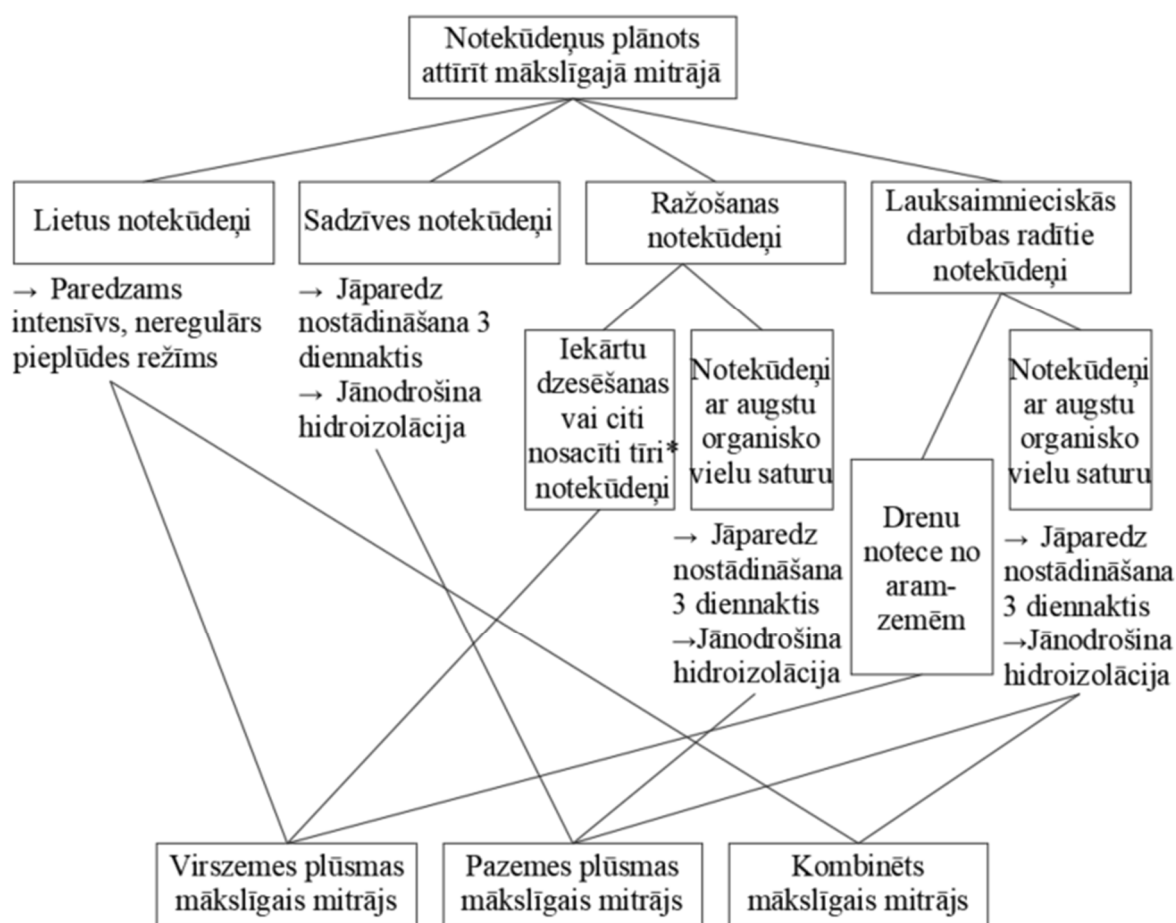
1.15. att. Mākslīgo mitrāju pielietojums dažādu notekūdeņu attīrīšanai atkarībā no notekūdeņu izcelsmes

Piedāvātā shēma palīdz orientēties izvēlē starp virszemes plūsmas un pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju. Šis lēmums pamatā balstīts uz attīrīšanas procesiem, kas norisinās seklā ūdens slānī vai rupjas smilts filtrā.

Plānojot notekūdeņu attīrīt mākslīgajā mitrāja, var vadīties vispārīgi pēc notekūdeņu veida. Pieņemot, ka lietus notekūdeņi nesatur organiskās vielas, bet galvenokārt suspendētās vielas un naftas un eļļas produktus no pilsētvides, mitrājs visbiežāk tiks plānots kā papildu elements plūsmas ceļā vispārējās ūdeņu kvalitātes uzlabošanai. Šādos gadījumos pieļaujams būvēt iekārtas bez hidroizolācijas, savienotus ar gruntsūdeņiem. Lietus notekūdeņu apjomi mēdz būt ar izteikti augstu un īslaicīgu pieplūdumu (Gimenez-Maranges et.al., 2020), kur pazemes plūsmas mitrāja limitējošais faktors konkrētajā jautājumā būtu filtrācijas spēja. Tādējādi ieteicams izvēlēties virszemes plūsmas mitrāju. Sadzīves notekūdeņi ir specifiski ar savu salīdzinoši stabilo pieplūdes režīmu, apjomu un piesārņojošo vielu daudzumu. Latvijas

likumdošana nosaka piesārņojošo vielu emisijas limitus vidē (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002), kas faktiski nozīmē attīrīt sadzīves notekūdeņus hermētiskās iekārtās, kas nav savienotas ar vidi. Turklāt organisko vielu daudzums notekūdenī un sanitārie apsvērumi par piemērotāko vedina izvēlēties pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju, kur aktīvā notekūdeņu attīrīšana norisinās filtra iekšpusē.

Līdzīgi apsvērumi jāizdara, novērtējot ražošanas notekūdeņus, kur viens no nozīmīgākajiem kritērijiem, lai izlemtu par labu virszemes vai pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja tehnoloģijai, ir piesārņojošo vielu, tai skaitā organisko vielu koncentrācijas. Notece no nosusinātām lauksaimniecības zemēm, lauksaimnieciskās darbības rezultātā radītie notekūdeņi, līdzīgi kā rūpnieciskās darbības radītie notekūdeņi, var krasi atšķirties apjoma, pieplūdes režīma un piesārņojošo vielu koncentrācijas ziņā. Tomēr, provizoriski novērtējot iespējamus tipiskākos lauksaimnieciskās darbības virzienus, blokshēmā iekļauts vienkāršots dalījums, kas vispārīgi noved pie pazemes vai virszemes plūsmas mākslīgā mitrāji konstrukcijas.



1.16. att. Shēma lēmumu pieņemšanai mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlē

*Nosacīti tīri notekūdeņi, kur piesārņojošo vielu koncentrācijas nepārsniedz spēkā esošajos LR MK noteikumos (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002) minētās robežvērtības.

Katrs konkrētais gadījums tomēr apsverams individuāli un piedāvātā blokshēma ietver kombinētas konstrukcijas mākslīgos mitrājus. Bioloģiskie procesi un fizikālie mehānismi, kas nodrošina notekūdeņu attīrīšanu pazemes un virszemes plūsmas mitrāju gadījumos, apskatīti nākamajā apakšnodaļā.

1.4. Bioķīmiskie un fizikālie procesi, kas nodrošina attīrīšanas procesus mākslīgajā mitrājā

Mākslīgo mitrāju projektē tā, lai notekūdeņu plūsma lēni virzītos cauri filtra vai seklam ūdens slānim ar ūdensaugiem no ieplūdes līdz izplūdei. Lēna ūdens pārvietošanās pa garāko ceļu ir būtiska, lai attīrīšanas procesi tiktu īstenoti maksimāli pilnvērtīgi (Biebighauser, 2009). Ūdens meklēs vieglāko ceļu līdz izplūdei un tieksies veidot plūsmas trajektorijas, tādējādi neizmantojot visu mitrāja attīrīšanas potenciālu. Lai to nepieļautu, izplūdi novieto pēc iespējas tālāk attiecībā pret ieplūdi, pēc iespējam papildinot mitrāju ar garāku plūsmas trajektoriju. Ūdens līmeni mitrājā var kontrolēt, izplūdes daļā paredzot līmeņa kontrolēšanas struktūru (Gajewska et.al., 2020). Latvijas apstākļos, kur mitrāju paredzēts izmantot arī ziemā, nav ieteicams ūdens līmeni mitrājā turēt tuvu virsmai, lai izvairītos no mitrāja caursalšanas.

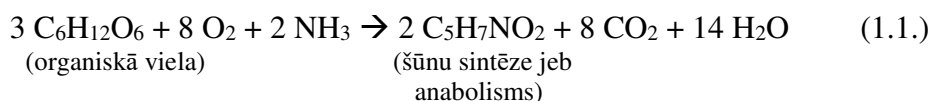
Mitrājā norisinās kompleksi procesi, kas ietver ūdeni, filtra materiālu jeb substrātu, veģetāciju (dzīvās un atmirušās augu daļas), bezmugurkaulniekus un plašu mikroorganismu spektru (General considerations, 1995; Castellar et.al., 2022). Šie fizikālie, ķīmiskie un mikrobioloģiskie procesi, kas nodrošina ūdens attīrīšanu, norit paralēli un ir savstarpēji saistīti (Crites et.al., 2014). Procesu jeb mehānismu, kas norisinās mitrājā un var sekmēt notekūdeņu attīrīšanu (Reddy & DeLaune, 2008; General considerations, 1995; Brown et al., 2000), ir:

- fizikālie procesi kā suspendēto vielu izgulsnēšana jeb sedimentācija virszemes plūsmas mitrājos vai suspendēto vielu filtrēšana pazemes plūsmas mitrājos;
- ķīmiskā transformācija un ķīmiskā izgulsnēšanās;
- adsorbcija un jonu apmaiņa uz augu sakņu un substrāta virsmām;
- piesārņojošo vielu sadalīšanās un pārveidošanās mikroorganismu un augu darbības rezultātā, tai skaitā, nitrifikācija, denitrifikācija, sulfītu redukcija, oglekļa metabolizācija;
- barības vielu jeb biogēno elementu uzņemšana un transformācija mikroorganismu un augu dzīvības nodrošināšanai;
- patogēno baktēriju un vīrusu dabiskā atmiršana.

Projektējot mākslīgo mitrāju notekūdeņu attīrīšanai, galvenais uzdevums ir veicināt šo daudzveidīgo procesu norisi, tai skaitā, nodrošināt labvēlīgu vidi baktēriju darbībai.

Organiskās vielas un suspendētās vielas

Neizšķīdušās organiskās vielas mitrājā tiek aizturētas mehāniski, līdzīgi kā suspendētās vielas, filtrācijas vai sedimentācijas ceļā, pateicoties nelielam plūsmas ātrumam. Aerobā organisko vielu attīrīšana notiek, pateicoties vienkāršiem heterotrofiem organismiem. Tie uzņem organisko vielu un izmanto kā elektronu donoru un oglekļa avotu jaunu šūnu radīšanai (van Lossdrecht et.al., 2016):



Organiskās daļas tiek hidrolizētas vienkāršākos substrātos, kuras iespējams asimilēt ar heterotrofu, anaerobu un fakultatīvu baktēriju palīdzību. Tajās mitrāja zonās, kur piekļūst skābeklis, norisinās organisko vielu aerobā noārdīšanās, kas galvenokārt ir tuvu ūdens vai filtra virsmai. Mitrāju dziļākajās zonās dominē anaerobie organismi, kas turpina organisko vielu transformāciju bezskābekļa apstākļos.

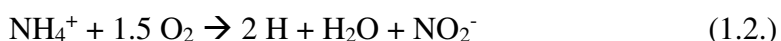
Suspendētās vielas, tai skaitā smilts, māla, putekļu daļiņas, uzkrājas galvenokārt mitrāja ieplūdes daļā (Abed et.al., 2019) un veido nogulumu slāni.

Slāpekļa savienojumi

Slāpeklis ir ceturtais visbiežāk sastopamais elements dzīvajās būtnēs, kas ir galvenā olbaltumvielu un nukleīnskābju sastāvdaļa. Virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos ar seklu

ūdens slāni, arī vertikālas pazemes plūsmas mitrājos skābeklis no gaisa vieglāk nokļūst mitrājā un iesaistās attīrīšanas procesos, nodrošinot aerobo baktēriju darbību.

Nitrifikācija ir amonija jonu (NH_4^+) bioloģiska pārveidošana nitrātajos (NO_3^-) ar oksidācijas palīdzību. Nitrifikācijas procesam ir nepieciešama skābekļa klātbūtne. Amonija jonu biotransformāciju uz nitrātiem veic slāpekļa oksidētājas baktērijas *Nitrosomonas europaea*, kuras pieder amoniju oksidējošo baktēriju (AOB) grupai un amoniju oksidējošie arheji (AOA). Arheji ir vienkāršu prokarioti, kuri molekulārā līmenī atšķiras no baktērijām un eikariotiem. Otrajā solī nitrātu oksidējošās baktērijas *Nitrobacter winogradskyi* oksidē nitrātus par nitrātiem. Nitrificētāji ir obligātie hemolitoautotrofi, kas par elektronu donoru izmanto ūdeņradi. Amoniju oksidējošie organismi ir bioloģisks process, kas var kļūt par limitējošu nitrifikācijai, jo tas ir jutīgs pret vides apstākļiem un dažādiem savienojumiem. Amoniju oksidējošie organismi rada nitrātjonus. FAO (2021) publicētā klasiskā nitrifikācijas ķīmiskā reakcija:



Nitrātjonus oksidējošie organismi ir noturīgāki, tāpēc nitrātu pārveidošana nitrātos ir stabilāka. Nitrātjonus oksidējošie organismi rada nitrātjonus (van Lossdrecht et.al., 2016):



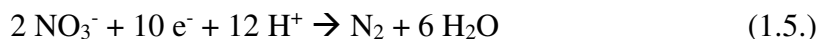
Mākslīgo mitrāju bezskābekļa zonās un tajās filtra vai ūdens slāņa daļās, kur skābekļa piekļuve ir ierobežota, darbojas anaerobās baktērijas (Reddy & DeLaune, 2008). Anaerobos apstākļos hemolitotrofiem terminālie elektronakceptori ir nitrāti vai nitrīti. “*Annamox*” process ir bioloģiska amonija oksidācija anoksos apstākļos, kas savienota ar nitrātu samazināšanu (Ni et.al., 2020).



Amonijs darbojas kā elektronu donors jeb slāpekļa avots, nitrīts - kā akceptors. Veidojas brīvs skābeklis un ūdens. Process atklāts lēni augošās baktērijās *Brocardia annamoxidans*. Pēc šīs kataboliskās reakcijas jeb enerģētiskā metabolisma seko anaboliskā ķīmiskā reakcija (van Lossdrecht et.al., 2016).

Anammox baktērija ir lēni augoša un ļoti jutīga pret vairākiem vides apstākļiem un savienojumiem, kas var kavēt metabolismu. Vispārējā Anammox metabolisma reakcija, ko plaši izmanto bioreaktoru projektēšanai un darbības regulēšanai, noved pie N_2 (dislāpekļa) radīšanas (van Lossdrecht et.al., 2016).

Denitrifikācija ir process ierobežota skābekļa apstākļos, kas soli pa solim nitrātus pārveido par nitrātiem, tad par slāpekļa oksīdu, tad slāpekļa dioksīdu un beigu beigās par gāzveida slāpekli N_2 . Pilnīgs denitrifikācijas process var tikt izteikts kā oksidēšanās un reducēšanās vienādojums (Hoseinzadeh, 2019).



Ja skābeklis vidē ir izsmelts, tad heterotrofās baktērijas ieelpo nitrātus kā termināla elektronu akceptora aizstājēju. Šīm baktērijām jeb denitrifikatoriem ir jābūt pieejamam viegli bioloģiski degradējamai organiskajai vielai kā oglekļa avotam (Reddy & DeLaune, 2008).

Fosfora savienojumi

Fosfors ir viens no biogēnajiem elementiem, kuram ir nozīmīga loma dažādu bioloģisko organismu attīstībā. Fosfora savienojumi dabā nonāk arī cilvēka darbības rezultātā. Tie tiek galvenokārt ienesti ar pārtikas atlikumiem, kā arī dažādiem mazgāšanas līdzekļiem. Fosfora avoti ir neapstrādāti vai neattīrīti notekūdeņi, lopkopība, pārtikas pārstrāde, lauksaimniecība un dažādas citas nozares. Fosfors no lopkopības nozares aktivitātēm var nonākt ūdeņos kūstmēslu

krātuvju neesamības gadījumos, kā arī neatbilstošu kūtsmēsļu krātuvju izveides vai apsaimniekošanas rezultātā (Sharma et al., 2022). Liela nozīme paaugstinātas fosfora koncentrācijas esamībai ūdenī ir arī dažādu fosforu saturoša minerālā mēslojuma lietošanai.

Notekūdeņos galvenokārt sastopamās fosfora formas ir organiskais fosfors, ortofosfāti un polifosfāti. Augi uzņem un izmanto zaļās masas pieaugumam ūdenī šķīstošo reaktīvo fosfora formu. Nozīmīgākie fosfora atdalīšanas procesi mitrājā ir sorbcija, kur atkarībā no sorbenta īpatnējās virsmas laukuma, ūdens plūsmas ātruma, kā arī no kopējās fosfora koncentrācijas ūdenī, smilts, grants un nogulumu daļiņas piesaista ortofosfātjonus uz savas virsmas (Abed et.al., 2019). Ievērojama nozīme fosfora savienojumu aizturēšanā ir filtra materiāla sastāvam. Filtra materiālu var mērķtiecīgi izvēlēties ar Ca, Fe un Al saturu, kas labvēlīgi ietekmēs fosfora sorbciju. Sorbcijas efektivitāti ietekmē arī temperatūra. Vēlams, lai sorbcija tiktu veikta zemākās temperatūrās. Pārāk augsta temperatūra var veicināt desorbciju un tādejādi samazināt sorbcijas efektivitāti. Tāpat sorbcijas procesu ietekmē arī tāds faktors kā vides rekcijs pH ūdenī. Tādejādi mākslīgajos mitrājos notiek fosfora savienojumu sorbcija, izgulsnēšanās un uzkrāšanās nogulumos, kā arī uzņemšana ar augiem.

Mitrājā var mērķtiecīgi nodrošināt atbilstošus vides apstākļus, lai sekmētu uzlaboto bioloģisko fosfora attīrīšanas procesu. Vadot noteikūdeņus caur pārmaiņus anaerobiem, tad aerobiem (un/vai anoksiem) apstākļiem, sistēma bagātinās ar polifosfātus akumulējošiem organismiem. Tie var uzkrāt 10 reizes vairāk fosfora nekā parastās sistēmās esošie heterotrofie organismi.

1.5. Mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti noteicošie nozīmīgākie faktori

Fosfora, slāpekļa savienojumu un suspendēto vielu aizturi var izmantot, lai raksturotu mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti. Lai novērtētu, cik efektīvi darbojas konkrētais mākslīgais mitrājs pētījumu objektā, šajā pētījumā tiek izmantoti ūdeņu kvalitātes un kvantitātes mērījumi, un salīdzinātas noteikūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas izmaiņas pēc attīrīšanas mitrājā un aizturētais piesārņojošo vielu apjoms cauri plūstošajā noteikūdenī. Ja novēroto parametru absolūtās vērtības pie izplūdes, salīdzinot ar ieplūdi, ir samazinājušās, tad mitrāja darbība uzskatāma par efektīvu.

Ūdeņu attīrīšanas metode mākslīgajos mitrājos balstīta uz dabīgiem procesiem, un tās darbības efektivitāti ietekmē dažādi klimata un ekspluatācijas izraisīti faktori un nereti dažādu faktoru kombinācijas (Gajewska et.al., 2020; Castellar et.al., 2022). Šajā pētījumā iekļauti 3 pētījumu objekti, kuri izvietoti reālās zemnieku saimniecībās, kas pietuvina pētījuma rezultātus realitātei un iznes pētījumu ārpus laboratorijas robežām. Tādejādi iegūtie pētījuma rezultāti var tikt uzskatīti par pamatu turpmākai atzītai šīs metodes pielietošanai, lai uzlabotu ūdeņu kvalitāti Latvijā.

Šajā nodaļā aprakstīti galvenie literatūrā minētie mitrāju darbības efektivitāti ietekmējošie faktori. Šī pētījuma rezultāti izmantoti, lai izvērtētu ietekmējošo faktoru iespējamo ietekmi pētījumu objektos un atspoguļoti 3. nodaļā.

1.5.1. Temperatūra

Ūdens temperatūra mākslīgajā mitrājā ietekmē mikrobioloģisko aktivitāti un saistītos attīrīšanas procesus (Guittonny-Philippe et.al., 2014).

Gaisa temperatūra Latvijas klimatiskajos apstākļos var ietekmēt ne vien baktēriju aktivitāti, bet arī kavēt noteikūdeņu mehānisku pārvietošanos, to sasaldējot. Tomēr ilggadīgi pētījumi rāda, ka mākslīgie mitrāji efektīvi kalpo noteikūdeņu attīrīšanai arī ziemas apstākļos un zem sniega segas ASV, Skandināvijā, Anglijā, Baltijas valstīs u.c. Mākslīgais mitrājs tiek projektēts tā, lai notiktu lēna, bet nepārtraukta noteikūdeņu kustība izplūdes virzienā, kas ziemas

laikā kavē ledus veidošanos. Bakterioloģiskā aktivitāte rada siltumu, kas kavē ūdens temperatūras pazemināšanos mitrāja iekšienē zem 4 °C. Tomēr konstrukcijas izvēle jāizdara atbilstoši notekūdeņu sastāvam un objekta ģeogrāfiskajam novietojumam, lai pasargātu mākslīgo mitrāju no kritiskas attīrīšanas procesu palēnināšanās temperatūras ietekmē.

Klimatiskajos apstākļos, kad gaisa temperatūra ziemas periodā pazeminās zem 0 °C, projektēšanas stadijā mākslīgo mitrāju konstrukcijas atbilstoši pielāgo, lai nodrošinātu attīrīšanas procesu nepārtrauktu tupināšanos arī ziemā. Literatūrā pievērsta uzmanība sekojošiem paņēmieniem (Kadlec & Wallace, 2009):

- ieplūdes daļas siltināšana vai pasargāšana no sasalšanas. Ja paredzēts attīrīt nosacīti siltus sadzīves vai ražošanas notekūdeņus, tad ieplūdes daļas sasalšanas riski ievērojami samazinās;
- mākslīgā mitrāja platības un/vai tilpuma palielināšana, pieļaujot notekūdeņu sasalšanu mitrāja virspusē. Rezerves tilpums ļauj izvairīties no nevēlama ūdens uzturēšanās laika samazinājuma ziemas laikā;
- notekūdeņu periodiska uzkrāšana priekšattīrīšanas baseinos, lai mākslīgo mitrāju notekūdeņu attīrīšanai izmantotu tikai ar gaisa temperatūru virs 0 °C;
- veģetāciju ziemas periodā nenovāc, bet atstāj uz mākslīgā mitrāja virsmas. Tā kalpo kā siltumizolācija no mitrāja virspuses. Sniega sega šo siltumizolāciju papildina;
- mitrāja virsmu ziemas laikā var apklāt ar papildu salmiem vai mulču, tādā veidā nodrošinot siltumizolējošu slāni no virspuses;
- veģetācija, kas virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā iestādīta gruntī un aug garumā virs ūdens līmeņa, veido porainu ledus struktūru arī virskārtas sasalšanas gadījumā un nodrošina notekūdeņu iekļūšanu mitrāja apakšējos slāņos. Zem ledus notiek ūdens kustība un turpinās attīrīšanas procesi;
- pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja plūsmu organizē tā, lai flirta daļas augšpusē veidotos ar ūdeni nepiesātināta, sausa filtra slānis. Tas neļaus veidoties blīva sasaluša ūdens slānim, kas varētu kavēt ūdens pārvietošanos pa mitrāja filtru.

1.5.2. Ūdens uzturēšanās laiks

Notekūdens uzturēšanās laiks (*retention time*) mākslīgajā mitrājā ir izteikti atkarīgs no konkrētā mitrāja hidroloģiskajiem faktoriem. Hidraulisko slodzi uz mitrāju nosaka objektam raksturīgie klimata un augsnes apstākļi, notekūdeņu pieplūduma apjoms un režīms. Izvēlētais veģetācijas veids un filtrējošā slāņa filtrācijas spēja ietekmē notekūdeņu kustības ātrumu cauri mitrājam. Notekūdeņu uzturēšanās laiks mitrājā ir cieši saistīts ar piesārņojošo vielu attīrīšanas efektivitāti, jo vairākiem no attīrīšanas mehānismiem mitrājā ir nepieciešams noteikts laika posms līdz vēlamā rezultāta sasniegšanai (suspendēto vielu izgulsnēšanās, nitrifikācija, denitrifikācija u.c.).

Hidrauliskās slodzes ātrums (*Hydraulic Loading Rate, HLR*) ir izsakāms kā notekūdeņu apjoms laika vienībā uz mitrāja virsmas platību laika vienībā (Varga et.al., 2017; Crumpton & Stenback, 2020). Lai gan pētījumos norādīts, ka mitrāji var turpināt efektīvu darbību pie mainīga hidrauliskās slodzes ātruma, šis rādītājs ilgtermiņā ietekmē piesārņojuma aizturēšanas efektivitāti (Crumpton & Stenback, 2020; Nurmahomed et.al., 2022). Hidrauliskās slodzes normu nosaka atšķirīgas konstrukcijas mākslīgajiem mitrājiem atbilstoši notekūdeņu parametriem (Kadlec & Wallace, 2009) un to var aprēķināt sekojoši:

$$q = \frac{Q}{A}, \quad (1.6.)$$

kur

q – hidrauliskās slodzes ātrums, m·dnn⁻¹;

Q – notekūdeņu caurplūdums, m³·dnn⁻¹;

A – mākslīgā mitrāja virsmas laukums, m².

Literatūrā secināts, ka ilgāks notekūdens uzturēšanās laiks mitrājā un mazāks hidrauliskās slodzes ātrums sekmē piesārņojuma aizturi un garantē zemāku piesārņojošo vielu koncentrāciju pie izplūdes (Weerakoon et al., 2013). Tas nozīmētu arī lielāku mitrāja virsmas laukumu, kas mākslīgajiem mitrājiem jau ir kā negatīvais aspekts, salīdzinot ar intensīvas darbības bioloģiskajām notekūdeņu attīrīšanas iekārtām. Uzturēšanās laiku atšķirīgos pētījumos iesaka pielāgot no 4 – 15 dienām (Weerakoon et al., 2013). Nepamatoti palielinot mitrāja dimensijas, palielinās ūdens iztvaikošanas iespēja, kas var kavēt mikrobioloģisko aktivitāti un novest pie attīrīšanas efektivitātes samazināšanās.

1.5.3. Veģetācija

Augi ir neatņemama mākslīgo mitrāju sastāvdaļa, un tie pilda vairākas funkcijas (Wang et.al., 2021), kas veicina notekūdeņu attīrīšanu. Augu saknes un zaļā masa nodrošina virsmas laukumu baktēriju piesaistei. Vairākām mitrumu mīlošām augu sugām augšanas procesā veidojās palielināts biomasas apjoms, tādējādi augi kalpo kā fiziskais atbalsts baktērijām, turklāt tie ir oglekļa avots denitrificējošo baktēriju darbības nodrošināšanai (Kadlec, 2008). Augi pievada skābekli caur lapām un kātiem uz saknēm, bagātinot mitrāja ūdens vai filtra slāni ar aerobajām baktērijām nepieciešamo skābekli.

Mitrājā atkarībā no veida, ūdens dziļuma un tehnoloģiskajām iespējām izvēlas augu sugas, kuras ir piemērotas projektētajiem augšanas apstākļiem. Latvijas klimatiskajos apstākļos tās ir parastās niedres (*Phragmites Australis*), jo tās pilnvērtīgi aug, vairojas un izspiež citas augu sugas. Tādējādi nav nepieciešama speciāla apsaimniekošana. Virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos var izmantot vilkuvāles (*Typha Species*), kalmes (*Acorus calamus*) un citus mitrumu mīlošus augus. Atkarībā no augu sugas veģetācijai ir atšķirīga dažādu piesārņojošo elementu uzņemšanas spēja, ko augi izmanto augšanai. Specifiska notekūdeņu satura gadījumā var pielāgot augu sugu, kas fitoremediācijas ceļā veicinās nevēlamā elementa papildu attīrīšanu (AL Falahi et.al., 2021). Veģetāciju mitrājā var pielāgot arī ainaviskajām prasībām un izvēlēties ziedošus, krāsainus, daudzveidīgus vai pat eksotiskus augus, taču tādā gadījumā jāreķinās ar kopšanas nosacījumiem ekspluatācijas laikā.

Literatūrā uzsvērtā veģetācijas nozīme mitrāja efektivitātes paaugstināšanā, un kā viens no kritērijiem pieminēts augu procentuālais sadalījums pa mitrāja virsmu. Augus būvniecības laikā var mērķtiecīgi stādīt, tādējādi iegūstot optimālo noklājumu un izvēlēto augu sugu. Atsevišķa pieeja ir ļaut veģetācijai patstāvīgi attīstīties mitrāja ekspluatācijas laikā, tādējādi augi paši iesaistīsies un izaugs. Bet šajā gadījumā jāreķinās ar risku, ka apaugums veidosies tikai atsevišķās mitrāja zonās (pie krastiem) un ilgākā laika periodā, un to veidos tuvumā dabā sastopamās augu sugas.

1.5.4. Apsaimniekošana

Mākslīgais mitrājs, analogi kā jebkura notekūdeņu attīrīšanas iekārta, ir atbilstoši jāapsaimnieko, lai nodrošinātu paredzēto attīrīšanas procesu efektīvu darbību visā ekspluatācijas laikā. Tomēr, izvēloties mākslīgo mitrāju kā notekūdeņu attīrīšanas iekārtu vai iekārtas daļu, iespējami sekojoši ekspluatācijas ieguvumi:

- nelielas būvniecības izmaksas, ja tiek izmantoti vietējie materiāli, piemēram, ūdensaugi no dabīgajām ūdenskrātuvēm vai pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam nepieciešamais filtra materiāls var tikt piegādāts no netālas apkārtnes;
- mitrājs ir uz dabiskiem procesiem balstīta iekārta, un apsaimniekošana ir salīdzinoši vienkārša, kas neprasa īpaši kvalificētu darbaspēku;

- mākslīgie mitrāji var tikt projektēti bez nepieciešamības izmantot elektroenerģiju, jo notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģiskie risinājumi var tikt balstīti uz ūdens paštecī;
- nav nepieciešamas rūpnieciski izgatavotas iekārtas, kuru apkope, remonts vai nomaiņa prasītu finansiālus ieguldījumus;
- mitrāju iespējams projektēt un ekspluatēt vienlaikus ar vairākām funkcijām kā ūdens kvalitātes uzlabošana, plūdu risku mazināšana, ainavas elements, bioloģiskās daudzveidības nodrošināšana, rekreācijas un ūdens resursa vajadzības nodrošināšana.

Lai mākslīgais mitrājs kalpotu ilgstoši un tā darbības efektivitāte laika gaitā nepasliktinātos, no ekspluatācijas viedokļa regulāri veicamās darbības ir sekojošas:

- regulāri, reizi mēnesī vai atkarībā no izmantošanas intensitātes, vērot vizuāli mākslīgo mitrāju. Mitrājam visā ekspluatācijas laikā jāatbilst sākotnēji projektētajai konstrukcijai, piemēram, ja projektēts pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs, tad ekspluatācijas laikā nav pieļaujams tam pakāpeniski pārveidoties par seklu virszemes plūsmas mitrāju;
- ja pirms mākslīgā mitrāja paredzēta nostādīšanas priekšattīrīšanas baseinā vai septiķī, tad septiķim regulāri, ne retāk kā reizi gadā, ir jāizvāc tur sakrājušās nogulsnes un peldošie tauki, kas sakrājas septiķa virsējā kārtā. Septiķī jāatstāj 10 – 20% veco dūņu kā ieraugu pūšanas procesa uzturēšanai. Izvāktās nogulsnes jānodod utilizēšanai uz tuvējām notekūdeņu attīrīšanas ietaisēm vai jāizmanto lauksaimniecībā izmantojamu un mežu platību mēslošanai. Ministru kabineta noteikumi Nr. 362 Rīgā 2006. gada 2. maijā “Noteikumi par notekūdeņu dūņu un to komposta izmantošanu, monitoringu un kontroli” 29. punktā nosaka: “Lauksaimniecībā izmantojamās zemēs augšņu mēslošanai drīkst izmantot apstrādātas notekūdeņu dūņas, kā arī kompostu, kas gatavots no apstrādātām vai neapstrādātām notekūdeņu dūņām un kam sausnā smago metālu masas koncentrācija nepārsniedz minēto noteikumu 9. pielikumā norādītās limitējošās koncentrācijas. Augšņu mēslošanai drīkst izmantot notekūdeņu dūņas un kompostu arī tad, ja ne vairāk kā triju smago metālu masas koncentrācija pārsniedz limitējošās koncentrācijas ne vairāk kā par 10%”;
- nav pieļaujama tieša suspendēto vielu nokļūšana pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā, jo tas izraisīs strauju infiltrācijas cauruļu piesērēšanu un filtra kolmatāciju, kas savukārt kavēs un galējā situācijā apturēs mitrāja attīrīšanas procesus. Pazīmes, kas liecina par pazemes plūsmas mitrāja darbības pasliktināšanos, ir vizuāli novērojams vaļējs ūdens vai regulāras pelķes filtra virspusē, jūtamu smaku parādīšanās no mitrāja filtra daļas vai pie izplūdes, izplūdes vietā attīrītā notekūdens krāsa kļūst pelēcīga;
- novērojot vienu vai vairākas no minētajām pazīmēm, mitrāja infiltrācijas cauruli var izskalot ar spēcīgu ūdens strūklu, kuru lej pa vēdināšanas caurules galu. Drenāžas sistēmas skalošanai var izmantot drenu caurules vēdināšanas caurules galu, kurā lej spēcīgu ūdens strūklu. Sadalošo infiltrācijas cauruļu pilnīgas vai daļējas piesērēšanas gadījumā pēc 10 – 20 gadiem grants bērumu var izrakt un nomainīt ar jaunu granti un veikt infiltrācijas cauruļu nomaiņu;
- pirmajā gadā jāuzrauga niedru vai citu izvēlēto augu izaugsme, vajadzības gadījumā tās jālaista;
- pazemes plūsmas mitrāja ekspluatācijā jāparedz teritorijas nezāļu applaušanu no valnīšiem 3 reizes gadā. Rudeņos ieteicams niedres nopļaut un atstāt turpat uz mitrāja virsmas, tās nodrošinās cauruļvadiem un filtra daļai nepieciešamo siltumizolāciju. Pavasaros iepriekš nopļautās niedres novāc no mitrāja virsmas;
- no virszemes plūsmas mākslīgajiem mitrājiem regulāri, atkarībā no suspendēto vielu koncentrācijas un veida ieplūstošā ūdenī, jāizvāc sedimentu slānis no pamatnes.

Kopējais ekspluatācijas ilgums atkarīgs no ieplūstošo notekūdeņu kvalitātes un ieplūdes režīma un tā atbilstības sākotnēji paredzētajiem parametriem.

Literatūrā pieejami pētījumi par iespējamu kopējā ekspluatācijas laika paildzināšanu, paredzot mākslīgā mitrāja darbināšanas ciklus. Pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju projektē no divām vai vairākām paralēlas darbības filtra daļām, kuras izmanto, periodiski plūsmu vadot pa vienu vai vairākām daļām, bet vienai vai vairākām daļām notekūdeņu padeve tiek pārtraukta. Šādi cikliski pievadot un pārtraucot notekūdeņu pieplūdi, tiek iegūts laiks baktēriju darbībai, kas var paildzināt kopējo mitrāja ekspluatācijas laiku un samazina piesērēšanas un filtra pārslodzes risku (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012). Mākslīgo mitrāju var izmantot arī kā rekreācijas elementu, izvēloties veģetāciju, balstoties uz vizuālajiem kritērijiem – ziedoši augi, košumaugi u.c., taču tie prasa atbilstošu kopšanu ekspluatācijas laikā. Specifisku piesārņojošo vielu attīrīšanu mitrājā var paaugstināt, izvēloties augu sugas, kas spēj uzņemt piesārņojošās vielas fitoremediācijas ceļā. Virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju ūdens krājumus var izmantot peldēšanai, makšķerēšanai vai apūdeņošanas vajadzībām.

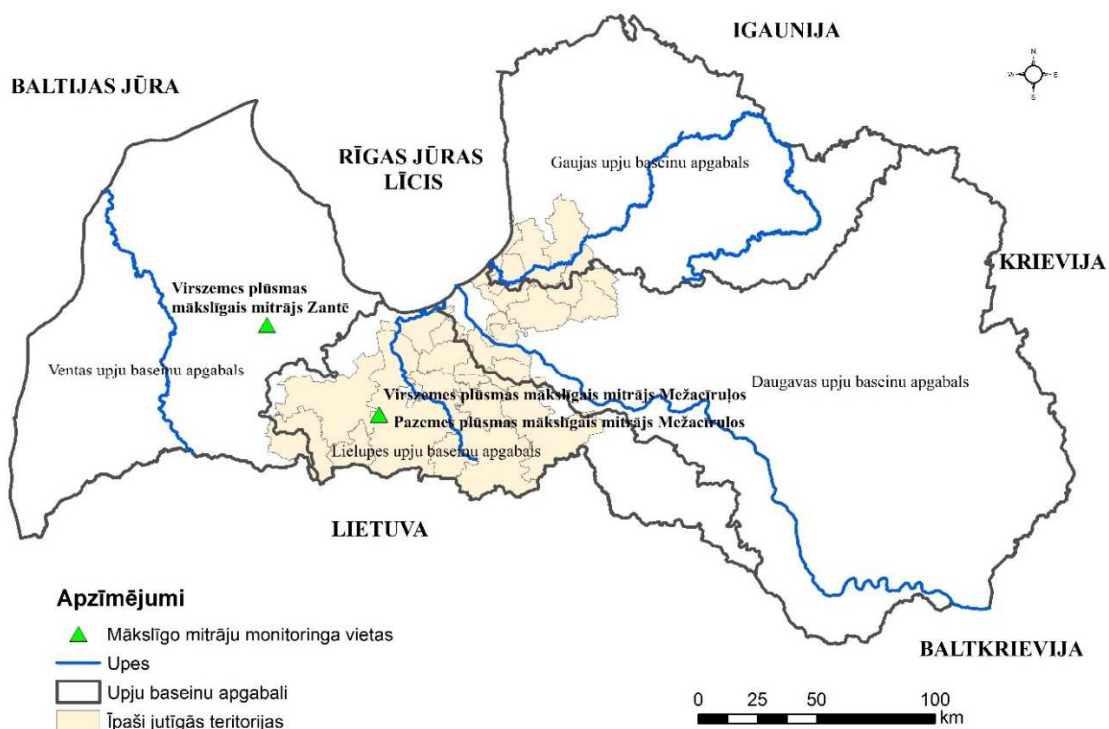
2. MATERIĀLI UN METODIKA

Šis pētījums balstīts uz ūdeņu kvalitātes un kvantitātes rādītāju datiem, kas iegūti empīrisku novērojumu ceļā. Pētījumu objekti projektēti un būvēti, vadoties pēc citās valstīs veiktu pētījumu rezultātiem, ņemot vērā meteoroloģijas, ģeoloģijas, hidroloģijas, ģeomorfoloģijas, zemes lietojuma veida, ekspluatācijas un normatīvo regulējumu atšķirības. Ūdeņu kvalitātes uzlabošanai izmantotās metodes mākslīgajos mitrājos pārbaudītas un novērotas Latvijai raksturīgos meteoroloģiskajos un ekspluatācijas apstākļos.

Šajā nodaļā aprakstīti pētījumu objekti un ūdeņu kvalitātes un kvantitātes monitorings, skaidrota ūdens kvalitātes rādītāju izvēle, kā arī sniegts ieskats pielietotajās datu matemātiskās apstrādes metodēs. Sniegts pamatojums mākslīgo mitrāju aprēķina metodikas izvēlei.

2.1. Monitoringa vietu raksturojums

Monitoringa vietu izvēli pamatoja nepieciešamība izveidot pilotobjektus Latvijā, lai pārbaudītu laboratoriski pierādītas notekūdeņu attīrīšanas metodes darbību reālos apstākļos. Zemnieku saimniecība “Mežacīruļi” (56°34'22"N, 23°29'46"E) atrodas Zemgalē, Jelgavas novadā, Zaļenieku pagastā, īpaši jutīgajā teritorijā, kas noteiktas balstoties uz ES Nitrātu direktīvā noteiktajiem kritērijiem (European Commission 91/676/EEC, 1991), kā attēlots 2.1. att. Šajā reģionā tiek realizēta intensīva lauksaimnieciskā darbība, tai skaitā augkopība un lopkopība. Virszemes un drenu notece no zemnieku saimniecības īpašumiem pa drenu sistēmām un vaļējiem grāvjiem tiek novadīta uz Eglones upi, kas atrodas Lielupes upju baseinu apgabalā. Divu dažādu konstrukciju mākslīgo mitrāju izvietojanas, regulāra monitoringa iespējas un objekta ģeogrāfiskais novietojums uzskatāmi par nozīmīgākajiem kritērijiem pilotobjekta izvēlei. Otrs monitoringa objekts tika izveidots zemnieku saimniecībā “Vilciņi-1” (56°54'34"N, 22°42'36"E), Tukuma novadā, Zantes pagastā, kur izbūvēts virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs virszemes un drenu noteces no lauksaimniecībā izmantotajām platībām attīrīšanai. Notece no objekta tiek novadīta Dēliņstrautā, un tas atrodas Ventas upju baseinu apgabalā.



2.1. att. Mākslīgo mitrāju monitoringa vietas Latvijā

Trīs pētāmie mākslīgo mitrāju objekti, kas izvietoti divās monitoringa vietās Latvijā reālās zemnieku saimniecību teritorijās kā parādīts 2.1. attēlā, ļauj izvērtēt mākslīgo mitrāju darbību atbilstoši ikdienas norisēm saimniecībās. 2.1. tabulā apkopoti galvenie visu trīs pētījumā iekļauto mākslīgo mitrāju konstrukciju izmērāmie parametri, tai skaitā, sateces baseina platība, mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas laukums un mitrāja filtra vai ūdens slāņa dziļums. Mitrāja spoguļa virsmas un sateces baseina laukumu attiecība ir viens no virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju dimensionēšanas nozīmīgākajiem kritērijiem, kas atšķirīgos literatūras avotos kā vēlamie norādīti no 0.5 līdz 2% (Brown et.al., 2000; Crumpton & Stenback, 2020; Gordon et.al., 2021), lai mitrājs darbotos efektīvi attiecībā uz ūdeņu kvalitātes uzlabošanu. Pētījumā iekļauto mitrāju spoguļa virsmas un sateces baseina laukumu attiecība atbilst zinātniskajā literatūrā ieteiktajām robežvērtībām abu Mežacīruļu mākslīgo mitrāju gadījumos, bet Zantes virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas laukums ir mazāks nekā ieteiktās robežvērtības.

2.1. tabula. **Mākslīgo mitrāju pētījuma objektu galvenās konstruktīvās dimensijas**

Pētījumu objekts	Mākslīgā mitrāja konstrukcija	Sateces baseina platība, ha*	Mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas laukums, ha	Mitrāja spoguļa virsmas un sateces baseina laukumu attiecība, %	Ūdens vai filtra slāņa maksimālais dziļums, m
Mežacīruļi	Pazemes plūsma	0.8	0.016	2	0.9
Mežacīruļi	Virszemes plūsma	74.7	0.370	0.5	1.5
Zante	Virszemes plūsma	553.3	0.240	0.04	1.5 (ieplūdes daļā) 0.5 (izplūdes daļā)

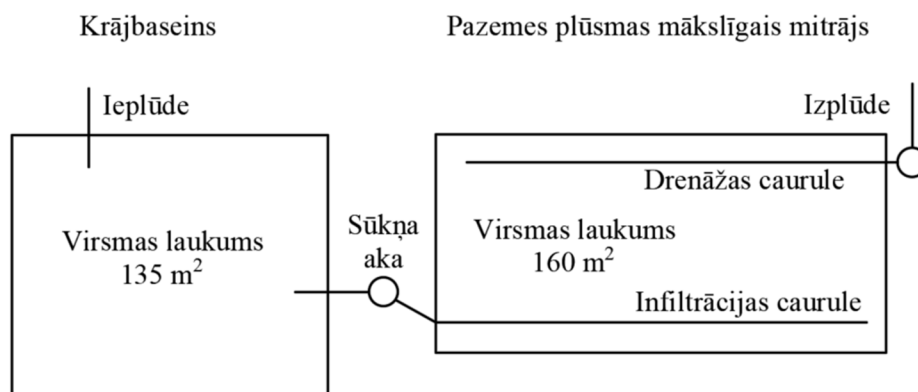
* sateces baseina laukums mērīts pamatojoties uz VSIA “Zemkopības ministrijas nekustamie īpašumi” sagatavoto meliorācijas tīklu digitālo datubāzi (LGIA, 2017).

Pētījumā iekļautā ūdeņu kvalitātes uzlabošanas metode ir uzskatāma par vienu no “lauka malā” novietotās prakses elementiem (*edge-of-field practice*), kur uzsvars tiek likts uz noteces savākšanu un augu barības elementu aizturēšanu, pirms tie nonāk tālākajos hidrogrāfiskā tīkla posmos. Visi pētījumā iekļautie mitrāji veidoti kā transformētas vaļēja meliorācijas grāvja daļas novietotas plūsmas ceļā (*in-stream*), un tie būvēti ar mērķi uztvert un attīrīt visu sateces baseina platībā uztverto noteces daudzumu. Visi trīs mākslīgie mitrāji kalpo kā barjera biogēno elementu un suspendēto vielu aizturēšanai un slāpekļa savienojumu bioloģiskai pārveidošanai videi mazāk kaitīgās formās efektīvas mitrāja darbības gadījumā.

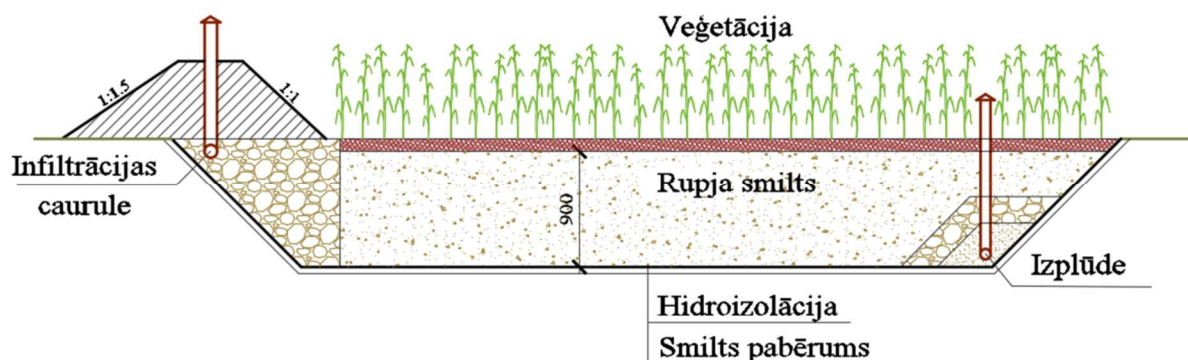
2.1.1. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos

Lietus ūdeņi, kas veidojušies kā virszemes notece no zemnieku saimniecību pagalma teritorijām, būtu klasificējami kā atsevišķa notekūdeņu kategorija, kuru ūdeņu kvalitatīvo rādītāju ziņā, t.sk. organisko un suspendēto vielu koncentrācijas, visai bieži atbilst tipisku sadzīves notekūdeņu koncentrācijām (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002), bet notekūdeņu izcelsmes un pieplūdes režīma ziņā atbilst apdzīvotu vietu lietusūdeņiem (Grinberga &

Lagzdins, 2017). Zemnieku saimniecības “Mežacīruļi” pagalma teritorija veido lietus ūdeņu kanalizācijas sistēmas sateces baseinu, un tajā atrodas biroja ēka, palīgēkas, lauksaimniecības tehnika, lopu mītnes, biogāzes ražotnes un siltumnīcu komplekss. Pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja sateces baseinu veido zemnieku saimniecības pagalma teritorija 0.8 ha platībā. Jumta platības un cietie virsmas segumi veido 77% no sateces baseina kopējās platības. Lietus ūdeņi līdzīga rakstura teritorijām var saturēt suspendētās vielas, organiskās vielas, eļļas un naftas produktus un biogēnos elementus dažādās koncentrācijās, jo brīvie atklātie laukumi nereti tiek izmantoti arī kā pagaidu novietnes tehnikai vai īslaicīgi uzglabājamiem materiāliem. Lietus ūdens pētījumu objektā tiek savākts caur virszemes lietus ūdeņu uztveršanas ierīcēm, kas sastāv no gūlijām un teknēm, un caur segtu pašteses kanalizācijas sistēmas palīdzību novadīts uz pētāmo attīrīšanas iekārtu. Lietus ūdeņu attīrīšanas iekārtas projektētas divos līmeņos un sastāv no krājbaseina, sūkņa akas un pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja. Pirmajā līmenī jeb kā pirmējā notekūdeņu attīrīšana projektēta mehāniska attīrīšana vaļējā krājbaseinā (2.2. un 2.4. attēls). Vaļējā krājbaseinā lietus notekūdens tiek novadīts pa pašteses cauruli DN 300 mm. Krājbaseina pamatne un nogāzes ir hermētiskas, bez savienojuma ar gruntsūdeņiem, un krājbaseins kalpo kā sedimentācijas baseins smagāko cieto daļiņu izgulsnēšanai, kā arī plūsmas akumulēšanai, izlīdzinot īslaicīgi palielinātus caurplūdumus.



2.2. att. Lietus notekūdeņu attīrīšanas iekārtu shēma ar pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju Mežacīruļos



2.3. att. Pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos šķērsgriezums

Krājbaseina dziļums ir 1 m un lietderīgais tilpums ir 120 m³, kas atbilst 40 minūšu intensīva lietus ūdens apjomam. Krājbaseinā ūdensaugi nav paredzēti un ekspluatācijas laikā nav novēroti.

No krājbaseina ūdens tiek periodiski pārsūknēts uz otro attīrīšanas līmeni jeb pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju, kur noris bioloģiski un fizikāli notekūdeņu attīrīšanas procesi. Sūknis atrodas siltinātā sūkņa akā (2.2. attēls).



2.4. att. **Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos**

Sasniedzot noteiktu ūdens līmeni krājbaseinā, notekūdens tiek iesūknēts pazemes plūsmas mitrāja infiltrācijas caurulē. Horizontālas pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs ir ar kopējo virsmas platību 160 m², filtra dziļumu 1 m. Mitrāja filtra daļa sastāv no rupjas skalotas smilts bēruma ar frakciju 0.5 – 5 mm kā galveno daļu, ieplūdes daļa veidota no šķembu slāņa, kā arī drenas caurules ar šķembu apbērumu, kas novada attīrītu ūdeni vaļējā grāvī. Mitrāja pamatne izklāta ar PE plēvi divās kārtās, kas nodrošina hermētiskumu un novērš neattīrītu notekūdeņu nokļūšanu gruntsūdeņos un gruntsūdeņu iespiešanos mitrāja filtra daļā. Mitrāja virsma vienmērīgi apstādīta ar niedrēm. Krājbaseins un horizontālas pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs dabā attēlots 2.4. attēlā. Attīrītais lietus ūdens pa vaļēju grāvi nonāk Eglones upē (Grinberga et.al., 2020).

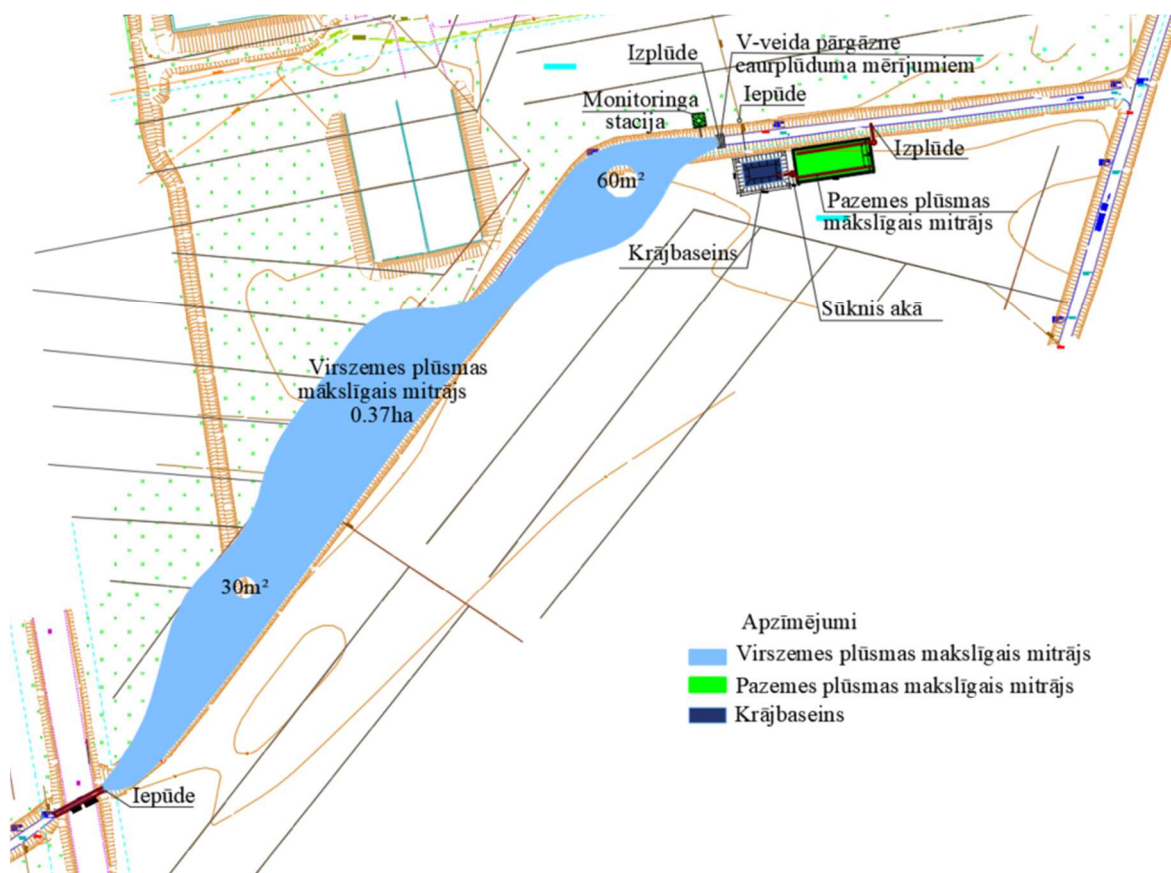
2.1.2. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs zemnieku saimniecības “Mežacīruļi” teritorijā ierīkots 2014. gada vasarā un kopš ekspluatācijas sākuma tur īstenots ūdens kvalitātes un kvantitātes monitorings (2.5. attēls). Zemgales reģionā ir salīdzinoši intensīva lauksaimnieciskā darbība, un mitrāja sateces baseina platībā ir ierīkota nosusināšanas sistēma, izmantojot māla drenas, kolektorus un vaļējus grāvjus. Lauksaimniecības zemi šajā platībā izmanto galvenokārt kā aramzemi, lai audzētu lauksaimniecības kultūras, piemēram, kukurūzu, kviešus un rapsi (Kill et.al., 2022).

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs tika izbūvēts, pārveidojot esošo vaļējo novadgrāvi 240 m garā posmā. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas platība ir 0.37 ha, un sateces baseina platība ir 74.7 ha, un sateces baseina un spoguļa virsmas attiecība veido attiecību 0.5% (Grinberga & Lagzins, 2017). Mitrāja spoguļa virsmas platums veidots no 6 līdz 42 m. Ūdens līmenis tiek regulēts pie izplūdes ar kontroles un mērīšanas struktūru ar 90° v-veida pārgāzni, kas iebūvēta betona atbalstsienā. Mitrājs funkcionāli ir sadalīts divās daļās ar maksimālo ūdens dziļumu 1.45 m pie ieplūdes daļas, lai veicinātu sedimentācijas procesus, un seklu daļu pie izplūdes ar maksimālo ūdens dziļumu līdz 0.5 m barības vielu pārveidošanas procesiem. Augi mitrājā ir izplatījušies dabiski, galvenokārt seklākās teritorijās pie mitrāja un divu salu krastiem. Viena neliela saliņa pēc ieplūdes un otra pirms izlaides daļas tika izveidotas ūdens straumes trajektorijas sadalīšanai (Kill et.al., 2022).



2.5. att. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos

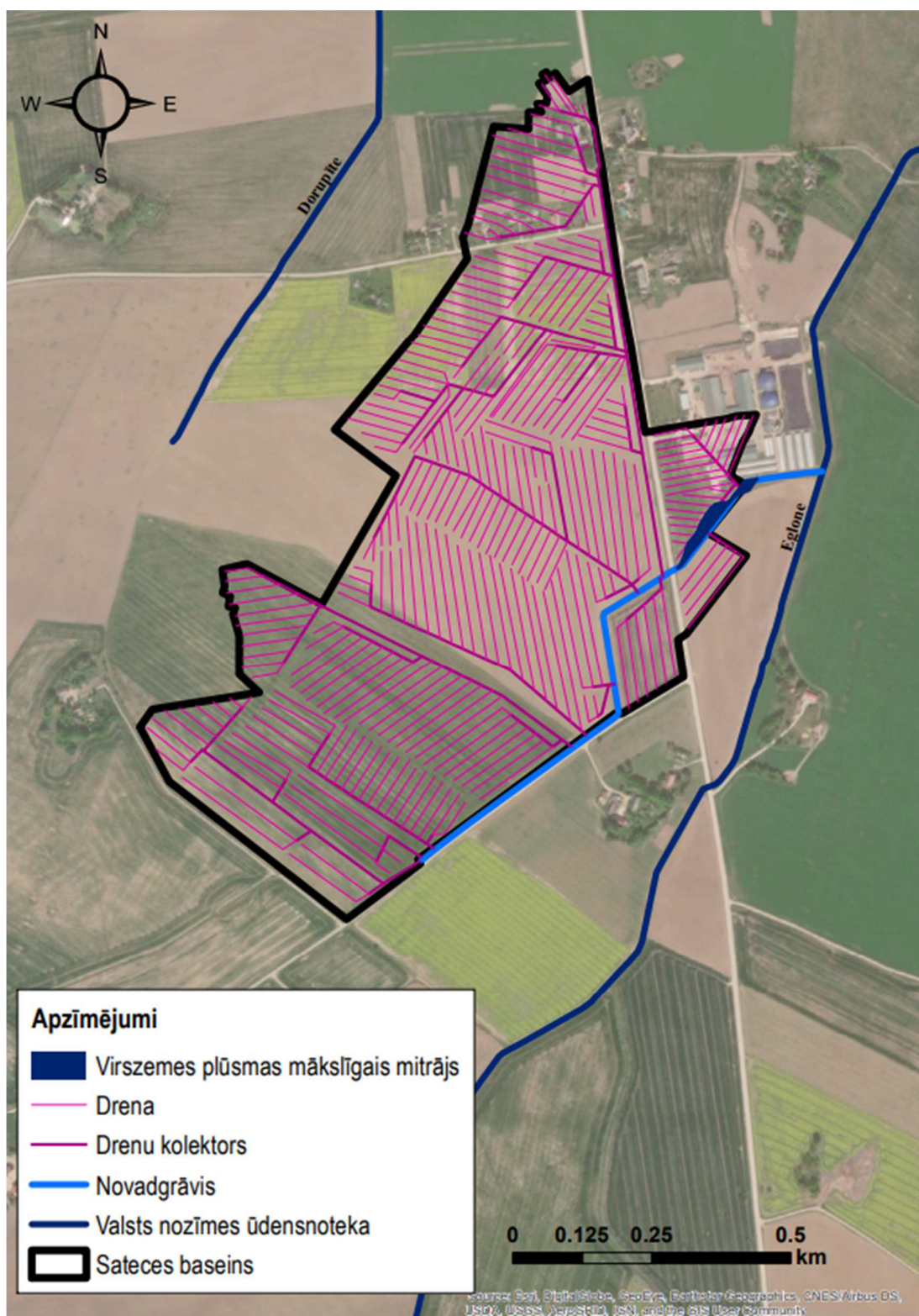


2.6. att. Virszemes plūsmas un pazemes plūsmas mākslīgie mitrāji Mežacīruļos

2.6. attēlā redzams divu savstarpēji neatkarīgu dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju izvietojums plānā zemnieku saimniecībā “Mežacīruļi”. 2.6. attēlā redzamas esošā meliorācijas

grāvja kontūras un drenu sistēmu daļas. Viena drenu izteka no aramzemes grāvja labajā pusē ievadīta mitrāja vidusdaļā, no grāvja kreisā krasta viena drenu sistēmas izteka būvniecības laikā demontēta, bet drenas ievadītas tieši mitrājā. Mitrāja vidusdaļā ievadītais ūdens apjoms un kvalitāte monitoringa laikā nav tikusi reģistrēta.

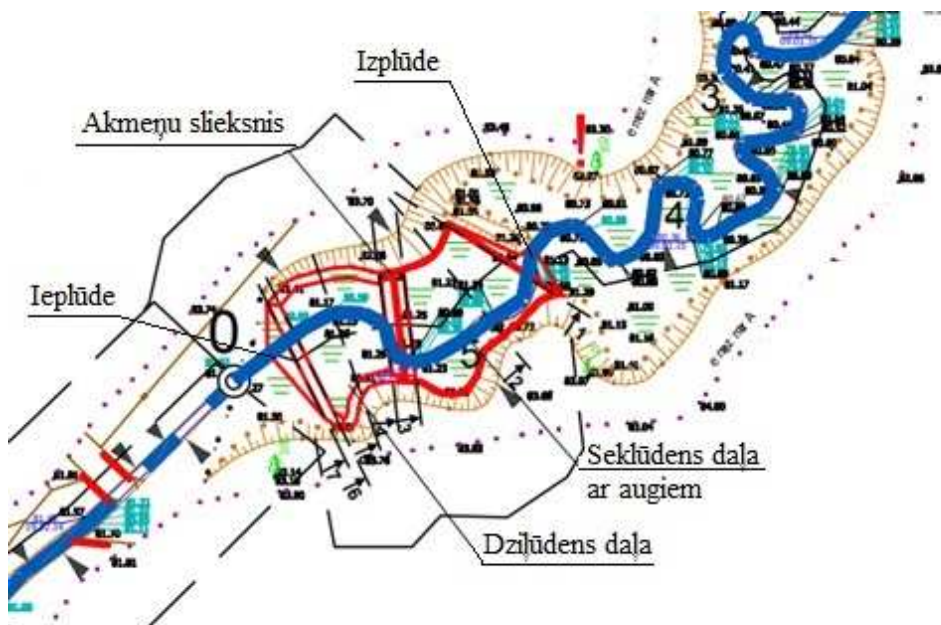
Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos sateces baseinu veido galvenokārt lauksaimniecībā izmantotas platības ar drenu un vaļēju grāvju sistēmām. Kā redzams 2.7. attēlā, sateces baseina platība tiek izmantota galvenokārt kā aramzeme.



2.7. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos sateces baseins

2.1.3. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zante

Lauksaimniecības teritorija, kas izvēlēta monitoringa objekta būvniecībai, tiek izmantota kā drenēta aramzeme. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē izbūvēts kā viens no videi draudzīgiem meliorācijas sistēmas elementiem (atbilstoši LR MK noteikumiem Nr. 600, 2014), 75 m garu valsts nozīmes ūdensnotekas posmu pārveidojot par mitrāju. Esošā ūdensnoteka pārmitrā, reljefa ziņā zemā posmā mērķtiecīgi padziļināta un paplašināta, nodrošinot kopējo virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja spoguļa virsmu 0.25 ha platībā.

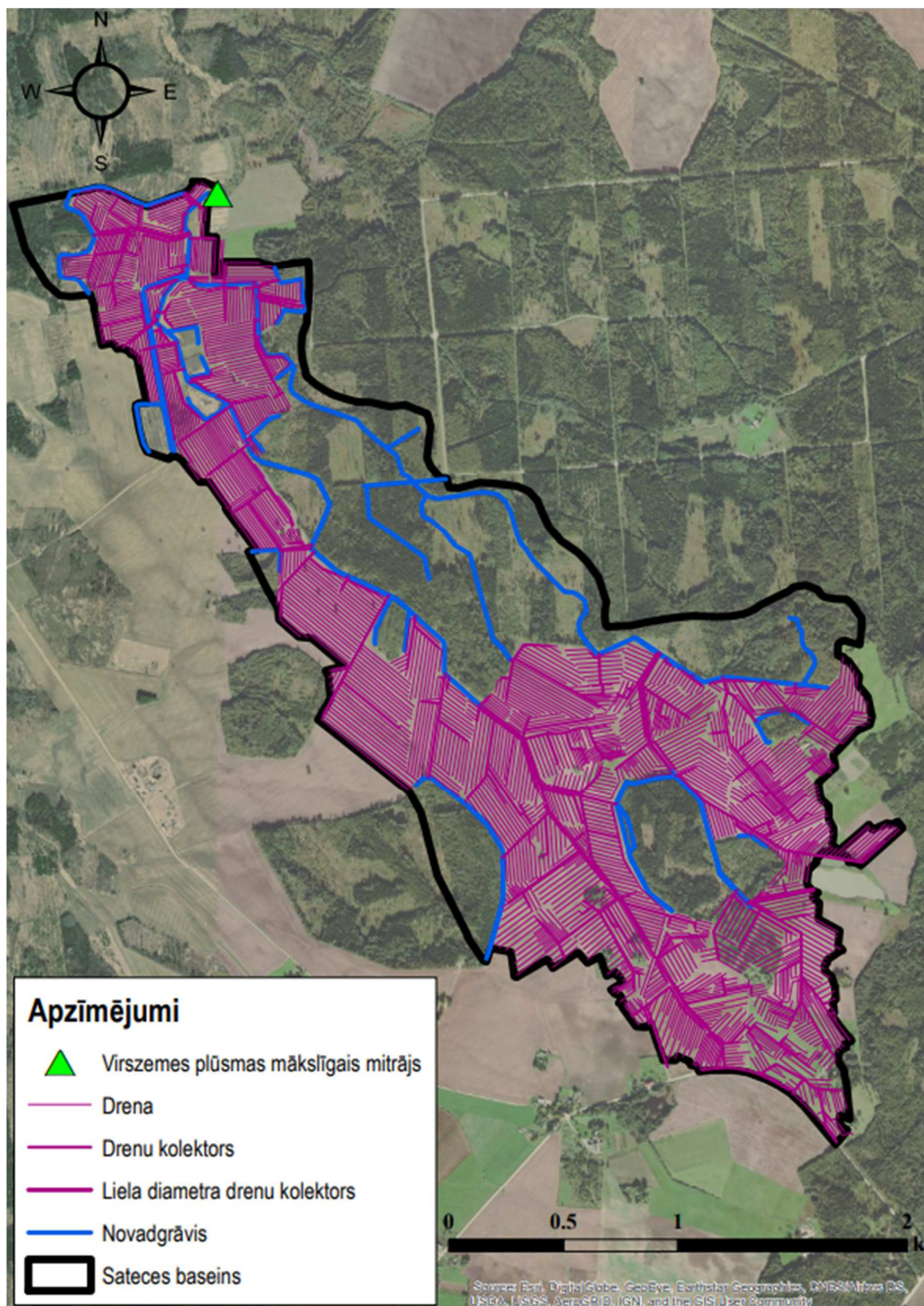


2.8. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē plāns

Mākslīgais mitrājs veidots no divām konstruktīvi atšķirīgām daļām, kas atdalītas ar akmeņu krāvuma veidotu sliekšni. 2.8. attēlā (rasējuma autors: M. Ozoliņa, SIA "Cebo") redzams ūdensnotekas un mākslīgā mitrāja topogrāfiskā plāna materiāls, kas atspoguļo kopējo sākotnējo un projektēto situāciju objektā.



2.9. att. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē



2.10. att. Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē sateces baseins

Mitrāja izbūves vieta izvēlēta reljefa pazeminājumā, dabīgi mitrā ieplakā, kas nodrošina virszemes noteces ieplūdi un atvieglo esošo meliorācijas sistēmu ievadīšanu mitrājā. Ieplūdes daļa veidota kā dziļūdens zona līdz 1.5 m ūdens slāņa dziļumam, kas daļēji kalpo kā sedimentācijas baseins ar mērķi izgulsnēt suspendētās vielas. Ieplūdes daļā ūdensaugi nav stādīti, bet dabīgi saauguši eksploatācijas laikā. Kopējā apauguma izplatība mitrājā

eksploataācijas laikā redzama 2.9. attēlā (Foto avots: Z/S “Vilciņi-1” sociālo tīklu konts, <https://www.facebook.com/vilcini1/photos/1942701195889787>). Otra mitrāja daļa aiz akmeņu bēruma sliekšņa veidota dziļumā līdz 0.5 m, kur pamatnē mērķtiecīgi un blīvi veidots ūdensaugu stādījums. Mitrāja gultne veidota bez hidroizolācijas un ir savienota ar gruntsūdeņiem.

2.2. Ūdeņu paraugu ievākšanas un ķīmiskā sastāva noteikšanas metodika

Trīs pētījumu objektos veikts ūdeņu kvalitātes monitorings, manuāli ievācot ūdeņu paraugus pie ieplūdes un pie izplūdes no mākslīgā mitrāja. Ūdeņu paraugi tika ievākti mazgātās un ar destilētu ūdeni skalotās 0.5 l plastmasas pudelēs biogēno elementu analīzēm un 1 l tilpuma pudelēs suspendēto vielu koncentrāciju noteikšanai (Virszemes..., 2003). Pazemes plūsmas mitrājā ievākti arī 3 l tilpuma pudelēs BSP₅ un ĶSP koncentrāciju noteikšanai. Ūdeņu paraugi tika iesmelti marķētās pudelēs reizi vai atsevišķos periodos divas reizes mēnesī. Kopējais monitoringa periods pētījumu objektā Mežacīruļos bija 90 kalendārie mēneši no 2014. gada jūlija līdz 2021. gada decembrim. Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā analizēti 103 ūdeņu paraugi. Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā analizēti 107 ūdeņu paraugi. Pētījumu objektā Zante paraugi tiek ievākti 48 kalendāros mēnešus no 2017. gada jūnija līdz 2021. gada decembrim. Zantes virszemes plūsmas mitrājā analizēti 45 ūdeņu paraugi.

Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos ieplūdes daļa sastāv no segtas lietusskanalizācijas sistēmas kolektora, polimēra materiāla DN300 mm pašteses caurules ar apaļu šķērsgriezumu, kas ievadīta lietusskanalizācijas skatakā ar 50 cm dziļu nosēddaļu. No skatakas pa polimēra materiāla DN300 mm pašteses cauruli ar apaļu šķērsgriezumu nonāk vaļējā krājbaseinā. Ūdeņu paraugi tiek ievākti no pašteses caurules “Ieplūde”, kā parādīts 2.2. un 2.4. attēlā. Otrs ūdeņu paraugs pie izplūdes no mitrāja tika ievākts no iztekas caurules no mitrāja grāvī.

Skatakā pirms ieplūdes caurules automātiskā režīmā tiek mērīts ūdens līmenis un uzkrāti mērījumu rezultāti, izmantojot *Mini-Diver* spiediena sensorus. Plūsmas ātrums tika aprēķināts, pamatojoties uz Manninga vienādojumu (Walkowiak, 2008) apaļa šķērsgriezuma caurulēm ar daļēju pildījumu monitoringa periodā.

Maninga formula caurplūduma aprēķiniem:

$$Q = A_L \cdot v = \frac{A_L \cdot (K \cdot A_L \cdot \sqrt[3]{R^2} \cdot \sqrt{S})}{n} = \frac{k \cdot A_L^2 \cdot \sqrt[3]{R^2} \cdot \sqrt{S}}{n}, \quad (2.1.)$$

kur

Q – caurplūdums, m³·s⁻¹;

v – plūsmas ātrums, m·s⁻¹;

A_L – plūsmas šķērsgriezuma laukums, m² (mainīgs pie mainīga ūdens dziļuma);

R – hidrauliskais rādiuss, m, ko aprēķina plūsmas šķērsgriezuma laukumu A dalot ar apslāpēto perimetru;

S – hidrauliskais gradients (jeb kritums), m·m⁻¹;

n – Maninga raupjuma koeficients, kas atkarīgs no izmantotā caurules materiāla (PVC caurulei $n = 0.009 - 0.011$);

K – no vēlamajām caurplūduma mērvienībām atkarīga konstante.

Aprēķinātais caurplūdums papildināts ar pārrēķinātu caurplūdumu, kad ūdens līmenis akā kāpj virs aizejošās caurules augšas atzīmes. Attiecīgajos periodos ieplūdes caurulē veidojas spiediena režīms. Pārrēķinātie caurplūdumi šajos periodos rēķināti, izmantojot Toričelli formulu:

$$Q = A_L \cdot v = \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (2.2.)$$

kur

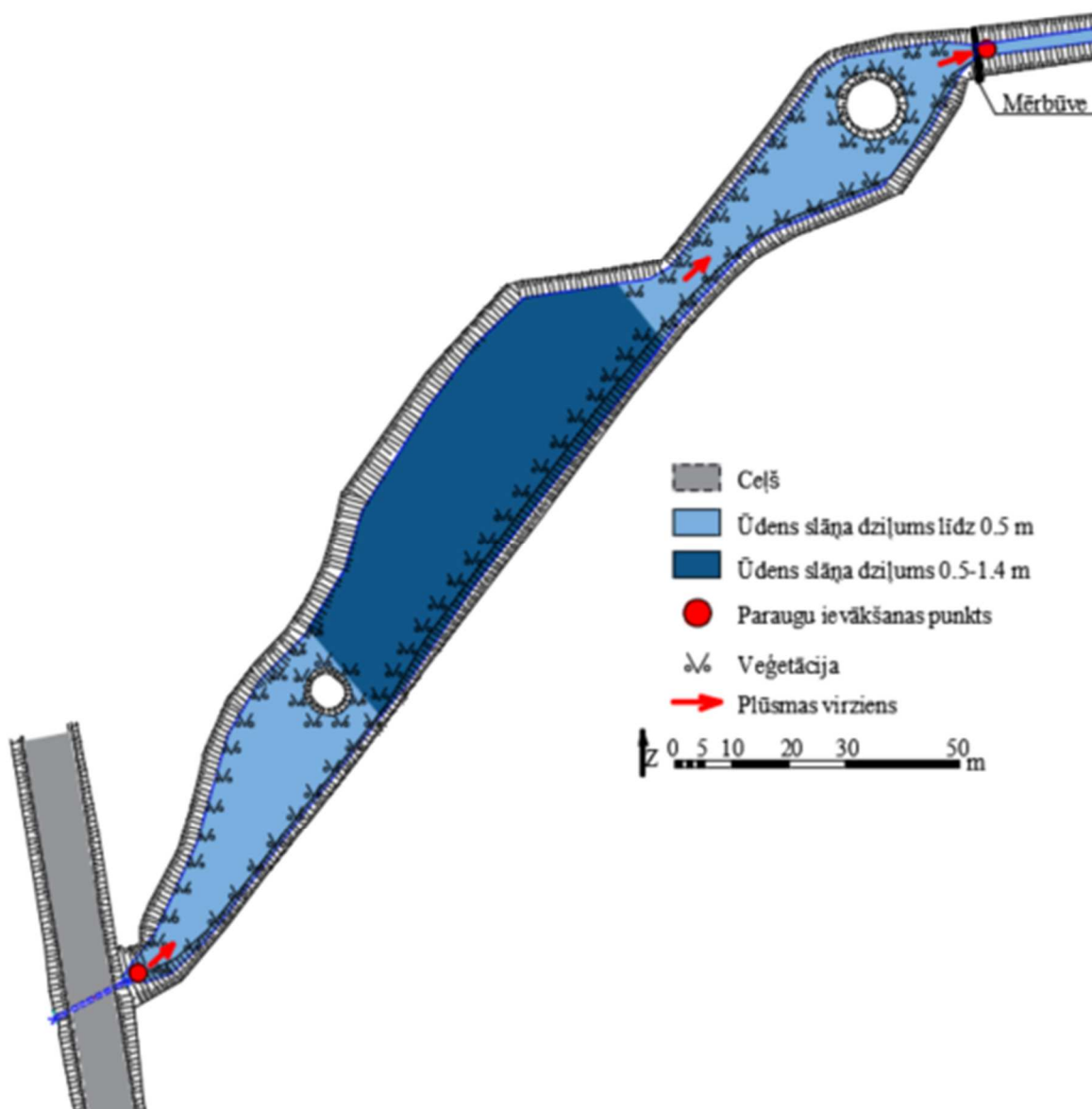
Q – caurplūdums, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

v – plūsmas ātrums, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

A_L – plūsmas šķērsriezuma laukums, m^2 ;

r – caurules rādiuss, m;

h – ūdens staba augstums virs caurules, m, ko aprēķina no novērotā ūdens dziļuma atņemot caurules diametru.



2.11. att. Paraugu ņemšanas vietas pētījumu objektos Mežacīruļos

Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos ūdeņu paraugi ievākti ieplūdes daļā aiz ceļa caurtekas un izplūdes daļā pirms pārgāznes kā parādīts 2.11. attēlā. Šajā attēlā redzams arī ūdens slāņa dziļumu sadalījums, kas pēc ekspluatācijas uzsākšanas uzmērīts dabā ar *RiverRay ADCP* ehlotu 19 šķērsgriezumos visā mitrāja platībā, un veģetācijas izplatība. Ūdens līmeņu novērojumu nodrošināšanai izplūdes daļā izbūvēta betona atbalstsiena ar metāla V veida 90° pārgāzni. Ūdens līmenis mērīts ar *Mini-Diver* ūdens līmeņa datu reģistrētāju. Novērotie ūdens līmeņi pārrēķināti, lai iegūtu caurplūdumus pēc sekojošas formulas (Walkowiak, 2008), atbilstoši mērbūves formai un izmēriem:

$$Q = K \cdot H^{2.5}, \quad (2.3.)$$

kur

Q – caurplūdums, $l \cdot s^{-1}$;

H – ūdens līmenis virs pārgāznes, m;

K – konstante, kas atkarīga no pārgāznes vērma leņķa un vēlamajām caurplūduma mērvienībām (šeit ar vērtību 1).

Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja ūdens krājumi veģetācijas periodā tiek izmantoti arī zemnieku saimniecības siltumnīcu apūdeņošanas vajadzībām. Datumi un nosūkņētie caurplūdumi tikai reģistrēti un pēc ūdens līmeņu pārrēķināšanas tika pieskaitīti pie novērotajiem caurplūdumiem.

Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Zantē caurplūdumu mērījumiem izmantota izplūdes daļā izvietota mērbūve ar kombinētu V veida un taisnstūra pārgāzni. Ūdens līmeņi reģistrēti ar *Mini-Diver* ūdens līmeņa datu reģistrētāju un pārrēķināti pēc kombinētas formulas, ievērtējot pārgāznes specifiku un dimensijas, izmantojot formulu kombināciju, kur trijstūra formas ūdens līmeņi tiek pārrēķināti pēc formulas V veida trijstūra pārgāznēm, bet, kad ūdens līmenis kāpj virs 0.03 m, caurplūdumu rēķina pēc formulas trapeceveida pārgāznēm. Ūdens līmeņu pārrēķinam no 0 – 0.03 m virs pārgāznes izmantota 2.2. formula. Ūdens līmeņa pārrēķiniem virs 0.03 m augstuma, pārgāznes forma ir trapeceveida, tāpēc caurplūdums tiek rēķināts, izmantojot sekojošu formulu:

$$Q = K \cdot (L - 0.2 H) \cdot H^{1.5}, \quad (2.4.)$$

kur

Q – caurplūdums, $l \cdot s^{-1}$;

H – ūdens līmenis virs pārgāznes, m;

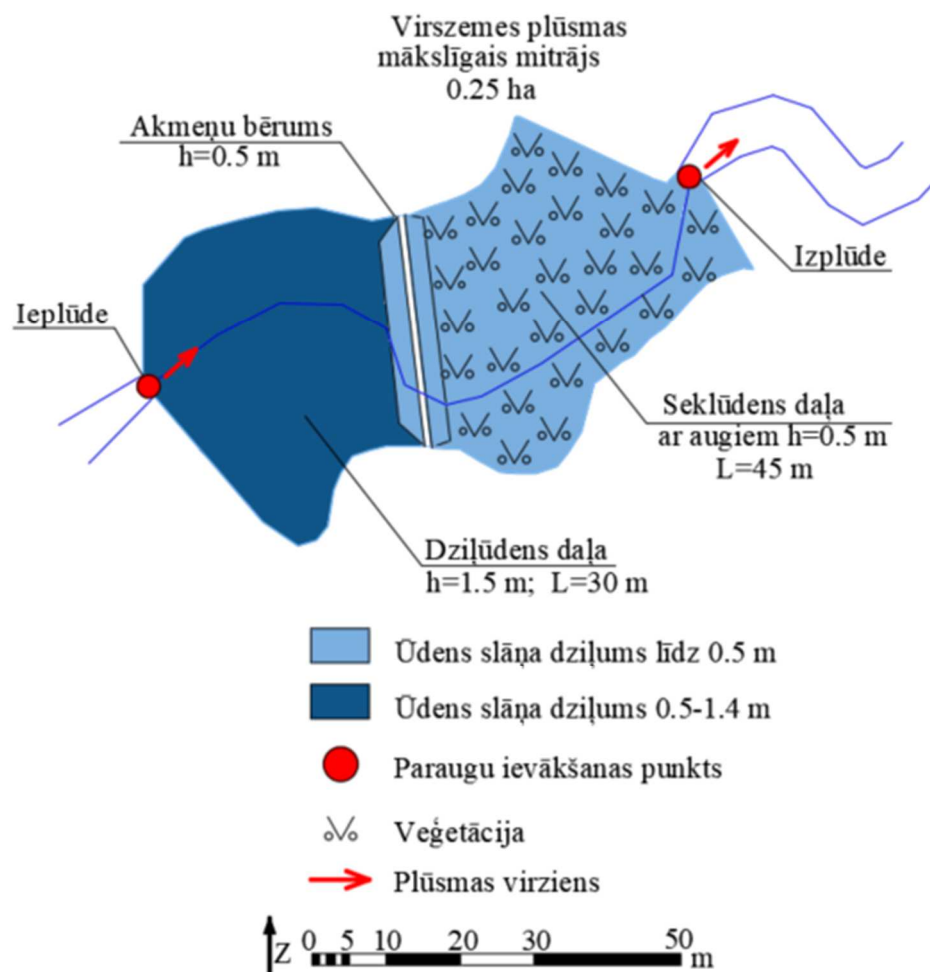
L – pārgāznes vērma platums, m;

K – konstante, kas atkarīga no vēlamajām caurplūduma mērvienībām (šeit ar vērtību 1838).

Ūdeņu paraugi ievākti atbilstoši 2.12. attēlā norādītajām atzīmēm pie ieplūdes un pie izplūdes. Attēlā parādīta arī veģetācijas izplatība un ūdens slāņu dziļumu sadalījums pa mitrāja platību.

Ūdens kvalitātes rādītājus šajā pētījumā var grupēt divās daļās – parametros, kas tiek novēroti lauksaimniecības platībās kā barības vielu koncentrācijas, un parametros, kas tiek analizēti, lai raksturotu organisko vielu saturu notekūdeņos kā skābekļa patēriņu. Tā kā uz mitrājiem novadāmie notekūdeņi tika savākti lauksaimniecības platībās, barības vielu koncentrācijas un kopējais suspendēto vielu daudzums tika uzraudzīti saskaņā ar Latvijas normatīvajiem aktiem un ES Nitrātu direktīvu (European Commission 91/676/EEC, 1991). Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrāja monitoringam tika papildu noteikts bioķīmiskais un ķīmiskais skābekļa patēriņš, lai izmērītu bioloģiski noārdāmo organisko vielu daudzumu ūdenī (Grinberga & Lagzdins, 2017) atbilstoši sadzīves un lietus notekūdeņu apsaimniekošanas noteikumiem Latvijā (Grinberga et.al., 2020).

Ūdens paraugi tika analizēti un noteikta koncentrācija ($mg \cdot l^{-1}$) tādiem ūdeņu kvalitātes parametriem kā nitrātu slāpekļa ($NO_3^- - N$), amonija slāpekļa ($NH_4^+ - N$), kopējais slāpeklis (N_{kop}), ortofofātu fosforu ($PO_4^{3-} - P$), kopējais fosfors (P_{kop}) un kopējās suspendētās vielas (SV). Šīs analīzes veiktas akreditētā Daugavpils Universitātes aģentūras Latvijas Hidroekoloģijas institūta Hidroķīmijas laboratorijā. Suspendēto vielu analīzes veiktas LLU Vides un būvzinātņu fakultātes Vides un ūdenssaimniecības katedras laboratorijā. Ūdeņu paraugi 28 mēnešu periodam no 2019. gada septembra līdz 2021. gada decembrim tika analizēti un noteikta bioķīmiskā skābekļa patēriņa (BSP_5) koncentrācija ($mg \cdot l^{-1}$) piecās dienās un ķīmiskā skābekļa patēriņa (KSP) koncentrācija ($mg \cdot l^{-1}$).



2.12. att. Paraugu ņemšanas vietas pētījumu objektā Zantē

2.2. tabula. Analīzes metodes, Latvijas standarti un iekārtas ūdeņu kvalitātes parametru ķīmiskajai analīzei

Ūdeņu kvalitātes parametrs	Latvijas Standarts	Analīzes metode	Izmantotās iekārtas nosaukums
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	FIA, ISO 13395:1996(E)	Plūsmas analīze (CFA un FIA) un spektrometriskā noteikšana	AutoAnalyzer Bran+Luebbe AA-3
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	LVS ISO 7150-1:1984	Manuālā spektrometriskā metode	
N_{kop}	LVS EN ISO 11905-1:1998	Mineralizācijas metode, oksidējot ar peroksidisulfātu	

Ūdeņu kvalitātes parametrs	Latvijas Standarts	Analīzes metode	Izmantotās iekārtas nosaukums
PO ₄ ⁻ -P	LVS EN 1189:2000	Amonija molibdāta spektrometriskā metode	Spectrophotometer GENESYS 10S Vis
P _{kop}	LVS EN 1189:2000	Amonija molibdāta spektrometriskā metode	
SV	LVS EN 872:2005	Cieto suspendēto vielu noteikšana- Filtrēšana caur stikla šķiedras filtru	Vakuumsūkņi
BSP ₅	LVS EN 1899-1:1998~	Atšķaidīšanas metode ar sējmateriāla un alitiourīnvielas pievienošanu	-
ĶSP	LVS ISO 6060:1989~	Ķīmiskā skābekļa patēriņa noteikšana	-

Ūdeņu paraugu analīzes BSP₅ un ĶSP koncentrāciju noteikšanai veiktas akreditētā laboratorijā Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskajā institūtā BIOR. Izmantotā analīžu veikšanas metodika ūdeņu kvalitātes parametru noteikšanai laboratorijas apstākļos apkopota 2.2. tabulā.

Lai noteiktu analizēto ūdeņu kvalitātes parametru aizturēšanas efektivitāti, tika salīdzināta parametru koncentrācija pirms ieplūdes un pēc izplūdes no mitrāja un attīrīšanas efektivitāte tika izteikta procentos, izmantojot sekojošu formulu:

$$E = \frac{C_{in} + C_{out}}{C_{in}} \cdot 100, \quad (2.5.)$$

kur

E – attīrīšanas efektivitāte, %;

C_{in} – analizētā parametra koncentrācija, mg·l⁻¹ pirms ieplūdes mākslīgajā mitrājā;

C_{out} – analizētā parametra koncentrācija, mg·l⁻¹ pēc izplūdes no mākslīgā mitrāja.

2.3. Datu matemātiskās apstrādes metodika

Tādi ietekmējošie faktori kā gaisa un ūdens temperatūras svārstības diennakts laikā, izšķīdušā skābekļa un plūsmas ātruma izmaiņas u.c. ietekmē ūdens kvalitāti mākslīgajos mitrājos. Ūdeņu paraugu ievākšanas laikā netika ievērots specifisks grafiks, lai novērstu šo faktoru ietekmi. Paraugu datumi izvēlēti, pieturoties pie līdzīgiem intervāliem starp paraugu ievākšanas reizēm, piemēram, mēnešu pirmajos datumos. Analīžu rezultāti tika apstrādāti, izmantojot XLSTAT (MS Excel programmas paplašinājums datu statistiskai apstrādei) statistiska pamatojuma iegūšanai uz pētāmiem jautājumiem.

Izpētes vietā esošā pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja sateces baseins atrodas lauku sētā un klāts ar necaurlaidīgu virsmas segumu betona plātņu veidā. Aprakstītā teritorija ar minētajiem virsmas apstākļiem un esošo drenāžas sistēmu ir uzskatāma par lietus ūdens kanalizācijas sistēmu atbilstoši Latvijas Republikas tiesību aktiem. Lietusūdens daudzuma novērtējums no sateces baseina sākotnēji tika veikts pēc Latvijas būvnormatīvā LBN 223-15

“Kanalizācijas būves” (LBN 223-15, 2015) paredzētās intensitātes aprēķina metodes. Monitoringa dati nokrišņiem iegūti no tuvākās meteoroloģiskās stacijas Dobeles pilsētā (Grinberga et al., 2020).

Ūdens līmeņu un caurplūdumu aprēķiniem un saistīto datu apstrādei izmantota interpretējama objektorientētā skriptu valoda *Python* (Python Software Foundation, 2001-2022). Ūdeņu kvalitātes parametru koncentrāciju diapazona demonstrēšanai izmantotas *Boxplot* diagrammas. Statistiskā analīze tika veikta ar 95% ticamības līmeni.

Normalitātes novērtēšanai tika izmantota Kolmogorova-Smirnova tests. Lai statistiski novērtētu mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti pētījumu objektos, tika izmantots neparametriskais *Mann-Whitney U* tests un Spīrmana rangs (*Spearman's rank*) korelācija, kā arī regresijas analīze. Lai noteiktu ūdeņu kvalitāti raksturojošo parametru savstarpējās attiecības, tika izmantota Spīrmana rangs korelācija.

P-vērtība ≥ 0.05 norādīja uz nespēju noraidīt hipotēzi, ka datu kopas atbilst normālajam sadalījumam. Ja datu kopa atbilda normālajam sadalījumam, tika izmantots pāra t-tests, kas nodrošina iespēju noteiktu attiecīgo datu kopu savstarpējās saistības statistisko nozīmīgumu. Ja nevarēja pieņemt normālu datu sadalījumu, tika izmantots *Wilcoxon Signed-Rank* tests. Līdzīgu statistisko pieeju var atrast arī literatūrā (Grinberga et al., 2020).

2.4. Mākslīgo mitrāju aprēķinu metodikas un modeļa izstrādes principi

Literatūrā atrodami pētījumi par vairākiem mākslīgo mitrāju aprēķinu modeļiem (Henrichs et.al., 2007; Meyer et.al., 2015; Galanopolos & Lyberatos, 2016), kas paredzēti galvenokārt rezultātu modelēšanai (Juston & Kadlec, 2019). Šajā pētījumā iekļautas dažādas konstrukcijas mākslīgo mitrāju aprēķina metodes, kas aprobētas atbilstoši klimatiskajiem apstākļiem un pielāgotas mitrāju projektēšanai Latvijā. Literatūrā galvenokārt izmantotas divas pieejas mākslīgo mitrāju kā attīrīšanas iekārtu dimensiju noteikšanai (Meyer et.al., 2015). Viena no metodēm ir noteiktam notekūdeņu veidam pieņemt tipiski sagaidāmus piesārņojošo vielu parametrus un notekūdeņu apjomu un, balstoties uz pētījumiem konkrētajā reģionā, pieņemt mitrāja platības attiecību vienai konkrētai mākslīgo mitrāju konstrukcijai (Langergraber, 2007). Piemēram, literatūrā sastopamais ieteicamais virsmas laukums horizontālas pazemes plūsmas mitrājam, lai attīrītu vienam cilvēka ekvivalentam (CE) atbilstošo sadzīves notekūdeņu apjomu tiek minēts no 5 līdz 7 m². Šādas pieejas pielietojumam nepieciešami dati no pētījumu objektiem, kas pamatotu mitrāja konstrukcijas un dimensiju izvēli un pierādītu tā efektivitāti. Otra no metodēm ir balstīta uz fizikālajiem un bioloģiskajiem attīrīšanas procesiem, kas norisinās mākslīgajā mitrājā. Mērķtiecīgi radot piemērotus apstākļus konkrētajiem procesiem, iespējams prognozēt sagaidāmo mitrāja darbības efektivitāti attiecībā uz konkrēto piesārņojošo vielu. Arī šī aprēķinu metode tiek balstīta uz empīriskiem novērojumiem, taču šajā gadījumā laboratorijas apstākļos veiktie novērojumi var tikt pielāgoti atšķirīgiem vides faktoriem kā gaisa vai ūdens temperatūra, plūsmas ātrums, ieplūstošā piesārņojošo vielu koncentrācija, skābekļa daudzums ūdenī utt.

Šajā darbā sagatavotā mākslīgo mitrāju aprēķina metodika ietver abas iepriekš minētās pieejas mitrāju konstrukcijas un dimensiju aprēķiniem atkarībā no notekūdeņu veida, piedāvājot to, kas Latvijas apstākļiem konkrētajā gadījumā būtu vispiemērotākā.

Mākslīgo mitrāju piesārņojuma samazināšanas vēlamā apjomu ūdenī var izmantot, lai aprēķinātu nepieciešamo mitrāja virsmas platību:

$$J = k \cdot (C_{in} - C_{out}), \quad (2.6.)$$

kur

J – piesārņojošās vielas samazināšanas intensitāte, g uz katru m² gadā;

k – konstante, kas raksturo piesārņojuma samazināšanās intensitāti atkarībā no mitrāja virsmas platības, m gadā;

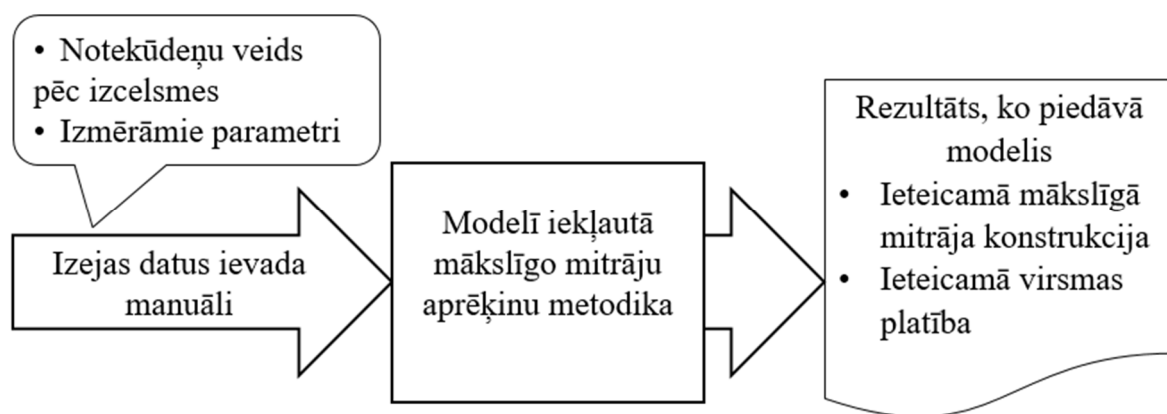
C_{in} – piesārņotāja koncentrācija pie ieplūdes, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$;

C_{out} – piesārņotāja koncentrācija pie izplūdes, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Kusler & Christie, 2012).

Balstoties uz šī pētījuma rezultātā iegūtajiem datiem pilotobjektos un uz citās valstīs plaši izmantotajiem aprēķiniem, sagatavots modelis mākslīgā mitrāja veida un dimensiju izvēlei.

Modelis pieejams tiešsaistē <https://lauvas.area.lv/MM/>. Modelī paredzēts ievadīt jebkuram konkrētam, lietotāja izvēlētam objektam atbilstošus izejas parametrus ar mērķi gūt ieteikumu par piemērotāko mitrāja konstrukcijas izvēli un provizorisku mitrāja virsmas laukumu. Aprēķinu daļa modeļa lietotājam nav pieejama, taču tā izklāstīta šajā darbā. Modelis nav paredzēts detalizētai būvniecības ieceres dokumentācijas iegūšanai, jo projektēšanas laikā jāapsver lokālas objekta iespējas un ierobežojumi.

Shematiskajā 2.13. attēlā parādīta secīga aprēķinu modeļa vispārējā struktūra. Tukšas modeļa ailītes parādītas 2.5. nodaļā. Vispirms modeļa lietotājam manuāli jāievada izejas dati, kas nepieciešami tālākajos aprēķinos, tai skaitā attīrāmo notekūdeņu veids pēc izcelsmes, kas modeļa vidē noved tālāk pie izmērāmo parametru ailītēm. Šāda klasifikācija ļauj strukturēt turpmāko lēmumu pieņemšanu atbilstošo mākslīgo mitrāju efektivitātes iespējām. Izmērāmie parametri diferencēti atbilstoši tipisku notekūdeņu kritērijiem.



2.13. att. Mākslīgo mitrāju aprēķina modeļa struktūra

Nākamajā solī aprēķinu precizitātei un pamatotībai lietotājam jāievada prasīto parametru izmērāmās vērtības, tai skaitā, atsevišķu ūdeņu kvalitātes parametru koncentrācijas, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ un izejas dati, kas modelim ļauj aprēķināt caurplūdumu, $\text{m}\cdot\text{dnn}^{-1}$. Modelī ieļautajiem mākslīgo mitrāju aprēķiniem izmantotas formulas no citu valstu likumdošanā iestrādātiem un starptautiski atzītās vadlīnijās iekļautiem aprēķiniem, ievērtējot šajā pētījumā iegūtos novērojumu datus, kā arī Latvijas klimatiskos un saimniekošanas faktorus. Kā praktiski pielietojamu rezultātu modelis piedāvā ieteicamo mākslīgā mitrāja konstrukciju un attiecīgi aprēķinātu mitrāja ieteicamo virsmas platību, m^2 .

Šajā darbā mākslīgais mitrājs ir aplūkots kā notekūdeņu attīrīšanas iekārta, kas projektēta ar mērķi uzlabot ūdens kvalitāti. Kā pierāda Latvijā uzbūvētie, ekspluatētie un iepriekšējās nodaļās aprakstītie pētījuma objekti, mitrāja efektivitāte var atšķirties atkarībā no attīrāmā ūdens apjoma, kvalitātes un plūsmas režīma. Minētie ieplūstošā notekūdens parametri kā mitrāja efektivitāti ietekmējošie faktori pieminēti arī citu valstu pētījumos (Crumpton & Stenback, 2020), kā arī iekļauti aprēķinos. Ieplūstošā jeb attīrāmā notekūdens parametrus izmanto kā izejas datus mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlei, lai pielāgotu efektīvāko un piemērotāko tehnisko risinājumu. Mākslīgā mitrāja dimensijas un konstruktīvais risinājums jāpielāgo attīrāmā notekūdens parametriem, kā arī ūdens vēlamajai kvalitātei pēc attīrīšanas.

Attīrāmā ūdens izcelsmes avots vairumā gadījumu norāda uz sagaidāmo ūdens apjomu, kvalitāti un plūsmas režīmu. Tāpēc modelis mākslīgā mitrāja veida un dimensiju izvēlei kā

pirmo izvēles opciju piedāvā atlasīt attīrāmā ūdens izcelsmes avotu. Piedāvātas 5 izvēles iespējas: lietus notekūdeņi, sadzīves notekūdeņi, rūpniecības notekūdeņi, lauksaimniecības notece, cits variants. Katra no minētajām iespējām izvēlēta, pieņemot, ka notekūdeņu izcelsmes avots ūdens apjoma, kvalitātes un plūsmas režīma ziņā būs definējams kā tipisks notekūdens. Gadījumiem, kad kāds no trim minētajiem kritērijiem pārsniedz vai neatbilst tipisku notekūdeņu raksturojumam, modelī iekļauta piektā izvēle “Cits variants”.

Minētā izvēle ļaus jau pirmajā solī atlasīt to attīrāmo ūdeņu parametrus, kas katram no notekūdeņu veidiem ir būtiskākais, attīrot tos mākslīgajā mitrājā. Nav izslēgts, ka katrā individuālā gadījumā attīrāmā notekūdens parametri var būt atšķirīgi, tāpēc precīzāki dati tiek pēc vajadzības pieprasīti nākamajos modeļa soļos, kas aprakstīti nākamajās apakšnodalās. Literatūrā pieejamie pētījumi galvenokārt vērsti pa vienam uz atsevišķiem šajā modelī iekļautajiem notekūdeņu veidiem. Tāpēc katra no piecām izvēlēm modelī aizved pie atšķirīga mākslīgo mitrāju dimensionēšanas scenārija. Atkarībā no katra notekūdeņu veida specifikas, Latvijā spēkā esošo normatīvo aktu prasībām un šajā promocijas darbā gūtajiem pētījumu rezultātiem pētījumu objektos, katrs no pieciem modeļa scenārijiem ietver aprēķinus, kas pielāgoti no citu valstu pieredzes mākslīgo mitrāju projektēšanā un dimensionēšanā. Modelis galarezultātā piedāvā provizorisku ienākošajiem notekūdeņiem piemērotāko mākslīgā mitrāja konstrukciju un virsmas laukumu. Šis modelis veidots kā palīgs mākslīgā mitrāja skices iegūšanai, un bez atbilstošas būvprojekta dokumentācijas sertificēta inženiera vadībā nav paredzēts kā pamatojums būvniecībai. Modelis ļauj pieņemt turpmākos lēmumus saistībā ar objektā pieejamo platību, kā arī iespējamām būvniecības un ekspluatācijas izmaksu pozīcijām. Lai padarītu modeļa izmantošanu maksimāli vienkāršu un pieejamu jebkuram interesentam, sākotnējās izvēles ir samazinātas līdz minimālajam nepieciešamajam skaitam, kas tai pašā laikā atstāj vietu projektētāja interpretācijai, detalizēti strādājot pie katra konkrēta mākslīgā mitrāja.

Pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju dimensiju aprēķins

Mākslīgos mitrājus vairumā gadījumu projektē, izvēloties minimālo pieļaujamo virsmas laukuma platību un zemākās iespējamās būvniecības un ekspluatācijas izmaksas. Tai pašā laikā nav vēlams samazināt platību, riskējot zaudēt mitrāja darbības efektivitāti attiecībā uz piesārņojuma samazināšanu. Horizontālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja garuma platuma attiecību, izvēloties taisnstūra formu, iesaka 3 – 4:1 (Sim, 2003). Tomēr atkarībā no filtra materiāla un šķērsriezuma laukuma, jāpārlicinās par mitrāja caurvades spēju, lai tā nebūtu mazāka par iespējamo ienākošo notekūdeņu caurplūdumu. Filtrācijas koeficients noteiks notekūdeņu plūsmas ātrumu cauri filtra materiālam. Nepieciešamo šķērsriezuma laukumu rēķina pēc Darsī likuma, pēc nepieciešamības matemātiski izsakot filtra šķērsriezuma laukumu:

$$Q_{dn} = \frac{K \cdot dH \cdot F}{L}, \quad (2.7.)$$

kur

Q_{dn} – notekūdeņu vidējais diennakts caurplūdums, $m^3 \text{ dnn}^{-1}$;

K – mākslīgā mitrāja filtra materiāla filtrācijas koeficients, $m \text{ dnn}^{-1}$;

dH – ūdens līmeņu starpība ieplūdei pret izplūdi, m;

L – filtrācijas ceļa garums, m;

F – mākslīgā mitrāja filtra šķērsriezuma laukums, m^2 .

Mitrāja nepieciešamo virsmas platību rēķina, vadoties no ienākošo un vēlamu izejošo ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijām. Tā kā pazemes plūsmas mākslīgos mitrājus visbiežāk izmanto tieši sadzīves notekūdeņu vai citu organiskās vielas saturošu notekūdeņu attīrīšanai, tad mitrāja virsmas laukumu var aprēķināt pēc BSP_5 koncentrāciju vēlamā samazinājuma (Sim, 2003; General considerations, 1995) pēc sekojošas formulas:

$$A_h = K \cdot Q_{dn} \cdot (\ln C_{in} - \ln C_{out}), \quad (2.8.)$$

kur

A_h – pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja virsmas laukums, m²;

K – ātruma konstante, m·dnn⁻¹;

Q_{dn} – notekūdeņu vidējais diennakts caurplūdums, m³·dnn⁻¹;

C_{in} – BSP₅ diennakts vidējā koncentrācija pie ieplūdes, mg·l⁻¹;

C_{out} – vēlamā BSP₅ diennakts vidējā koncentrācija pie izplūdes, mg·l⁻¹.

Ātruma konstante ir BSP degradācijas ātrums, kas atkarīgs no vides temperatūras, ūdens dziļuma un filtra materiāla porozitātes. Latvijas apstākļiem var pieņemt pie vides temperatūras 10 – 20 °C, ka horizontālas pazemes plūsmas mitrājiem ar ātruma konstantei pieņem robežās no 0.09 līdz 0.15, bet vertikālas pazemes plūsmas mākslīgajiem mitrājiem robežās 0.13 – 0.22 (Brown et. al., 2000). Jo augstāka vides temperatūra, jo augstāku vērtību izvēlas kā konstanti.

Virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju dimensiju aprēķins

Virszemes plūsmas mākslīgos mitrājus izmanto galvenokārt drenu vai virszemes noteču attīrīšanai no lauksaimniecības zemēm vai lietus ūdeņu attīrīšanai, un vispirms jāapsver vietēja rakstura faktori, kas raksturīgi katram konkrētajam objektam, tai skaitā topogrāfiskā situācija un notekūdeņu raksturojošie parametri. Mitrāja galvenās dimensijas ir:

- forma, ko izvēlas ar mērķi iegūt iespējami garāku notekūdeņu plūsmas ceļu jeb trajektoriju;
- ūdens slāņa dziļums, ko izvēlas, vadoties no ienākošo ūdeņu kvalitāti raksturojošajiem parametriem, un atbilstoši plānotajiem bakterioloģiskajiem procesiem mitrājā;
- hidrauliskais uzturēšanās laiks mitrājā, ko izvēlas robežās no 1 līdz 5 dienām (EPA, 1982), ja vēlas panākt efektīvu BSP₅ un SV aizturēšanu, bet 10 – 15 dienas, ja vēlas panākt pilnvērtīgu nitrifikācijas – denitrifikācijas procesu norisi, kā arī efektīvai ortofosfātu fosfora aizturēšanai (EPA, 1982);
- veģetācijas veidu un vēlamu izplatību;
- spoguļa virsmas laukumu, kuram literatūrā atrodami vairāki dimensionēšanas paņēmieni.

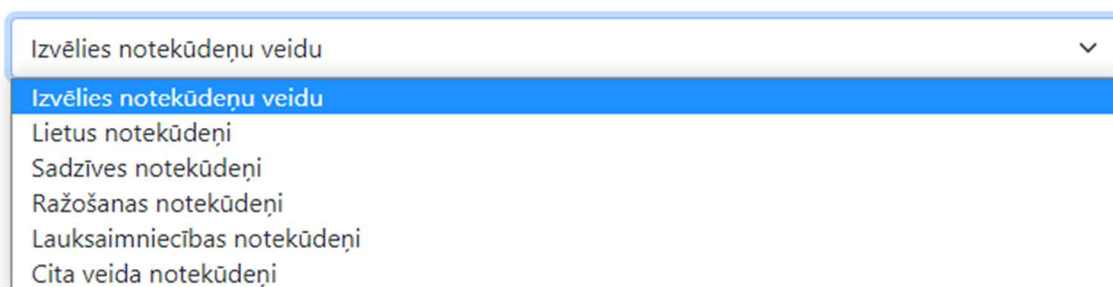
Lauksaimniecībā izmantojamo platību, galvenokārt drenētu aramzemju, ganību un zālāju noteces attīrīšanai iesaka pieņemt mitrāja spoguļa virsmas platību atkarībā no sateces baseina platības, rēķinot attiecību 0.5 – 2%. Otra pieeja virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja spoguļa virsmas aprēķinam ir balstīta uz ūdens uzturēšanās laiku mitrājā. Ūdens bilanci aprēķina atbilstoši raksturīgajiem objekta parametriem, ņemot vērā tiešu notekūdeņu ieplūdi, infiltrāciju, iztvaikošanu, nokrišņus, uzkrāto ūdens daudzumu un izplūdes parametrus (EPA, 1982).

Pirmais modeļa solis ir attīrāmo notekūdeņu veida izvēle, no kā atkarīgi izejas parametri, kas nepieciešami, lai uzsāktu piemērotākās mitrāja konstrukcijas izvēli un turpinātu ar mākslīgā mitrāja dimensionēšanu. Sākotnēji jānoskaidro, kāda veida notekūdeņus paredzēts attīrīt. Piedāvātas piecas izvēles, kas šajā gadījumā vērstas uz konkrētu notekūdeņu veidu, atbilstoši to specifikai tipiskos apstākļos. Pirmā izvēle “Lietus notekūdeņi” jāizvēlas, ja virszemes notece no cietā vai daļēji caurlaidīgā seguma tiek savākta un novadīta ar lietus kanalizācijas palīdzību, vai tiek novadīta virszemes noteces veidā. Otrā izvēle “Sadzīves notekūdeņi” tiek atzīmēta, ja paredzēts attīrīt tipiskus sadzīves notekūdeņus no dzīvojamām vai sabiedriskām ēkām, kurās patērētāji uzturas pastāvīgi vai periodiski. Brīvdienu mājām, vai citām ēkām, kur cilvēku uzturēšanās paredzēta izteikti periodiski, modelī jānorāda tā perioda parametri, kad būs maksimālais patērētāju skaits. Modeļa trešā izvēle “Ražošanas notekūdeņi” vērsta uz notekūdeņiem no konkrēta objekta, kuriem iespējams izmērīt un modeļa nākamajā solī norādīt galveno ūdens kvalitātes rādītāju vidējās koncentrācijas un ūdens apjomu laika vienībā. Lauksaimniecības radītais notekūdens pēc savas specifikas var nosacīti tikt iedalīts divās daļās. Ja nepieciešams attīrīt virszemes vai drenu noteci no aramzemēm, tad tiek piedāvāts viena veida

aprēķins. Taču modelī ietverts arī otrs variants, kad virszemes notece, līdzīgi kā lietus notekūdeņu gadījumā, savācas no cietajiem un daļēji ūdenscaurlaidīgajiem segumiem, kas lauksaimniecībā izmantoto platību gadījumā ir, piemēram, zemnieku saimniecību pagalmu teritorijas, tehnikas stāvlaukumi. Var gadīties, ka objektā ir apvienoti vairāku veidu notekūdeņi. Tādā gadījumā jāizvēlas piektais modelī piedāvātais “Cits variants”. Piekta variantā izvēle paredz mākslīgā mitrāja aprēķinu balstīt uz iepriekš noteiktu, izmērītu vai aprēķinātu notekūdeņu apjomu laika vienībā, kā arī galveno ūdens kvalitātes rādītāju vidējām koncentrācijām. Ja notekūdeņu pieplūdes režīms ir izteikti mainīgs, tad šajā pirmajā solī jāapsver modeļa pirmās vai ceturtās izvēles piemērošana.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

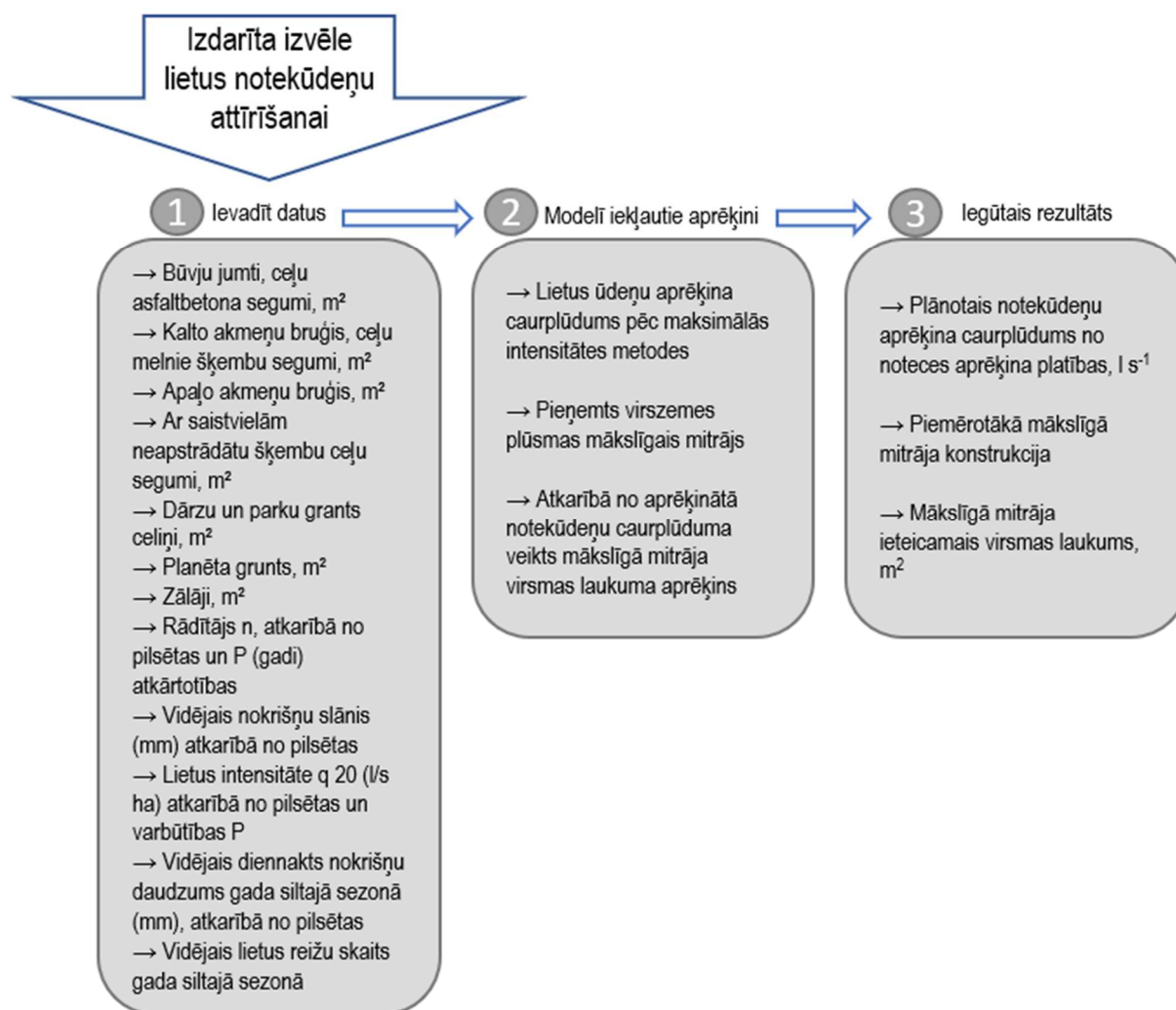


2.14. att. Modeļa sākuma skats, notekūdeņu veida izvēle

2.4.1. Lietus notekūdeņi

Lietus notekūdeņi ir nokrišņu daļa, kas neinfiltlējas gruntī un neiztvaiko, bet notek no virsmām. Ar lietus notekūdeni biežāk saprot virszemes noteci, kas veidojas no cietajiem virsmas segumiem apdzīvotās vietās. Latvijas būvnormatīvā definēts, ka lietus kanalizācijas sistēmā jānodrošina ne mazāk kā 70% vispiesārņotāko virszemes noteces ūdeņu gada apjoma attīrīšana no dzīvojamajiem rajoniem, kā arī no rūpniecības rajoniem, kas rada piesārņotības ziņā līdzvērtīgus lietus notekūdeņus. Ja rūpniecības uzņēmuma teritorija ir piesārņota ar toksiskām vielām vai ievērojamu organisko vielu daudzumu, jāattīra visa virszemes notece (LBN 223-15, 2015). Lietus notekūdens no pilsētvides galvenokārt satur suspendētās vielas, nesadegušos naftas produktus un eļļas, kā arī var saturēt cietos atkritumus no ielām. Plānojot lietus notekūdeņu attīrīšanu pilsētvidē, tradicionāli Latvijā projektētas cauruļvadu sistēmas, kas novada lietus notekūdeņus pēc iespējas ātrāk prom no teritorijas. Ar ilgtspējīgu pieeju lietus notekūdeņu apsaimniekošanā pilsētās (*Sustainable urban drainage system*) tiek ieviesti arvien vairāk mūsdienīgu risinājumu, kas ļauj nokrišņu radīto ūdens daudzumu uzkrāt, infiltrēt, attīrīt un apsaimniekot nelielos sateces baseinos, tādējādi samazinot apsaimniekojamā ūdens apjomu un akumulēto piesārņojuma daudzumu. Plānojot lietus notekūdeņu attīrīšanu mākslīgajos mitrājos, no ūdens kvalitātes rādītāju viedokļa jāpievērš uzmanība salīdzinoši zēmajam organisko vielu daudzumam, nelielai biogēno elementu koncentrācijai, palielinātam suspendēto vielu daudzumam. Lietus notekūdeņu pieplūdes režīms ir izteikti neregulārs, paredzami ilgstoši sausuma periodi, kad nokrišņu nav, taču paredzami arī nokrišņu periodi ar spēcīgām, iespējami ilgstošām lietusegāzēm un potenciāli lielu ūdens apjomu īsā laika periodā. Minētie parametri jāņem vērā, izvēloties mākslīgā mitrāja konstrukciju.

Uzsākot lietus ūdeņu apsaimniekošanas projektēšanu, vispirms jānoskaidro lietusegāzē apjoms. Mākslīgo mitrāju aprēķinu modelī notekūdeņu apjoms balstīts uz LR būvnormatīvā (LBN 223-15, 2015) pieejamo aprēķina formulu 2.9., kas ievērtē sateces baseina platību, virsmas segumu veidu un reģionu, kurā atrodas objekts. Formulā nepieciešamos parametrus modelis prasa ievadīt manuāli atbilstoši 2.15. un 2.16. attēlam.



2.15. att. **Modeļa shēma lietus notekūdeņiem**

Lietus ūdeņu aprēķina daudzumu rēķina pēc maksimālās intensitātes metodes atbilstoši LBN 223-15 (2015):

$$q_r = \frac{z_{mid} \cdot A^{1.2} \cdot F}{t_r^{1.2n-0.1}}, \quad (2.9.)$$

kur

z_{mid} – vidējais noteces baseina virsmu raksturojošais koeficients;

n – parametrs, kas atkarīgs no P (gadi) atkārtotības un objekta ģeogrāfiskā novietojuma.

Atbilstoši normatīvam, jāizvēlas objektam tuvākā pilsēta;

F – noteces aprēķina platība objektā, ha;

t_r – lietus ūdeņu tecēšanas aprēķina ilgums (minūtes), kas atkarīgs no ūdeņu tecēšanas laika pa virsmas segumiem un aprēķina posmiem objektā;

A – parametrs, kas atkarīgs no lietus intensitātes un vienreizējas lietus aprēķina intensitātes pārsniegšanas perioda konkrētajā apvidū. Parametru A rēķina pēc LBN 223-15 (2015) piedāvātās formulas:

$$A = q_{20} \cdot 20^n \cdot \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r}\right)^{1.54}, \quad (2.10.)$$

kur

q_{20} – lietus intensitāte (l s⁻¹ ha) atbilstoši objekta ģeogrāfiskajam novietojumam, ja lietus ilgums ir 20 minūtes;

n – kāpinātājs, ko nosaka atbilstoši objekta ģeogrāfiskajam novietojumam;
 P – vienreizējās lietus aprēķina intensitātes pārsniegšanas periods, ko pieņem atbilstoši objekta ģeogrāfiskajam novietojumam;
 m_r - vidējais lietus reižu skaits gada siltajā sezonā.

Aprēķina modelī, kad izdarīta izvēle par lietus notekūdeņiem kā attīrāmo notekūdeņu veidu (2.15. un 2.16. attēls), tiek prasīts ievadīt izejas datus, kas nepieciešami lietus ūdeņu aprēķina daudzumam pēc formulām 2.9. un 2.10., atbilstoši spēkā esošajam būvnormatīvam (LBN 223-15, 2015).

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Lietus notekūdeņi	
Būvju jumti, ceļu asfaltbetona segumi, m ²	Attālums no tālākās gūlijas līdz maģistrālei, m
Kalto akmeņu bruģis, ceļu melnie šķembu segumi, m ²	Tuvākā apdzīvotā vieta
Apaļo akmeņu bruģis, m ²	Izvēlies pilsētu
Ar saistvielām neapstrādātu šķembu ceļu segumi, m ²	Rādītājs n , atkarībā no pilsētas un P (gadi) atkārtotības
Dārzu un parku grants celiņi, m ²	Vidējais nokrišņu slānis (mm) atkarībā no pilsētas
Planēta grunts (dobes, puķudobes), m ²	Lietus intensitāte q 20 (l/s ha) atkarībā no pilsētas un varbūtības P
Zālāji, m ²	Vidējais diennakts nokrišņu daudzums gada siltajā sezonā (mm), atkarībā no pilsētas

Aprēķināt

2.16. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma lietus notekūdeņiem

Aprēķinam nepieciešamie parametri un koeficienti atrodami minētā normatīva pielikumos, un tie jāizvēlas atbilstoši konkrētam objektam, tos nav iespējams vispārināt uz vienu paraugobjektu. Aprēķina modelī pieņemts attīrīt tipiskus lietus ūdeņus no apdzīvotas teritorijas. Tādējādi piedāvāts izvēlēties virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju kā piemērotāko

konstrukciju, un virsmas platība rēķināma balstoties uz hidrauliskās slodzes ātrumu un ūdens plūsmas ātrumu, kur mākslīgais mitrājs darbosies galvenokārt suspendēto vielu un eļļas un naftas produktu aizturēšanai. Kā galvenais parametrs šeit uzskatāms ūdens uzturēšanās laiks mitrājā, ko pieņem 4 stundas. Mitrāja spoguļa virsmas platība aprēķināma pēc iegūtā lietuss ūdeņu aprēķina daudzuma, ūdens uzturēšanās laika un ieteicamā ūdens slāņa dziļuma, t.i., 0.5 m. Ja objekta sateces baseina platība pārsniedz 3 ha, tad ieteicams apsvērt citas vai kombinētas mākslīgo mitrāju konstrukcijas.

2.4.2. Sadzīves notekūdeņi

Sadzīves notekūdeņi veidojas cilvēka saimnieciskās darbības rezultātā, ūdenim piejaucoties organiskajām vielām, cilvēka fizioloģiskajiem izdalījumiem, mazgāšanas līdzekļiem u.c. Tipisku sadzīves notekūdeņu sastāvs noteikts normatīvajos dokumentos, LR MK noteikumos Nr. 34 (2002), kur BSP₅ koncentrācija norādīta 150 – 350 mg·l⁻¹, ŪSP robežās no 210 – 740 mg·l⁻¹, kopējās suspendētās vielas 120 – 450 mg·l⁻¹, un kopējais fosfors 6 – 23 mg·l⁻¹, kopējais slāpeklis 20 – 80 mg·l⁻¹ robežās. Latvijā sadzīves notekūdeņu attīrīšanas sistēmas tiek projektētas, būvētas un apsaimniekotas atbilstoši spēkā esošajiem normatīvajiem aktiem (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002; LR MK noteikumi Nr. 327, 2015). Sadzīves notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģijas ieteikts izvēlēties, vadoties pēc sasniedzamās attīrītā ūdens kvalitātes rādītājiem, nelieliem objektiem ar patērētāju skaitu zem 2000 CE nosakot robežvērtības BSP₅, ŪSP un SV. Specifiska attīrīšanas metode netiek reglamentēta, taču mākslīgais mitrājs atbilst LR MK noteikumu 37. punktam (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002) par atbilstošu attīrīšanu, jo nodrošina atbilstošu ūdens kvalitāti attīrīto notekūdeņu ievadīšanai vaļējā ūdenskrātuvē vai infiltrēt gruntī. Pie atbilstoša risinājuma, mākslīgais mitrājs izpilda pirmējās attīrīšanas kritērijus, jo novadīto notekūdeņu BSP₅ tiek samazināts vismaz par 20% attiecībā pret ienākošo slodzi un SV daudzums tiek samazināt par vismaz 50%, kā arī var tikt projektēts kā otrējā attīrīšana, jo pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā notekūdeņi tiek attīrīti galvenokārt balstoties uz bioloģiskiem procesiem.

Sadzīves notekūdeņu pieplūdes režīms ir samērā regulārs, un apjoms prognozējams, kas kopumā atvieglo notekūdeņu attīrīšanas iekārtu projektēšanu. Izvēloties mākslīgos mitrājus kā sadzīves notekūdeņu attīrīšanas iekārtu, izvēlas konstrukciju, kas neveicina smaku izplatīšanos, nodrošina stabilu notekūdeņu attīrīšanas efektivitāti visā ekspluatācijas laikā, arī ziemas periodā. Jāņem vērā un jānovērš grunts piesārņošanas risks, mākslīgā mitrāja pamatni projektējot hermētisku.

Sadzīves notekūdeņu apjomu rēķina atbilstoši spēkā esošajam normatīvam LBN 222-15 (2015) pēc dzeramā ūdens patēriņa atkarībā no patērētāju skaita:

$$Q_{dn} = \frac{S_q \cdot N}{1000}, \quad (2.11.)$$

kur

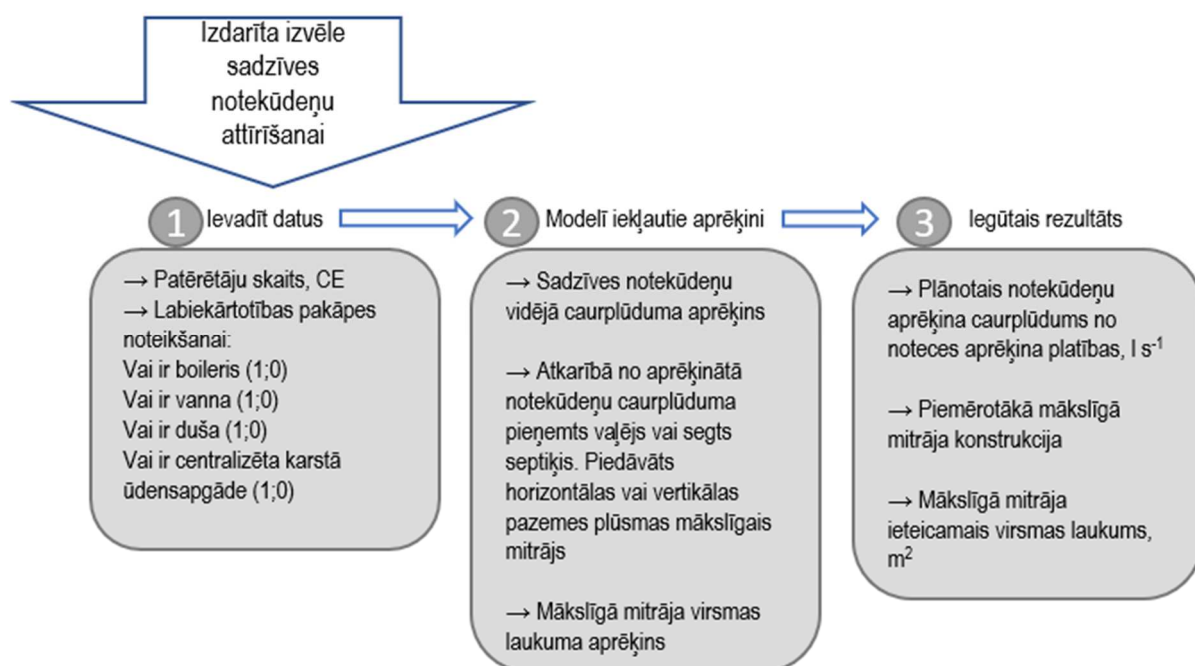
S_q – ūdens patēriņa norma uz vienu iedzīvotāju, ko pieņem atkarībā no ūdens izdales ierīču parametriem un labiekārtotības pakāpes objektā, l·dnn⁻¹;

N – patērētāju skaits objektā.

Sadzīves notekūdeņus pirms attīrīšanas mākslīgajā mitrājā paredz nostādināt 3 diennaktis. Nostādināšani paredz segtu septiķi vai vaļēju nostādināšanas dīķi bez savienojuma ar gruntsūdeņiem. Nostādināšanai paredzēto tilpumu rēķina pēc vidējā ūdens patēriņa uz objektā esošo iedzīvotāju skaitu.

Sadzīves notekūdeņu attīrīšanai mākslīgajos mitrājos šī darba ietvaros sagatavotajā aprēķinu modelī (2.18. attēls) tiek piedāvāta pazemes plūsmas konstrukcija, ļaujot izdarīt izvēli starp vertikālu vai horizontālu plūsmas virzienu filtrā. Mākslīgā mitrāja virsmas platība tiek

rēķināta pēc BSP₅ koncentrāciju vēlamā samazinājuma formulas 2.11. Par ieplūstošo BSP₅ koncentrāciju tiek pieņemta tipiskiem sadzīves notekūdeņiem raksturīgā, spēkā esošā normatīvā definētā, un par vēlamā izplūdes koncentrāciju tiek pieņemta spēkā esošā LR MK noteikumos Nr. 34 reglamentētā BSP₅ koncentrācija.



2.17. att. **Modeļa shēma sadzīves notekūdeņiem**

2.18. attēlā parādīta neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma sadzīves notekūdeņiem. Aprēķinā iekļauts notekūdeņu apjoma aprēķins atbilstoši būvnormatīvam, kas atkarīgs no iedzīvotāju skaita un ēkas labiekārtotības pakāpes. Sadzīves notekūdeņu kvalitāte pieņemta atbilstoši normatīvā definētajiem tipiskiem sadzīves notekūdeņiem.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Sadzīves notekūdeņi ▼

iedzīvotāju skaits, skaits

☐ vanna ir?

☒ duša ir?

☒ centralizētā karstā ūdens apgāde ir?

☐ boileris ir?

Aprēķināt

2.18. att. **Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma sadzīves notekūdeņiem**

Horizontālas pazemes plūsmas mitrāja aprēķinā izmantots koeficients 0.14, kas atbilst gaisa temperatūrai 10 °C, bet vertikālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja aprēķinam izmantots koeficients 0.30, kas atbilst gaisa temperatūrai 10 °C. Tā kā gaisa temperatūra ir atšķirīga pa sezonām, tad pieņemta vidējā gaisa temperatūra. Ja patērētāju skaits pārsniedz 100 CE, tad aprēķinu modelis piedāvā apsvērt kombinētas mākslīgo mitrāju konstrukcijas, kombinēt attīrīšanas metodi mākslīgajos mitrājos ar citām notekūdeņu attīrīšanas metodēm vai izvēlēties citas ūdens kvalitātes uzlabošanas metodes. Ja plānots notekūdeņus attīrīt kombinēti, pamatā izmantojot cita veida attīrīšanas iekārtas, bet mākslīgo mitrāju projektēt kā pēcattīrīšanas iekārtu vai iespējamu avārijas pārplūžu uztvertā ūdens attīrīšanas iekārtu, tad par aprēķina izejas datiem izmanto sagaidāmos mākslīgajā mitrājā ieplūstošā ūdens kvalitātes rādītājus.

2.4.3. Ražošanas notekūdeņi

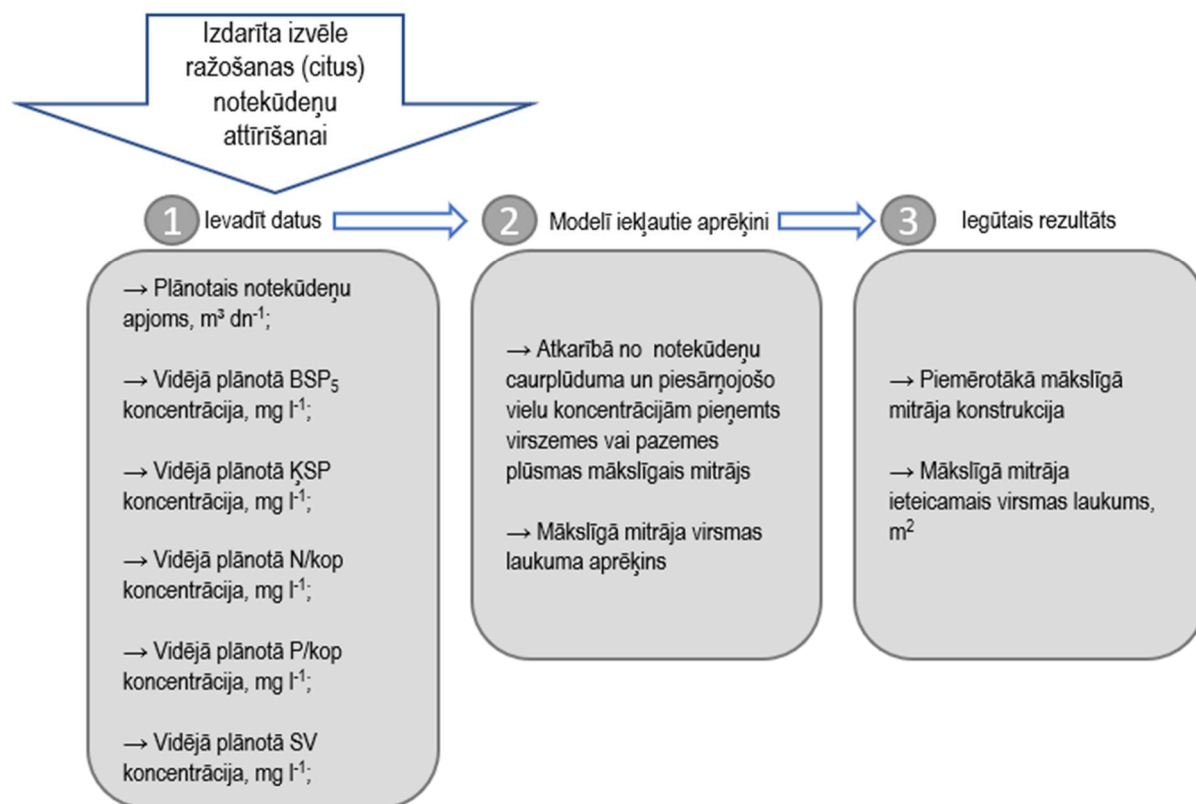
Ražošanas notekūdeņus rada ražošanas uzņēmumi savā tehnoloģiskajā procesā, kurā iesaistīts ūdens. Atkarībā no izejvielu un galaproduktu specifikas, dažādas atkritumvielas var tikt izšķīdinātas vai piejauktas ūdenim, kurš pēc viena vai vairākiem izmantošanas cikliem vairs neatbilst vēlamajiem ūdens kvalitātes kritērijiem, un to ir nepieciešams attīrīt. Atšķirīgās ražošanas jomās notekūdeņi var kvalitatīvi un kvantitatīvi atšķirties. Izvērtējot ražošanas notekūdeņus pēc piejaukto vielu satura un apjoma, atbilstoši Latvijā spēkā esošajiem normatīvajiem dokumentiem, (LBN) tos attīra vai nu kopā ar sadzīves notekūdeņiem, izmantojot bioloģiskas metodes, vai paredz papildu attīrīšanas metodes, ja BSP₅, KSP, suspendēto vielu koncentrācijas pārsniedz tipiskos sadzīves notekūdeņos (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002) novērotās koncentrācijas vai ja ražošanas notekūdeņos sastopamas kādas sadzīves notekūdeņiem netipiskas vielas. Ražošanas notekūdeņu pieplūduma režīms var būt atkarīgs no tādiem faktoriem kā maiņu garumi un sadalījums rūpnīcā, ražošanas cikls, saražotās produkcijas apjoms utt.

Ražošanas notekūdeņu attīrīšanai var projektēt mākslīgos mitrājus, ja notekūdeņi atbilst ar bioloģiskām un mehāniskām metodēm attīrāmu notekūdeņu kvalitātei (Nurmahomed et.al., 2022). Šādā gadījumā aprēķini balstāmi uz attīrāmo ražošanas notekūdeņu sākotnējās piesārņojošo vielu koncentrācijas un uz vēlamās piesārņojošo vielu koncentrācijas pēc notekūdeņu attīrīšanas, kā arī uz notekūdeņu apjoma un pieplūdes režīma. Līdzīgi kā projektējos sadzīves notekūdeņu attīrīšanu, jāņem vērā un jānovērš grunts piesārņošanas risks, nepieciešamības gadījumā mākslīgā mitrāja pamatni projektējot hermētisku.

Ražošanas notekūdeņus, ja tie pēc BSP₅, KSP un SV koncentrācijām līdzinās tipiskiem sadzīves notekūdeņiem, pirms attīrīšanas mākslīgajā mitrājā paredz nostādināt 3 diennaktis. Nostādināšanu paredz segtu septiķi vai vaļēju nostādināšanas dīķi bez savienojuma ar gruntsūdeņiem. Nostādināšanai paredzēto tilpumu rēķina pēc vidējā ražošanas notekūdeņu apjoma objektā. Notekūdeņu apjomu rēķina atbilstoši ražošanas tehnoloģijai vai pēc spēkā esošā Latvijas būvnormatīva.

Aprēķinu modelī (2.19. un 2.20. attēls) jāievada dati par plānoto notekūdeņu apjomu, kā arī plānotās vidējās ūdeņu kvalitātes parametru koncentrācijas. Ja ražošanas notekūdeņi satur citas piesārņojošās vielas, kas modelī nav pieminētas, jāapsver citas tehnoloģijas izvēle notekūdeņu attīrīšanai vai notekūdeņu priekšapstrāde. Otrajā solī modelī iekļauts pazemes plūsmas mitrāja aprēķins atkarībā no ienākošās un izejošās ūdeņu kvalitātes parametru koncentrācijas pēc formulas 2.8., attiecīgi ar horizontālas pazemes plūsmas mitrāja koeficientu 0.14, un vertikālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja koeficientu 0.30. Ja ievadītās ienākošās BSP₅ un KSP koncentrācijas ir attiecīgi zem 35 un 125 mg·l⁻¹, tad var uzskatīt, ka attīrāmais ūdens pēc sastāva līdzinās lietus notekūdeņiem vai drenu notecei, un modelis piedāvā izvēlēties virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju. Šajā gadījumā mitrāja virsmas platība tiek rēķināta pēc kopējā slāpekļa ieplūstošās un izejošās koncentrācijas, kā arī pēc notekūdeņu apjoma mitrāja

tilpumu rēķinot uz 4 stundu uzturēšanās laiku. Modelis kā gala virsmas platību piedāvā lielāko aprēķināto variantu. Ja paredzamais notekūdeņu apjoms pārsniedz $20 \text{ m}^3 \cdot \text{dnn}^{-1}$, tad aprēķinu modelis piedāvā apsvērt citas vai kombinētas mākslīgo mitrāju konstrukcijas.



2.19. att. Modeļa shēma ražošanas un citiem notekūdeņiem

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Ražošanas notekūdeņi ▼

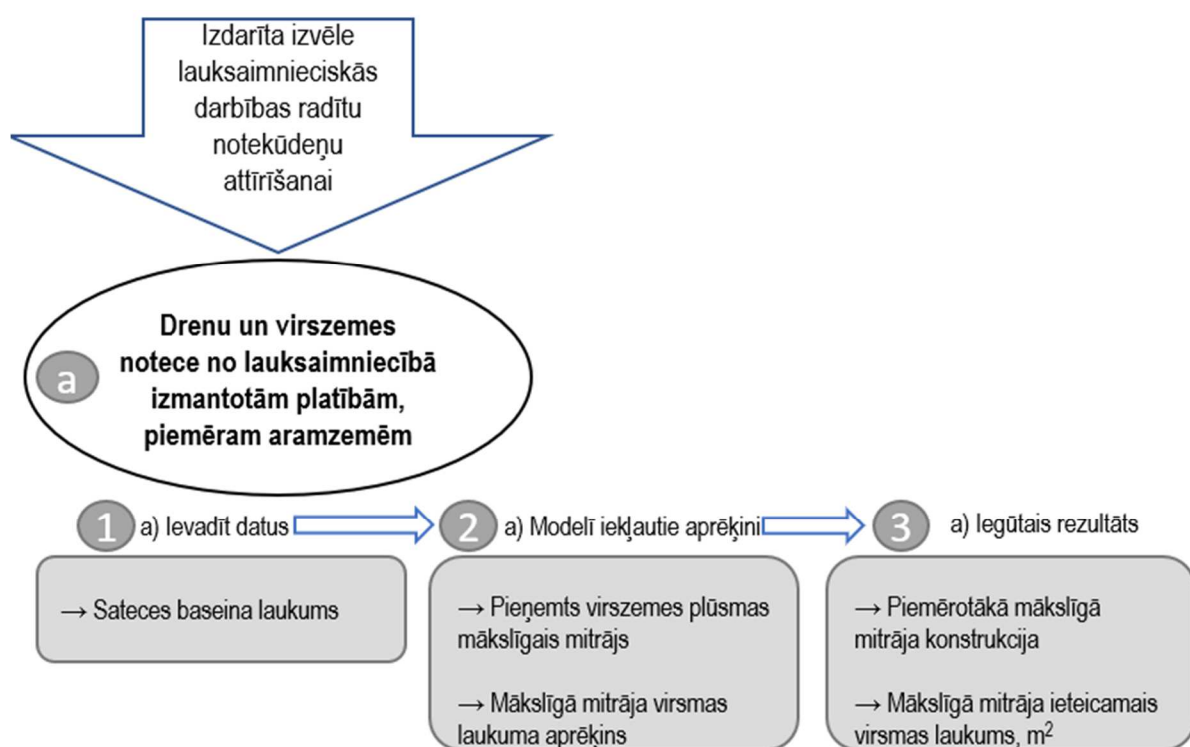
Jāievada notekūdeņu apjoms, m^3/dnn	Jāievada N_{kop} , mg/l
Jāievada BSP , mg/l	Jāievada P_{kop} , mg/l
Jāievada QSP , mg/l	Jāievada TSS , mg/l

Aprēķināt

2.20. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma ražošanas notekūdeņiem

2.4.4. Notekūdeņi no lauksaimnieciskās darbības

Notekūdeņus no lauksaimnieciskās darbības veido virszemes un drenu notece no lauksaimniecībā izmantotajām platībām. Ministru kabineta noteikumos Nr. 329 tiek definēti kā notece jeb ūdens aprites dabā sauszemes posms, kurš notiek pa zemes virsmu (virszemes notece), augsni un iežu slāņiem (pazemes notece). Šajā pētījumā piedāvātas divas atšķirīgas pieejas lauksaimnieciskās darbības radītu notekūdeņu attīrīšanai mitrājos. Drenu un virszemes notecei no lauksaimniecībā izmantotajām platībām iespējama augsta nitrātu slāpekļa (Lagzdins et.al, 2012) un/vai suspendēto vielu koncentrācija. Organisko vielu saturs šādā notecē visbiežāk ir zems. Aprēķinu modelī 2.21. un 2.22. attēlā kā izejas dati jāievada lauksaimniecībā izmantotās platības sateces baseina kopējā platība, ha, un piedāvāts izvēlēties virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju ūdeņu kvalitātes uzlabošanai pirms ieplūdes vaļējā ūdenskrātuvē. Literatūrā atrodams un modelī iekļauts, ka mitrāja virsmas laukuma un sateces baseina laukuma attiecībai jābūt vismaz 0.5 – 2%, un mākslīgā mitrājā jābūt pastāvīgam un blīvam veģetācijas segumam (Darwiche-Criado et al., 2017; Tournebize et al., 2017). Modelis nepiedāvā tālākus risinājumus, kā mitrāja novietojums objektā un ūdens līmeņa regulēšanas būves konstrukcija. Tālāko tehnisko risinājumu izvēli nepieciešams piemērot atkarībā no objektam raksturīgiem apstākļiem. Piemēram, augsnes granulometriskais sastāvs, lauksaimnieciskās darbības veids un intensitāte ietekmē augu barības vielu un suspendēto vielu izskalošanos un to daudzumu ūdenī. Atkarībā no notekūdeņu sastāva un apjoma jāizvērtē mākslīgā mitrāja konfigurācija, tai skaitā ūdens slāņa dziļums, garuma un platuma attiecība un veģetācijas veids, noklājums un izvietojums.



2.21. att. **Modeļa shēma drenu un virszemes notecei no lauksaimniecības platībām**

Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma drenu un virszemes notecei no lauksaimniecības platībām redzama 2.22. attēlā. Šīs izvēles gadījumā modelis piedāvā ieteicamo mitrāja platību attiecībā pret kopējo sateces baseina laukumu, pieņemot, ka mitrāja vidējais ūdens slāņa dziļums ir 0.7 m.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Lauksaimniecības notekūdeņi

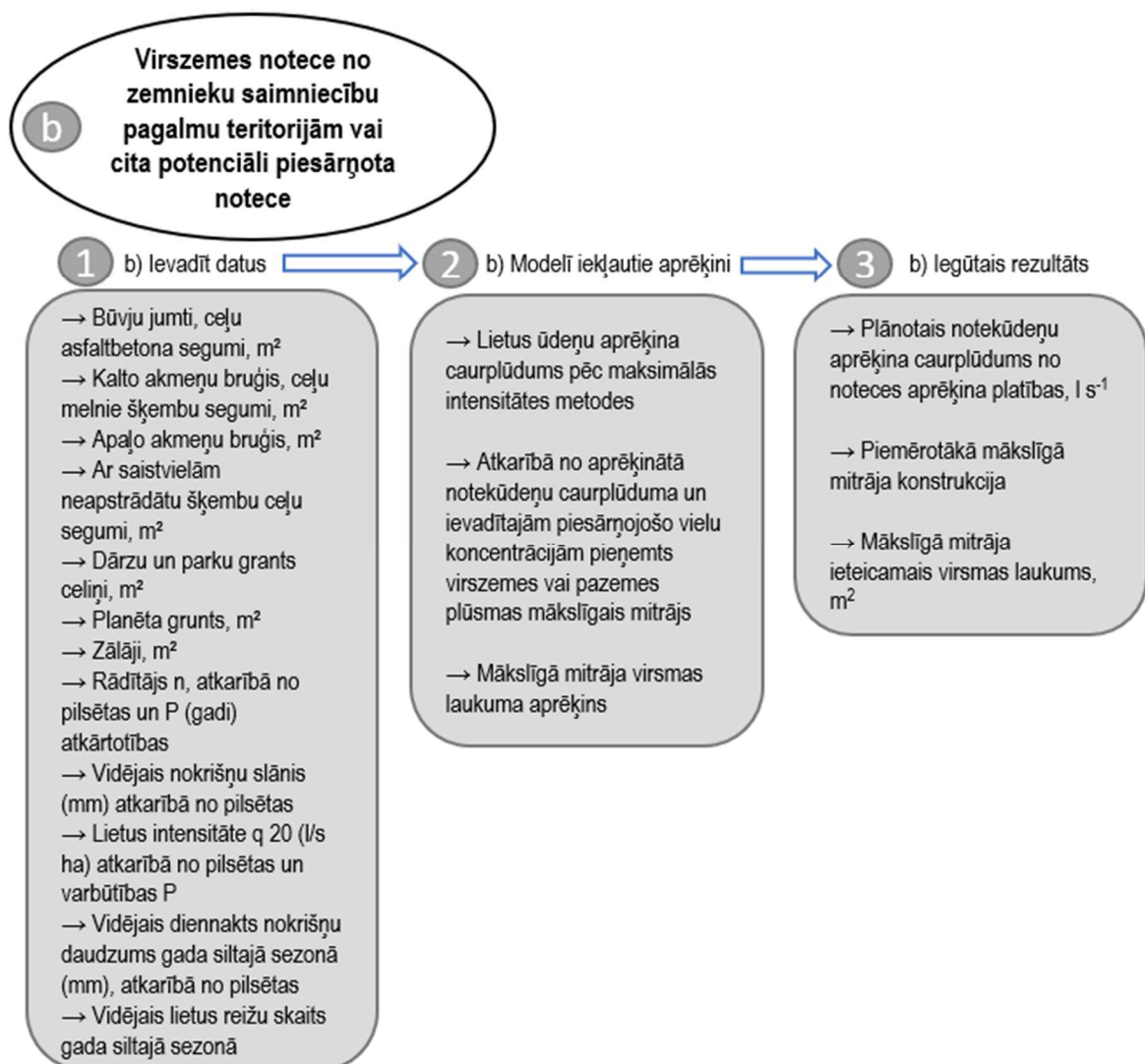
☐ Virszemes notece no pagalma

☒ Drenētas aramzemes sateces baseina laukums, ha

Aprēķināt

2.22. att. **Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma drenu un virszemes notecei no lauksaimniecības platībām**

Otra pieeja, kas redzama 2.23. un 2.24. attēlā, ietver virszemes noteces attīrīšanu no lauksaimnieciskajā darbībā izmantotām teritorijām ar cieto virsmas segumu, kur iespējama organisko vielu klātbūtne notekūdeņos (Vymazal et.al., 2020).



2.23. att. **Modeļa shēma virszemes notecei no zemnieku saimniecību pagalma**

Modelis ietver lietus ūdeņiem atbilstošu apjoma aprēķinu pēc 2.9. un 2.10. formulas un attīrāmo notekūdeņu koncentrāciju pieņem atbilstošu tipiskiem sadzīves notekūdeņiem, balstoties uz pētījumu objektā Mežacīruļos novērotajām ieplūstošajām notekūdeņu koncentrācijām.

2.24. attēlā parādīta neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma virszemes notecei no zemnieku saimniecību platībām.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Lauksaimniecības notekūdeņi ▼

☒ Virszemes notece no pagalma ☐ Drenētas aramzemes sateces baseina laukums, ha Būvju jumti, ceļu asfaltbetona segumi, m² Kalto akmeņu bruģis, ceļu melnie šķembu segumi, m² Apaļo akmeņu bruģis, m² Ar saistvielām neapstrādātu šķembu ceļu segumi, m² Dārzu un parku grants celiņi, m² Planēta grunts (dobes, puķudobes), m²	Zālāji, m² Attālums no tālākās gūlijas līdz maģistrālei, m Tuvākā apdzīvotā vieta Izvēlies pilsētu ▼ Rādītājs n, atkarībā no pilsētas un P (gadi) atkārtotības Vidējais nokrišņu slānis (mm) atkarībā no pilsētas Lietus intensitāte q 20 (l/s ha) atkarībā no pilsētas un varbūtības P Vidējais diennakts nokrišņu daudzums gada siltajā sezonā (mm), atkarībā no pilsētas
--	---

Aprēķināt

2.24. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma virszemes notecei no zemnieku saimniecību pagalma

Pēc sastāva šos notekūdeņus būtu nepieciešams pirms padošanas uz mitrāju nostādināt 3 diennaktis, bet neregulārā pieplūde tiek risināta, piedāvājot notekūdeņus sākotnēji uzkrāt vaļējā krājbaseinā, kas kalpos plūsmas izlīdzināšanai un pirmējai nostādināšanai. Krājbaseina tilpumu

rēķina vadoties pēc aprēķina caurplūduma objektā un paredzot tā uzkrāšanu 1 – 3 stundas. Krājbaseinam jāparedz pārplūde, kas novadīs lietussūdeņus intensīvu lietusgāžu gadījumos un novērsīs mitrāja filtra izskalošanu. Modelis piedāvā pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja konstrukciju, un virsmas platība tiek rēķināta analogi sadzīves notekūdeņiem. Krājbaseinu un mitrāja filtra daļu būvē hermētisku, bez savienojuma ar gruntsūdeņiem.

Lauksaimnieciskās darbības rezultātā radītie cita veida notekūdeņi, kas satur smagos metālus, pesticīdus vai citas piesārņojošās vielas (Vymazal & Brezinova, 2015), vai arī izteikti koncentrēti notekūdeņi no lopkopības, mēslu krātuvēm vai skābbarības tvertnēm, šajā aprēķinu modelī nav iekļauti. Šādos gadījumos jāapsver notekūdeņu priekšattīrīšana, un citas vai kombinētas mākslīgo mitrāju konstrukcijas.

2.4.5. Citi notekūdeņi

Kā piektā izvēle modeļa pirmajā solī piedāvāta “Citi notekūdeņi”. Šis solis ļauj iekļaut tos gadījumus, kad notekūdeņi tiešā veidā neatbilst nevienam no iepriekšminētajiem notekūdeņu izcelsmes avotiem vai arī sastāda kombināciju no vairākiem izcelsmes avotiem. Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī definē arī komunālos notekūdeņus, kas nav klasificējami kā atsevišķi sadzīves, ražošanas vai lietussūdeņi, bet veidojas no divu vai vairāku dažādu notekūdeņu sajaukuma. Ievadāmās ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas jāizvēlas vidējās novērotās vai plānotās. Aprēķina algoritms šajā izvēlē ir analogs ražošanas notekūdeņu aprēķinam. Ja ražošanas notekūdeņu gadījumā paredzamās piesārņojošo vielu un ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas ir atkarīgas no ražošanas veida, iekārtām un intensitātes, un tādējādi ir prognozējamas, tad citu notekūdeņu gadījumā iespējamās situācijas, kad vidējās koncentrācijas pilnvērtīgi neraksturo kopējo situāciju. Kombinētu notekūdeņu gadījumā var parādīties izteikti liela amplitūda starp maksimālo un minimālo vienu vai vairākiem kvalitātes parametriem. Modelī iekļautā izvēle “citi notekūdeņi” ir piemērota tad, ja ir iespējams noteikt raksturīgo vidējo attīrāmo notekūdeņu kvalitāti, definējot paredzamo BSP₅, ŪSP, N_{kop}, P_{kop} un SV koncentrācijas mg·l⁻¹, kā arī notekūdeņu apjomu m³·dnn⁻¹.

2.25. attēlā parādīta neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma cita veida notekūdeņu modelēšanas veidam.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Cita veida notekūdeņi
▼

Jāievada notekūdeņu apjoms, m ³ /dnn	Jāievada N _{kop} , mg/l
Jāievada BSP, mg/l	Jāievada P _{kop} , mg/l
Jāievada ŪSP, mg/l	Jāievada TSS, mg/l

Aprēķināt

2.25. att. Neaizpildīta mākslīgo mitrāju aprēķinu kalkulatora datu ievades forma cita veida notekūdeņiem

Pēc šīs aprēķina metodikas un piedāvātā modeļa var iegūt vispārīgu rezultātu, kas nav piesaistīts katra konkrēta objekta specifiskajiem parametriem, piemēram, esošā topogrāfiskā situācija, grunts sastāvs un gruntsūdens līmenis, teritorijas izmantošanas noteikumi. Iegūtā konstrukcija un mitrāja izmērs un dimensijas ir kā pirmais izejas materiāls projektēšanai, kas turpmāk pieprasa inženiertehniskus risinājumus katrā konkrētā gadījumā, un pieļauj atkāpes, atkarībā no vēlamā ūdeņu kvalitātes rezultāta.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Šajā nodaļā izvērtētas un salīdzinātas praksē pielietotas metodes mitrāju konstruktīvo risinājumu un parametru izvēlē. Noteiktas un analizētas piesārņojošo vielu tai skaitā slāpekļa un fosfora savienojumu, suspendēto vielu, un biokīmiskā un ķīmiskā skābekļa patēriņa koncentrācijas un to mainība notecē pēc notekūdeņu attīrīšanas mākslīgajos mitrājos pētījumu objektos Latvijā, kā arī citās valstīs. Pētījuma gaitā iegūtie rezultāti ir trīs monitoringa objektos novērotā mākslīgo mitrāju darbības efektivitāte attiecībā uz novēroto piesārņojošo vielu koncentrāciju samazināšanu notekūdenī. Novērtēti mitrāju efektivitāti ietekmējošie faktori un to kumulatīvā ietekme uz piesārņojuma samazināšanu ūdenī. Izvērtēti piemērotākie mitrāju konstruktīvie risinājumi un ekspluatācijas priekšnosacījumi iespējami augstas mitrāja darbības efektivitātes nodrošināšanai. Izstrādāta un raksturota aprēķinu metodika, kas iekļauta aprēķinu modelī, mitrāja konstruktīvā risinājuma un dimensionālo parametru izvēlei dažāda veida un apjoma notekūdeņu attīrīšanai.

3.1. Piesārņojuma izmaiņu analīze dažādas konstrukcijas mākslīgajos mitrājos Latvijā

Piesārņojuma izmaiņas pēc notekūdeņu attīrīšanas mākslīgajos mitrājos tiek vērtētas, vadoties no piesārņojošo vielu koncentrāciju izmaiņām, salīdzinot ieplūdes un izplūdes rādītājus, kā arī pēc novērotā caurplūduma.

Novēroto ūdeņu kvalitātes parametru analīze pētījumu objektos tika veikta, starp pieciem analizētajiem parametriem N_{kop} , NO_3^- -N, NH_4^+ -N, P_{kop} un PO_4^{3-} -P, sākotnēji meklējot lineāru korelāciju, salīdzinot ieplūdes un izplūdes rādītāju koncentrācijas diviem mākslīgajiem mitrājiem Mežacirūļos un vienam mākslīgajam mitrājam Zantē.

Visās pētījumā iekļautajās pilotteritorijās, pazemes un virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos novērojami mainīgi ūdens attīrīšanas efektivitātes rādītāji attiecībā uz pētījumā iekļautajām piesārņojošajām vielām N_{kop} , NO_3^- -N, NH_4^+ -N, P_{kop} un PO_4^{3-} -P. Atbilstoši lineārās regresijas analīzes rezultātiem novērojama vāja sakarība ($R^2 < 0.2$) starp piesārņojošās vielas koncentrāciju mitrzesmes ieplūdes un izplūdes daļā analizēto parametru determinācijas koeficientu $R^2 < 0.2$. Determinācijas koeficients ir mērs, kas parāda, cik labi novērtētā izlases regresijas līnija pieguļ izlases datiem. Šajā gadījumā var secināt, ka regresijas līnija izlases datiem pieguļ vāji. No determinācijas koeficienta R^2 izrēķina korelācijas koeficientu r , kas mēra lineāras sakarības ciešumu starp ieplūdes un izplūdes koncentrācijām visiem 5 rādītājiem visos trīs mitrājos. Sekojoši, $r = \pm\sqrt{R^2}$. Tā kā $r < 0.2$, korelācija ir ļoti vāja un secināms, ka fosfora un slāpekļa koncentrāciju izmaiņas mitrājos ilggadīgā griezumā nenotiek pēc lineāras sakarības. Tas izskaidrojams ar vairāku koncentrāciju izmaiņas ietekmējošo faktoru sezonālajām un ilggadīgajām svārstībām. Kā piemērus mitrāja efektivitāti ietekmējošajiem faktoriem var minēt mainīgu caurplūdumu, ūdens līmeni un plūsmas ātrumu, gaisa un ūdens temperatūru, iespējamo atšķaidījumu mitrāju vidusdaļā, kas netiek fiksētas ar mērījumiem (Crumpton & Stenback, 2020). Tādējādi korelācijas koeficients nav derīgs izmantošanai, lai mērītu sakarības spēku starp ieplūdes un izplūdes koncentrācijām, tā vērtība tiecas uz 0. Ilggadīgā lineārā regresija nav piemērota, lai prognozētu mitrāja efektivitāti.

Līdzīga satura pētījumos izmantotas dažādas neparametriskās statistikas metodes datu interpretācijai, piemēram, Spīrmana korelācija. Šādu ieteikumu pamato arī fakts, ka iegūto ūdeņu kvalitāti raksturojošo datu rinda neveido normālu sadalījumu un kopējā monitoringa laikā iegūto datu izkliede ir liela. Tā kā mākslīgajos mitrājos norisinās daudzveidīgi attīrīšanas procesi, kas katru no ūdeņu kvalitātes rādītājiem un to attīrīšanas efektivitāti ietekmē atšķirīgi, turpmākajās nodaļās dati apskatīti tematiski saistīti un analizēti atsevišķi atkarībā no procesiem, kas tos mitrājā ietekmē.

3.1. tabulā parādīti seši pētījuma ietvaros analizētie ūdeņu kvalitāti raksturojošie parametri katrā no trim pētījumu objektiem. Visos pētījumu objektos analizēto piesārņojošo

vielu novērotās aritmētiskās vidējās koncentrācijas, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, pie ieplūdes ievērojami pārsniedz šo koncentrāciju mediānas visiem parametriem. Atšķirības skaidrojams ar to, ka aritmētiskās vidējās koncentrācijas novēroto ekstrēmi augsto vielas koncentrāciju dēļ var neradīt pilnvērtīgu priekšstatu par raksturīgo koncentrāciju sadalījumu. Mediāna tiek izmantota kā statistikas rādītājs jeb centrālās tendences mērs, kas atšķirībā no vidējās vērtības ievērtē datu kopas novirzes, atdalot datu kopas augšējo pusi no apakšējās puses. 3.1. tabulā izceltas piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas, kuras demonstrē mitrāja efektīvu darbību attiecībā uz piesārņojošās vielas aizturēšanu.

Var secināt, ka pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos efektīvi aiztur piesārņojošos elementus, jo visu analizēto parametru vidējās vērtības uzrāda koncentrāciju samazinājumu pie izplūdes. Kopējā slāpekļa aizturēšanas efektivitātes mediāna uzrāda 55%, bet amonija slāpeklim 64% samazinājumu visā pētījumu periodā. Vidējā piesārņojuma aizturēšanas efektivitāte šim pētījumu objektam un datu rindai uzrāda samazinājumu visām slāpekļa savienojumu koncentrācijām. Aizturēšanas efektivitātes mediāna kopējam fosforam un ortofosfātu fosforam uzrāda attiecīgi 90% un 91% samazinājumu. Suspendētās vielas atbilstoši mediānai samazinātas par 46% visā novērojumu periodā.

3.1. tabula. Analizēto ūdeņu kvalitātes parametru vidējās koncentrācijas, vidējā aizturēšanas efektivitāte, koncentrāciju un piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas

Monitoringa objekts	Ūdeņu kvalitātes parametrs	Vidējā koncentrācija, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$		Koncentrāciju, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mediāna		Vidējā aizturēšanas efektivitāte*, %	Piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes*, %, mediāna
		Ieplūde	Izplūde	Ieplūde	Izplūde		
Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļi	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	2.639	2.200	0.200	0.915	-17	358
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	7.382	2.429	4.110	1.475	-67	-64
	N_{kop}	15.137	6.937	14.000	6.309	-54	-55
	$\text{PO}_4^- - \text{P}$	5.582	1.824	2.770	0.244	-67	-91
	P_{kop}	6.762	1.894	3.063	0.314	-72	-90
	SV	103.309	39.026	50.261	26.916	-62	-46
Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļi	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	10.590	9.530	9.000	10.856	-10	21
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.447	0.340	0.175	0.236	-24	35
	N_{kop}	12.073	10.951	9.950	12.000	-9	21
	$\text{PO}_4^- - \text{P}$	0.083	0.079	0.038	0.030	-5	-21
	P_{kop}	0.152	0.111	0.074	0.072	-27	-3
	SV	43.529	38.889	29.472	27.255	-11	-8
Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zante	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	2.344	2.409	1.614	1.636	3	2
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.023	0.031	0.010	0.014	50	0
	N_{kop}	2.844	2.909	1.900	1.910	2	1
	$\text{PO}_4^- - \text{P}$	0.027	0.028	0.005	0.006	0	0
	P_{kop}	0.047	0.049	0.018	0.019	0	0
	SV	32.186	29.726	15.356	7.099	-8	-54

*Pozitīvs efektivitātes rādītājs nozīmē ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas palielināšanos pie izplūdes. Negatīvs efektivitātes rādītājs nozīmē ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijas samazināšanos pie izplūdes.

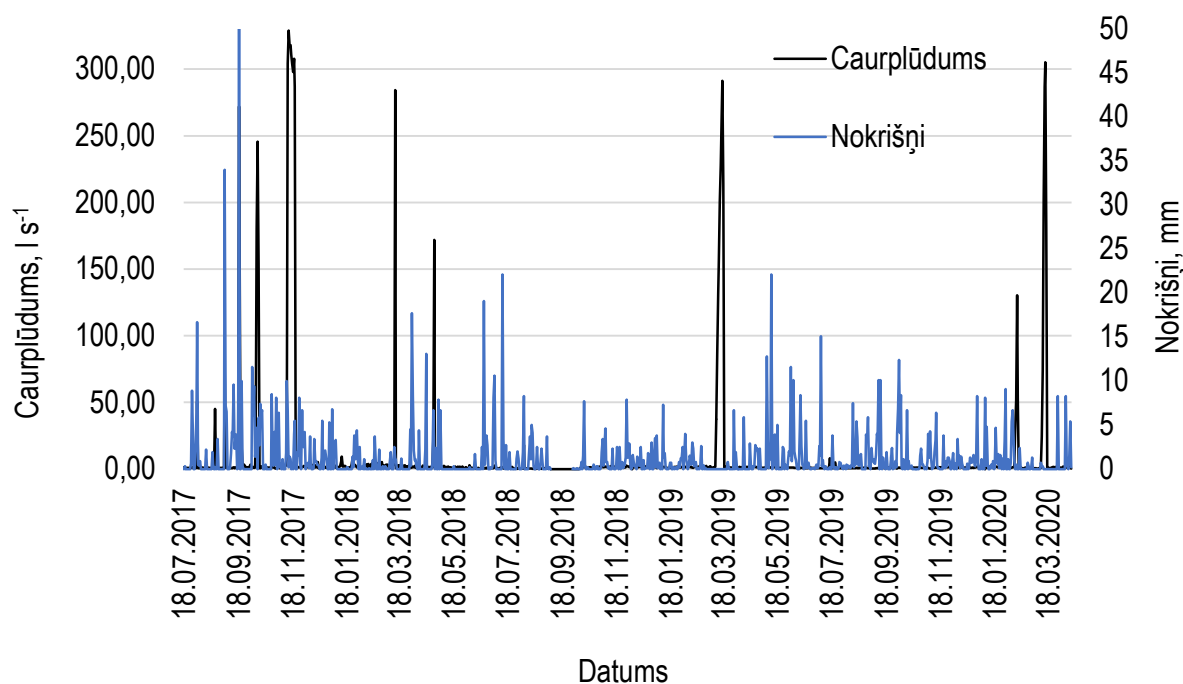
Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos, vadoties pēc 3.1. tabulā redzamās piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas, uzrāda zemu efektivitāti slāpekļa

savienojumu koncentrāciju samazinājumam pie izplūdes. Taču vidējās vērtības uzrāda 10%, 24% un 9% samazinājumu attiecīgi nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrācijām. Vērtējot visu monitoringa periodu kopumā attiecībā uz fosfora savienojumu aizturēšanu, mitrājs darbojies ar 21% un 3% samazinājuma efektivitāti attiecīgi ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora koncentrācijām. Suspendēto vielu aizture kopumā uzrāda 8% mediānas samazinājumu. Šajā pētījumu objektā tabulā iekļauti visi pētījuma perioda laikā iegūtie dati. Nākamajās apakšnodalās atspoguļotā datu analīze liecina par nelabvēlīgiem monitoringa apstākļiem atsevišķos periodos, kur konkrētais mitrājs tomēr uzrādījis efektīvu darbību.

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē uzrāda zemu efektivitāti nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju samazinājumam pie izplūdes, vērtējot tabulā uzrādītās piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas, vai arī ūdens kvalitāte nepasliktinās. Tomēr, salīdzinot Zantes un Mežacīruļu virszemes plūsmas mitrājos novērotās vidējās koncentrācijas pie ieplūdes mitrājā, Zantes monitoringa objektā ieplūstošais ūdens ir ar 4 – 5 reizes zemāku nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa un 3 reizes zemāku fosfora savienojumu koncentrāciju. Ieplūstošā ūdens koncentrāciju mediānu atšķirības ir vēl izteiktākas, vairāk nekā 5 reizes slāpekļa un gandrīz 4 reizes fosfora savienojumiem. Suspendēto vielu aizturēšanas efektivitātes mediāna novērota ar 54% samazinājumu.

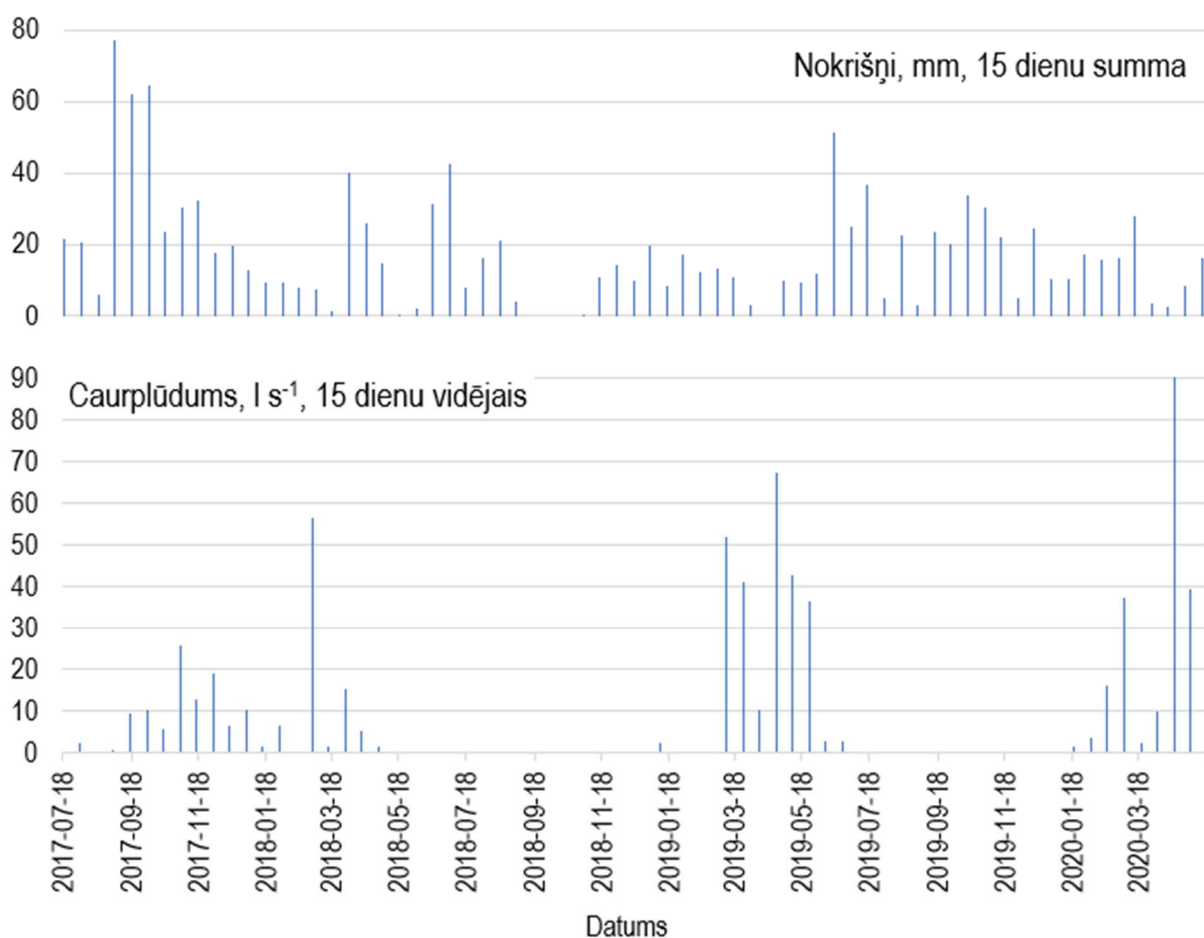
Sešiem analizētajiem parametriem N_{kop} , NO_3^- -N, NH_4^+ -N, P_{kop} , PO_4^{3-} -P un SV tika pārbaudīta sakarība starp parametru ienākošajām koncentrācijām un konkrētā parametra attīrīšanas efektivitāti. Saistība starp šo parametru grupām netika atrasta, tātad var secināt, ka pētījumā iekļautajos monitoringa objekts fosfora un slāpekļa savienojumu attīrīšanas efektivitāte nav atkarīga no parametra koncentrācijas ieplūstošajā notekūdenī.

Novērotā notekūdeņu apjoma analīze pētījumu objektos tika realizēta, reģistrējot ūdens līmeņus pie mērbūvēm. Notekūdeņu apjoms laika vienībā jeb caurplūdums tika novērots un analizēts katram no trim pētījumu objektiem. Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos novērots maksimālais caurplūdums sasniedz $328 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ 2017. gada novembrī un pietuvojas $300 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ 2018., 2019. un 2020. gada marta mēnešos. Maksimālie caurplūdumi pavasarī liecina arī par iespējamiem infiltrācijai nelabvēlīgiem apstākļiem, kas varētu izraisīt strauju lietusūdeņu virzīšanos pa lietus kanalizācijas sistēmu uz mākslīgo mitrāju.



3.1. att. Novērotie 15 dienu vidējie caurplūdumi un 15 dienu nokrišņu summas pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos caurplūdums pārrēķināts balstoties uz datu logera ūdens līmeņu automātiskajiem novērojumiem pie pārgāznes mitrāja iztekā. 3.1. attēlā redzami vairāki periodi, kad plūsma nav novērota, lai gan nokrišņu grafiks liecina par potenciālu noteces pieplūdumu. Tas saistīts ar to, ka šis mitrājs ir savienots ar gruntsūdeņiem, bez hidroizolācijas, un var secināt, ka ūdens caur mitrāja pamatni infiltrējas gruntī. Par to liecina arī caurplūdumu vājā reakcija uz nokrišņu epizodēm vasaras periodos, kad apkārtējās teritorijās tika novērots mitruma deficīts un ūdens līmeņu kritums meliorācijas grāvjos, akās un Eglones upē. Turklāt monitoringa laikā novēroti atsevišķi periodi, kad mērbūve neatradās darba kārtībā un notika ūdens kustība apkārt mērbūvei, divos gadījumos 2018. gada maijā līdz novembrī un 2019. gada jūlijā līdz decembrī. Maksimālais caurplūdums tika novērots $95.8 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ 2020. gada aprīlī, vidēji novērojumu periodā 15 dienu vidējais caurplūdums novērots $16.4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.



3.2. att. **Novērotie 15 dienu vidējie caurplūdumi un 15 dienu nokrišņu summas virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos**

Lai noskaidrotu, vai pastāv statistiska saistība starp novērotajiem caurplūdumiem un nokrišņu summu šajā reģionā, izmantota Pīrsona korelācijas metode, kas mēra statistisko saistību starp diviem nepārtrauktiem mainīgajiem, kas šajā pētījumā ir 15 dienu vidējais caurplūdums un 15 dienu nokrišņu summa. Virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos konstatēta vāja Pīrsona korelācija 0.213, kas vispirms saistīts ar to, ka meliorētās aramzemēs drenu notece veidojas ar laika nobīdi pēc lietusgāzēm. Iespējams, ka šajā objektā nomērītie ūdens līmeņi pilnvērtīgi neatspoguļo mitrājā ieplūstošo ūdeņu apjomu. Var izdarīt vairākus iespējamus secinājumus par to, kas ietekmē novērotā caurplūduma režīmu. Monitoringa laikā atzīmētie novērojumi, ka ūdens infiltrējas gruntī visā mitrāja pamatnes platībā, ūdens tiek ņemts

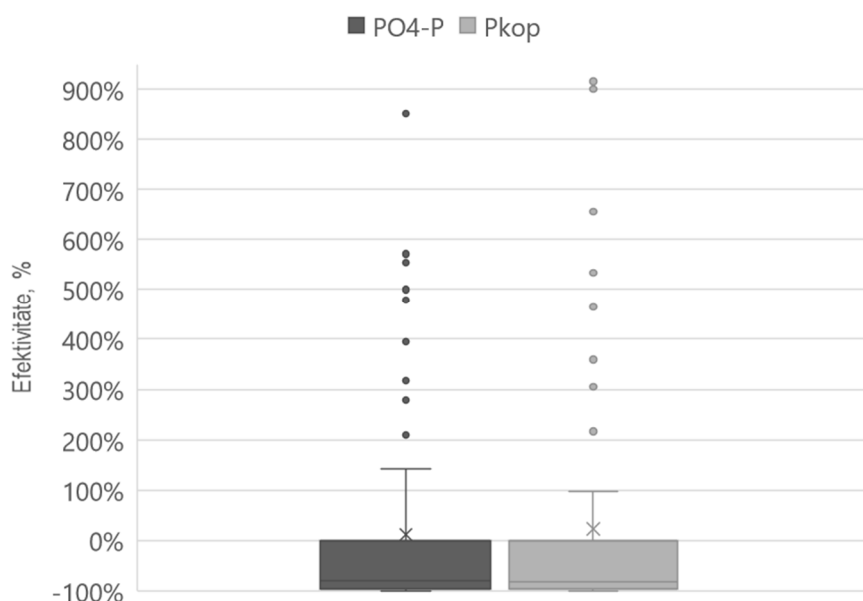
apūdeņošanas vajadzībām bez uzskaites, neattīrīti notekūdeņi tiek epizodiski ievadīti mitrāja vidusdaļā bez uzskaites, mērbūve periodiski neatrodas darba kārtībā. Taču šie secinājumi neatspoguļo mitrāja darbības efektivitāti, bet drīzāk apliecina lauka līmeņa monitoringa objektu nepastāvīgo un grūti kontrolējamo raksturu.

Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos konstatēta vāja Pīrsona korelācija 0.354, un arī lietūs notekūdeņu savākšanas sistēma varētu novadīt ūdeņus līdz mitrājam ar nelielu laika nobīdi. Šajā gadījumā zemā korelācija starp nokrišņu summu un vidējiem novērotajiem caurplūdumiem liek meklēt vēl kādu skaidrojumu. Šeit vēlreiz jāmin lauka pētījumu objektu specifika un grūti kontrolējamais raksturs, kas atšķiras no laboratorijas līmeņa pētījumiem. 3.1. attēla vizuālais materiāls tomēr demonstrē zināmu caurplūduma reakciju uz nokrišņu epizodēm.

Vērtējot novēroto ūdens uzturēšanās laiku mākslīgajos mitrājos, kas ir minēts kā viens no nozīmīgākajiem faktoriem piesārņojošos vielu attīrīšanas kontekstā (Varga et.al., 2017; Crumpton & Stenback, 2020; Nurmahomed et.al., 2022), var secināt, ka liela nozīme ir caurplūdamam, ko ietekmē attīrāmā ūdens pieplūdes režīms. Ūdens uzturēšanās laiks pazemes plūsmas mitrājā Mežacīruļos pie vidējiem caurplūdumiem novērots 4.7 stundas, bet virszemes plūsmas mitrājā 62.6 stundas. Hidrauliskās slodzes ātrums, rēķināts pēc 1.1. formulas, vidēji ir $4.6 \text{ m} \cdot \text{dnn}^{-1}$ un maksimālo caurplūdumu laikā ir $66 \text{ m} \cdot \text{dnn}^{-1}$ pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā. Virszemes plūsmas mitrājā Mežacīruļos hidrauliskās slodzes ātrums pēc novērotā caurplūduma aprēķināts vidēji $0.38 \text{ m} \cdot \text{dnn}^{-1}$ un maksimālo caurplūdumu laikā $2.2 \text{ m} \cdot \text{dnn}^{-1}$. Vērtējot pēc abu mitrāju novērotajām ūdens kvalitātes rādītāju izmaiņām, var secināt, ka hidrauliskās slodzes ātrums neatspoguļo mitrāja efektivitāti, jo kopumā pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos ir uzrādījis ievērojami augstāku efektivitāti. Efektivitāte vērtējama kompleksi, kur viens no skaidrojumiem divos minētajos objektos ir atšķirīgs konstruktīvais risinājums ar filtru vienā, bet ūdens slāni otrā gadījumā. Turpmāk darbā izvērtēti arī citi novērotie nozīmīgākie faktori, kas varētu veidot ietekmi uz mitrāja darbības efektivitāti.

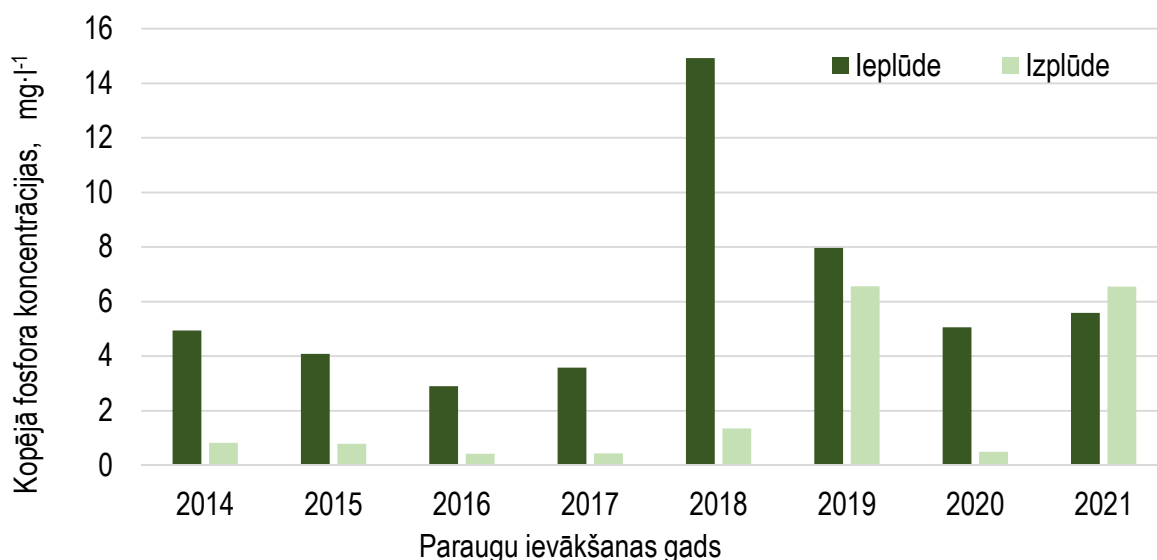
3.1.1. Ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora izmaiņu analīze

Fosforam nav gāzveida formas, un, lai samazinātu fosfora savienojumu koncentrāciju notekūdeņos, tādā veidā uzlabojot ūdeņu kvalitāti, mākslīgajos mitrājos fosfora savienojumi tiek aizturēti (Keddy, 2010), uzkrāti nogulšņu veidā un uzņemti ar augiem.



3.3. att. $\text{PO}_4\text{-P}$ un P_{kop} attīrīšanas efektivitātes rezultāti pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

Tā kā sorbcija tiek veicināta ar Al, Mg un Fe klātbūtni, tad pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā svarīga nozīme ir filtra materiāla sastāvam. $\text{PO}_4\text{-P}$ un P_{kop} attīrīšanas efektivitāte pētījumu objektā pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos bijusi stabila un augsta visā novērojumu periodā, ko demonstrē 3.3. attēls. Redzams, ka vidējās koncentrācijas samazināšanas efektivitātes vērtības ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora koncentrāciju aizturēšanai izkārtotajās ar uzsvāru uz koncentrāciju samazinājumu pie izplūdes. Tās vērtības, kas uzrāda fosfora savienojumu palielināšanos pēc izplūdes no mitrāja, vērtējamas kā izņēmuma gadījumi, kas tomēr atstāj ietekmi uz efektivitātes vidējām vērtībām.

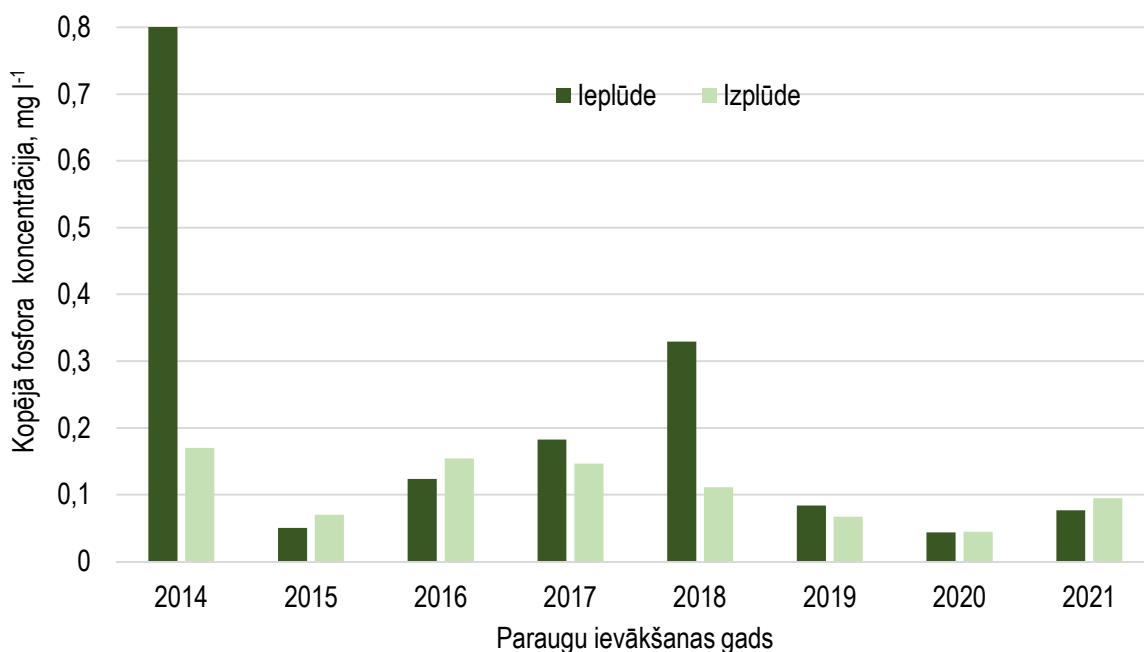


3.4. att. Vidējās kopējā fosfora koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos

Novēroto gadu vidējo kopējā fosfora koncentrāciju novērtēšanai aprēķinātas standartklūdas un attēlotas 3.4. attēlā. Vērtējot attīrīšanas efektivitātes izmaiņas pa gadiem, kopējā fosfora vidējā attīrīšanas efektivitāte bijusi zema 2019. un 2021. gadā. Taču 3.4. attēlā demonstrētas gadu vidējās koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes. Detalizēti aplūkojot šos gadus, redzams, ka 2019. gadā no kopējā fosfora koncentrācijas samazinājušās tikai no maija līdz augustam, pārējos mēnešos mitrāja darbība nav uzrādījusi efektīvu fosfora savienojumu attīrīšanu. 2021. gada vidējo efektivitātes vērtību ietekmē četras mērījumu epizodes no februāra līdz maijam, kad izplūdes koncentrācijas bijušas kritiski augstākas par ieplūdes koncentrācijām. Tas varētu būt saistīts ar 2021. gadā konstatētajām ekspluatācijas nepilnībām, kas radījis negatīvu ietekmi uz visiem ūdeņu kvalitātes parametriem un mitrāja darbības efektivitāti kopumā. Kopējā fosfora koncentrāciju samazinājums pie izplūdes novērojams lielāks nekā tikai standartklūdu robežās, un var secināt, ka kopējā fosfora samazinājums lielākajā daļā novērojuma gadu ir nozīmīgs.

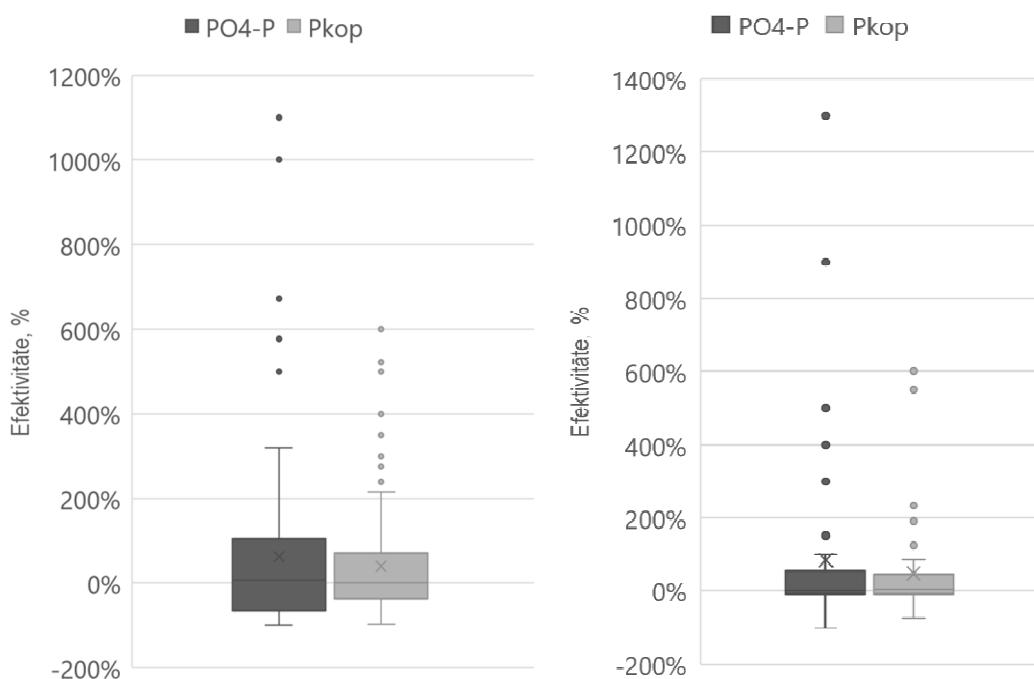
Virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji Mežacīruļos un Zantē kopumā uzrādījuši salīdzinoši zemu fosfora savienojumu aiztures spēju. Mitrājā Mežacīruļos par vienu no zemas efektivitātes iemesliem fosfora savienojumu aizturēšanā varētu būt neliels veģetācijas daudzums un nevienmērīgs noklājums pa mitrāja platību. Šāda atziņa izdarīta pētījumā par dažādu vides parametru ietekmi uz fosfora savienojumu aizturēšanu, analizējot monitoringa datus no pieciem virszemes plūsmas mākslīgajiem mitrājiem Baltijas jūras reģionā, iekļaujot arī pētījumu objektu Mežacīruļos (Kill et al., 2022). Galvenā atziņa tika izdarīta, ka fosfora savienojumu aizturēšanu ietekmē drīzāk blīva un nobriedusi veģetācija un mazāk sateces baseina un spoguļa virsmas attiecība. Veģetācijas izplatība mitrājā palielina spēju saglabāt efektīvu fosfora savienojumu aizturēšanas spēju un noturību pret pēkšņām un īslaicīgām ūdens plūsmas ātruma izmaiņām.

(Kill et al., 2022). Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos demonstrē veģetācijas kritisko nozīmi attiecībā uz fosfora savienojumu aizturēšanas spēju.



3.5. att. Vidējās kopējā fosfora koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos

Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos ekspluatācijas pirmajā gadā redzama salīdzinoši augsta kopējā fosfora koncentrācija pie ieplūdes (3.5. attēls) un izteikts koncentrāciju samazinājums pie izplūdes. Šis novērojumu gads uzskatāms par nepilnīgu, jo mērījumi tika uzsākti jūlija mēnesī uzreiz pēc objekta izbūves. Tādējādi pirmie paraugi varēja saturēt būvniecības laikā radītus uzduļķojumus.



3.6. att. $\text{PO}_4\text{-P}$ un P_{kop} attīrīšanas efektivitātes rezultāti, secīgi virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos Mežacīruļos un Zantē

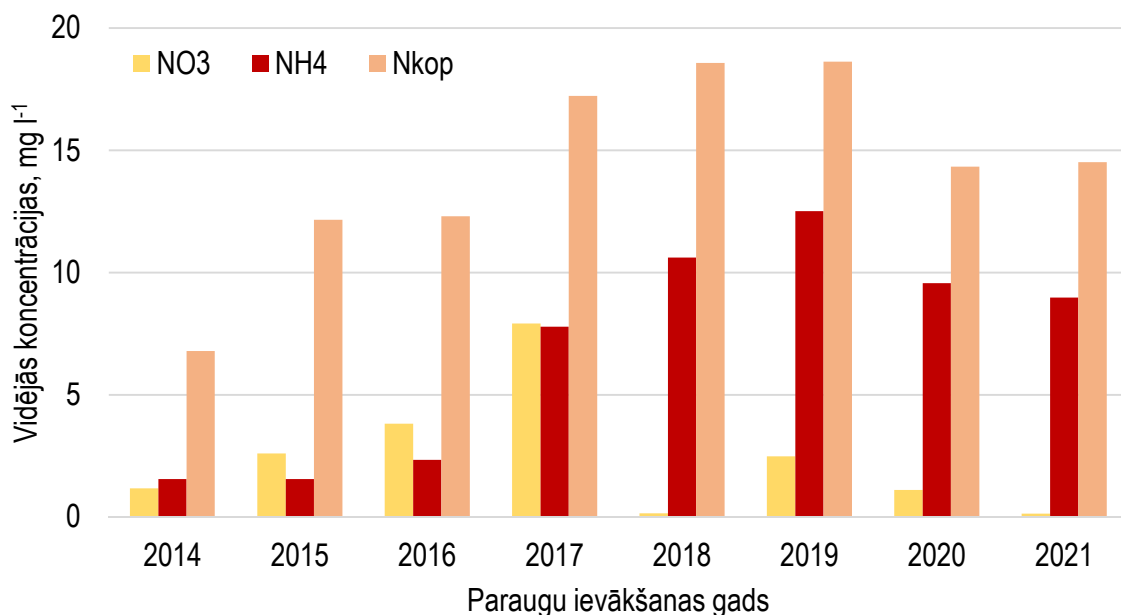
Izteiktu kopējā fosfora samazinājumu pie izplūdes Mežacīruļos uzrāda 2018. gada novērojumu dati, taču pārējos novērojumu gados vidējais kopējā fosfora samazinājums bijis negatīvs vai nenožīmīgs. Ja fosfora atdalīšanas mehānisms ir atkarīgs no filtra materiāla pazemes plūsmas mitrājos (Kamilya et.al., 2022), virszemes plūsmas mitrājos liela nozīme fosfora savienojumu atdalīšanā ir veģetācijai un ūdens slāņa īpašībām, ko apliecina Mežacīruļos iegūtie monitoringa dati. Lai veicinātu fosfora aizturēšanu virszemes plūsmas mitrājā, ieteicams papildināt ūdens slāni ar augu stādījumiem mitrāja gultnē.

Mitrājs Zantē uzrāda fosfora savienojumu koncentrāciju procentuālu palielināšanos pie izplūdes, lai gan veģetācija šajā mitrājā ir mērķtiecīgi stādīta būvniecības laikā. Tomēr, vērtējot skaitliski $\text{PO}_4\text{-P}$ un P_{kop} ieplūdes un izplūdes koncentrāciju absolūtās vērtības, vidējās vērtības neatšķiras ieplūdei no izplūdes, tāpat neatšķiras arī mediānas, kā redzams 3.1. tabulā. Turklāt ieplūstošās fosfora savienojumu koncentrācijas ienākošajā ūdenī ir salīdzinoši zemas, izņemot ar vienu izteiktu palielinājuma epizodi 2021. gada 27. augustā, kad novērota P_{kop} koncentrācija $0.96 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pie ieplūdes. Kopumā var secināt, ka virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē darbojas neitrāli attiecībā uz fosfora savienojumiem, tos neaiztur un neuzkrāj.

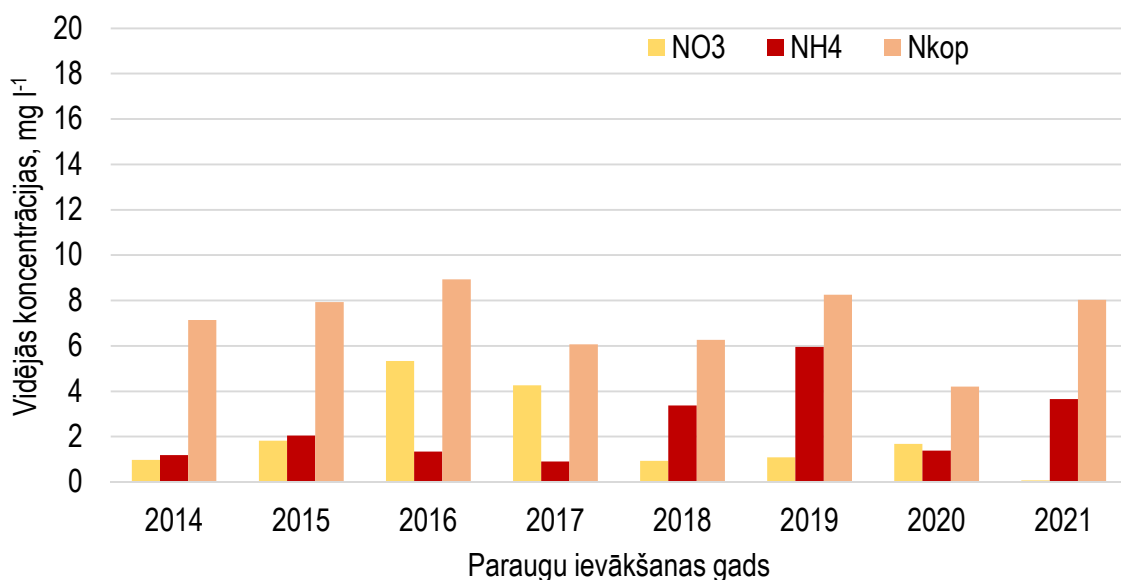
3.1.2. Nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa, kopējā slāpekļa izmaiņu analīze

Slāpekļis ar ūdeni piesātinātā augsnē, sedimentos un vaļējā ūdens slānī ir sastopams neorganiskās un organiskās formās. Organiskais slāpekļis sastāv kompleksi no aminoskābēm, amīniem, proteīniem un humīnvielām (Reddy et.al., 1984). Neorganiskais slāpekļis sastāv no amonija slāpekļa, nitrātu slāpekļa un nitrītu slāpekļa. Reddy et.al. (1984) konstatēja, ka amonija slāpekļis ir dominējošā neorganiskā slāpekļa forma sedimentos. Slāpekļa savienojumu aizturēšana ir viens no galvenajiem mākslīgo mitrāju uzdevumiem dažāda veida notekūdeņu attīrīšanā. Mitrājs veic organisko vielu atdalīšanu no ūdens ar filtrācijas palīdzību vai sedimentācijas produktu izgulsnēšanu virszemes plūsmas mitrāja gadījumā. Pēc būtības tas, kas tiek izgulsnēts, ir izšķīdušie vai daļēji izšķīdušie piemaisījumi. Lauksaimnieciskās darbības rezultātā veidotā notecē dominēs smilšu, māla, putekļu, augsnes daļiņas, augu atliekas (zaļā masa, saknes, sēklas, putekšņi utt.), trūdvielas, mēslojums, augu aizsardzības līdzekļi, ja tie ir pielietoti. Ja mitrājā izmanto ūdens augus, un arī, ja neizmanto, mitrājā notiek biogēno elementu aizturēšana un transformācija. Slāpekļa savienojumi nonāk augsnē izšķīdušā veidā neorganiskā un organiskā formā (Mahmood et.al., 2013). Šajā pētījumā pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs uztver lietotus notekūdeņus, kas satur organisko mēslojumu, ko pierāda ieplūstošās BSP_5 koncentrācijas.

Organiskā slāpekļa proporcija noteikta, no kopējā slāpekļa koncentrācijas atņemot amonija slāpekļa un nitrātu slāpekļa koncentrācijas. Kopējā slāpekļa vidējo koncentrāciju sadalījums pa gadiem pie ieplūdes un izplūdes 3.6. attēlā rāda, ka pirmajā ekspluatācijas gadā kopējā slāpekļa attīrīšanas efektivitāte bijusi zema, vairākos paraugu ievākšanas gadījumos palielinot kopējā slāpekļa koncentrāciju mediānas vērtības pie izplūdes par 23%, kas novērota 2014. gadā pazemes plūsmas mitrājā. Tas skaidrojams ar to, ka pirms izbūves mitrāja filtra darbība balstīta uz mehāniskiem attīrīšanas procesiem, ļaujot baktērijām attīstīties un sasniegt atbilstošu briedumu slāpekļa savienojumu efektīvai pārveidošanai.

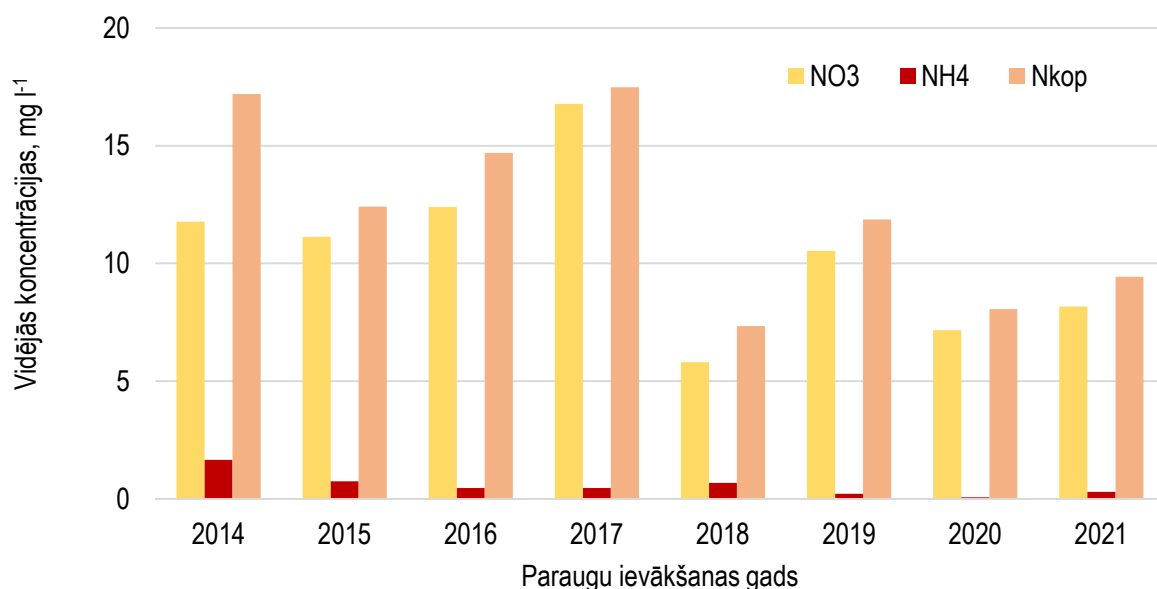


3.7. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes pazemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos

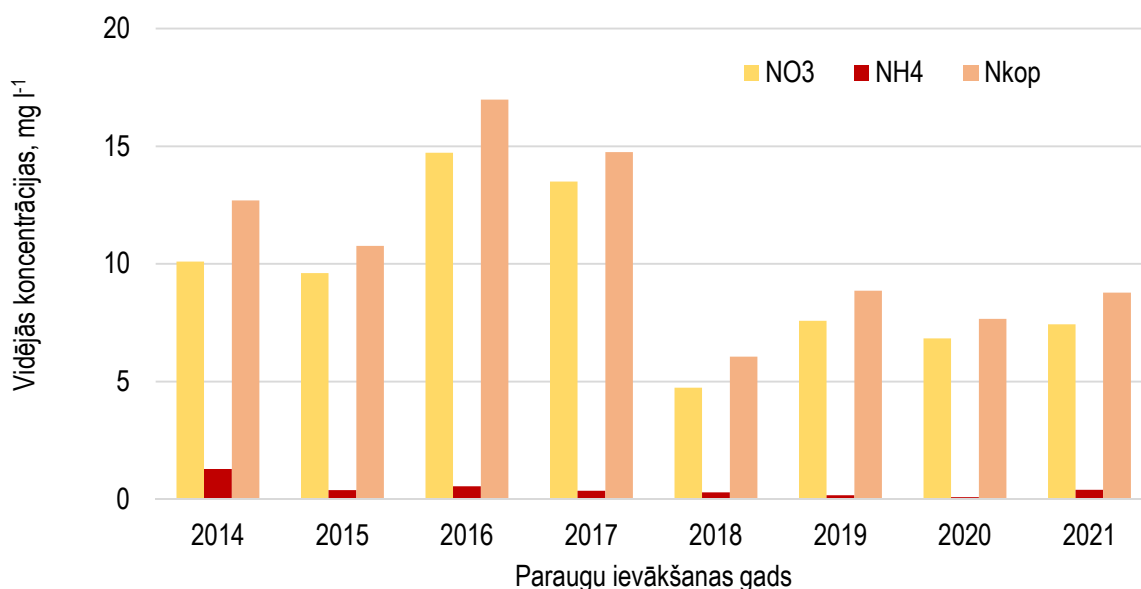


3.8. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos

Slāpekļa savienojumu koncentrāciju izmaiņas pie ieplūdes un izplūdes, ko demonstrē 3.7. un 3.8. attēls, pētījuma periodā ir bijušas atšķirīgas. Eksploatācijas sākumā posmā no 2014. līdz 2016. gadam uzrādījies proporcionālu un lēni pieaugošu slāpekļa savienojumu samazinājumu. Izteikti augsta efektivitāte slāpekļa savienojumu samazināšanā novērota eksploatācijas vidus posmā no 2017. līdz 2019. gadam, kas turpinās līdz 2021. gadam. Arī 2018. gadā, kur novērojams nitrātu slāpekļa koncentrācijas palielinājums pie izplūdes, tomēr uzskatām par pozitīvu tendenci, kas skaidrojams ar bioloģisku procesu norisi, nitrifikācijas rezultātā pārveidojot no amonija slāpekli par nitrātu slāpekļa formu. Attiecībā uz slāpekļa savienojumiem pazemes plūsmas mitrājs uzrādījis labus rezultātus un efektīvi samazinājis novērotās koncentrācijas visā eksploatācijas periodā.



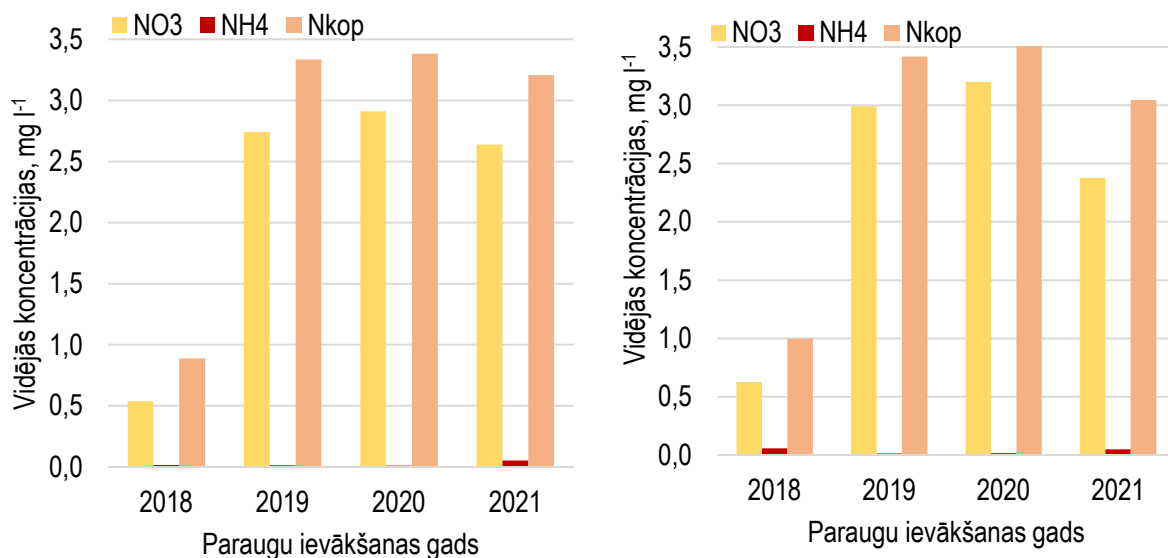
3.9. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacirulīs



3.10. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacirulīs

Zīmīgi, ka kopumā dažādo slāpekļa formu proporcija daudz nemainās pēc attīrīšanas mākslīgajā mitrājā. Pazemes plūsmas mitrājā līdzvērtīgi samazinājusies visu slāpekļa formu koncentrācija, bet abos virszemes plūsmas mitrājos kopējā slāpekļa savienojumu koncentrācija samazināta salīdzinoši mazāk, arī šajā gadījumā dažādo slāpekļa formu proporcija saglabājusies arī pie izplūdes. Amonija slāpekļa pārveidošanai nitrifikācijas ceļā jānodrošina filtrā, vēlams ieplūdes daļā, aerobi apstākļi. Tā kā amonija slāpekļa koncentrāciju samazinājums ir panākts, var secināt, ka nitrifikācija pētījumu objektā ir nodrošināta optimāli. Nitrifikācijas rezultātā būtu jāpieaug nitrātu slāpekļa koncentrācijai, taču monitoringa dati to neuzrāda. Denitrifikācijas baktērijas ideālos apstākļos transformē nitrātjonus secīgi $\text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ (Crumpton & Stenback, 2020). Redzams, ka nitrātu slāpekļa koncentrācijām ir samazinājums, tātad var secināt, ka vismaz daļā pazemes plūsmas mitrāja filtra daļas ir nodrošināti anoksi vai anaerobi apstākļi nitrātu pārveidošanai par slāpekli gāzveida formā. Tomēr daļa no slāpekļa varētu būt uzņemta ar augiem un izmantota zaļās masas pieaugumam.

Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos slāpekļa savienojumu izmaiņas parādītas 3.9. un 3.10. attēlā. 2016. gadā ekspluatācijas kļūdas rezultātā mitrājā tika ievadīti neattīrīti notekūdeņi no vēsturiskas skābbarības krātuves, un redzams, ka pie izplūdes konstatētas augstākas nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrācijas nekā pie ieplūdes. Slāpekļa formu proporcijas saglabāšanās liecina par to, ka šajā mitrājā būtu jāuzlabo nitrātu slāpekļa attīrīšanas efektivitāte, kas nozīmētu nodrošināt anaerobu vidi denitrifikācijas veicināšanai. Vēl viens iemesls vājai nitrātu slāpekļa samazināšanai atzīmējams nelielais veģetācijas daudzums un izkliede mitrāja platībā. Tādējādi iespējams, ka pietiekamā daudzumā nav pieejams bioloģiskajiem procesiem piemērots oglekļa avots baktēriju darbībai, ko varētu nodrošināt veģetācija.



3.11. att. Vidējo nitrātu slāpekļa, amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa koncentrāciju sadalījums pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē

Virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Zantē novērotas izteikti zemas amonija slāpekļa koncentrācijas gan ieplūdē, gan izplūdē. Kopējā slāpekļa un nitrātu slāpekļa koncentrācijas, lai gan jau sākotnēji ievērojami zemākas nekā Mežacīruļu objektos, tomēr novērotais samazinājums vai slāpekļa formu proporcijas izmaiņas ir izteikti nenozīmīgas. Var secināt, ka konkrētais mākslīgais mitrājs nedarbojas efektīvi attiecībā uz nitrātu slāpekļa transformāciju. Tas nozīmē, ka visā mitrāja platībā tiek nodrošināti aerobi apstākļi, kas neveicina denitrifikāciju un nenodrošina no tās izrietošu nitrātu slāpekļa pārveidošanu par N_2 .

Lielākā daļa slāpekļa transformācijas tomēr notiek skābekļa klātbūtnē, kā raksta Reddy & Patrick (1984), tad oksidācija no amonija joniem par nitrātiem, tad par nitrātojoniem. Šis slāpekļa transformācijas procesa sākums ir salīdzinoši bieži sastopams notekūdeņu attīrīšanā. Transformācijas dabā prasa zināmu laiku, attiecīgi šajā gadījumā ne vienmēr notekūdeņi tiek noturēti mitrājā pietiekami ilgi, lai slāpekļa transformācijas procesi noritētu līdz galam jeb līdz brīvā gāzveida N_2 izdalīšanai. Transformācijas procesi nenoslēdzās, jo vidē var pietrukt skābekļa, kā rezultātā mitrājs nevis darbojas kā videi draudzīga sistēma, bet veicina N_2O emisijas. Šī slāpekļa gāzveida forma ir siltumnīcefektu izraisoša gāze.

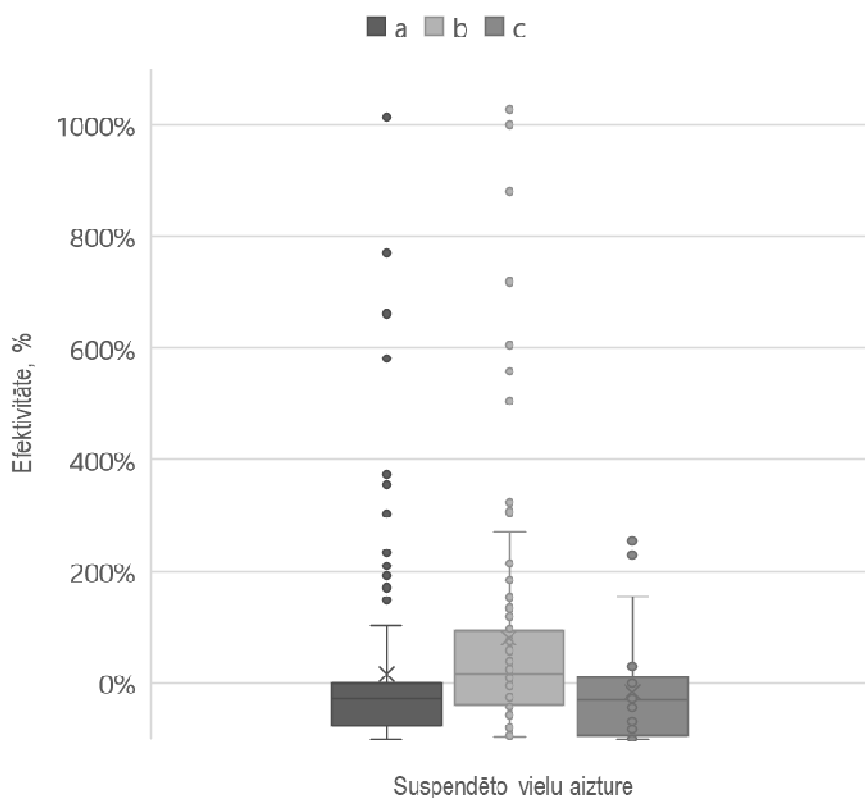
Lai pamatotu, kas notiek konkrētā objektā un vidē, kādas slāpekļa transformācijas, vispirms jānoskaidro, kādos ātrumos notiek procesi, atkarībā no gaisa un ūdens temperatūras un vides pH reakcijas. Jo plūsmas ātrums nosaka notekūdeņu uzturēšanās laiku mitrājā, no kā izriet ķīmiskām reakcijām pieejamais laiks. Un no tā ir atkarīgi transformācijas procesu galaprodukti. Piemēram, Latvijas apstākļos gaisa temperatūras virs $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ būs reti, tātad amonija

jonu iztvaikošana nav teorētiski iespējama (Reddy et.al., 1984). Mitrājs kādā brīdī var darboties kā metāna – siltumnīcefektu izraisošās gāzes emisiju avots.

3.1.3. Suspendēto vielu izmaiņu analīze

Vadoties pēc literatūras par pētījumiem citās valstīs un monitoringa objektos, būtu lietderīgi secinājumos nodalīt suspendētās vielas dažādas konstrukcijas mākslīgos mitrājos, jo virszemes un pazemes plūsmas mitrājos tās pakļautas atšķirīgiem fizikālajiem procesiem. Suspendētās cietās un neizšķīdušās vielas pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā tiek atdalītas galvenokārt filtrācijas ceļā, taču virszemes plūsmas mitrājs izteiktāk darbojas kā sedimentācijas baseins, kur suspendētās vielas gravitācijas ietekmē izgulsnējas mitrāja pamatnē.

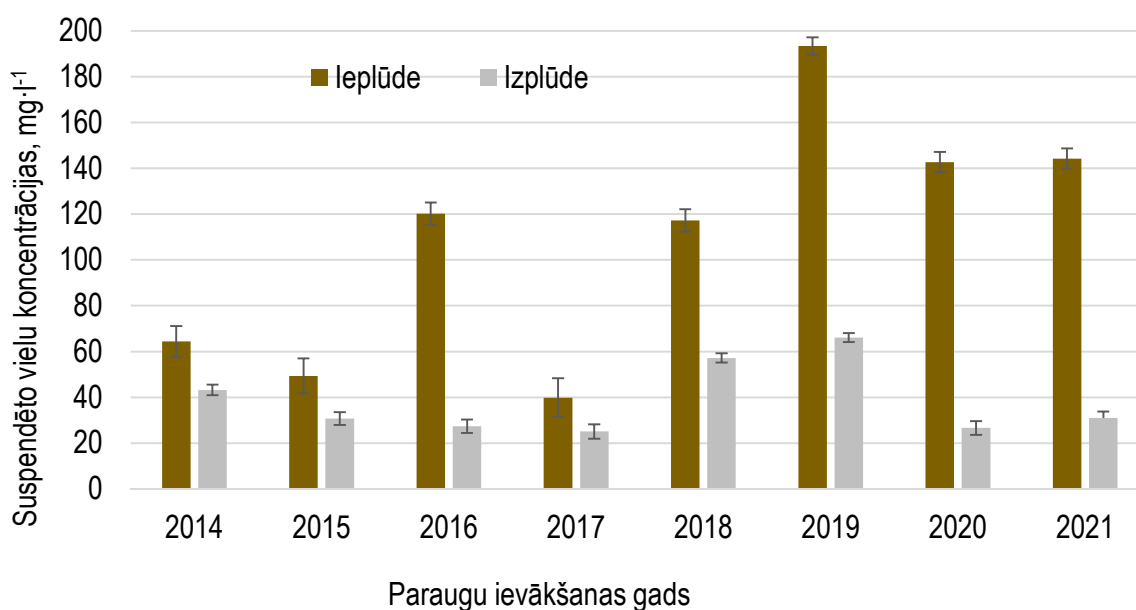
Iegūtās suspendēto vielu ieplūdes un izplūdes koncentrācijas, kā arī aizturēšanas efektivitātes datu kopas neatbilst normālajam sadalījumam visos pētījumu objektos. 3.12. attēlā redzams, ka pazemes plūsmas mitrājs aizturējis suspendētās vielas efektīvi vairumā gadījumu un vidējās efektivitātes pazemināšanos izraisījuši ekstrēmie izņēmuma gadījumi, kas, piemēram, 2016. gadā novēroti četrās no 13, bet 2017. gadā trīs no 18 paraugu ievākšanas epizodēs.



3.12. att. **Suspendēto vielu aizturēšanas efektivitāte**

a) pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos, b) virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos, un c) virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Zantē

Lai izvairītos no izņēmuma gadījumiem, jānovērš notekūdens periodiska pludināšana pāri filtra virspusei. Monitoringa objektā sākotnēji netika pareizi izvēlēta sūkņa jauda, kas pārsniedza infiltrācijas caurules filtrācijas spēju. Eksploatācijas laikā netika pievērsta pienācīga uzmanība infiltrācijas caurules tīrīšanai un sūkņa apkopei, kā rezultātā veidojās neefektīvas ūdens plūsmas trajektorijas un nenotika pilnvērtīga notekūdens kustība cauru visam filtra šķēsgriezumam. Tomēr arī bez minēto nepilnību novēršanas mitrājs uzrādījis ievērojamu potenciālu aizturēt suspendētās vielas visā 8 gadu eksploatācijas laikā, nepazeminot efektivitāti.

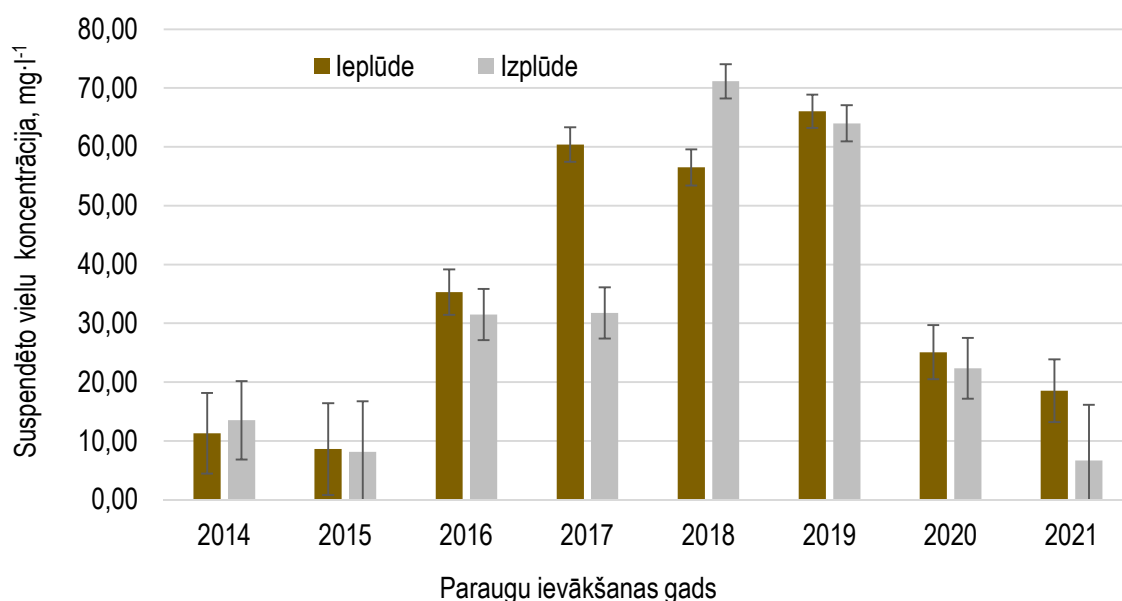


3.13. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos

Pazemes plūsmas mitrājā novērotas mainīgas ieplūstošo suspendēto vielu koncentrācijas pētījuma periodā, taču samazinājums pie izplūdes novērojams visos gados. Tas apliecina, ka ekspluatācijas ietekme uz suspendēto vielu aizturi pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā nav novērota.

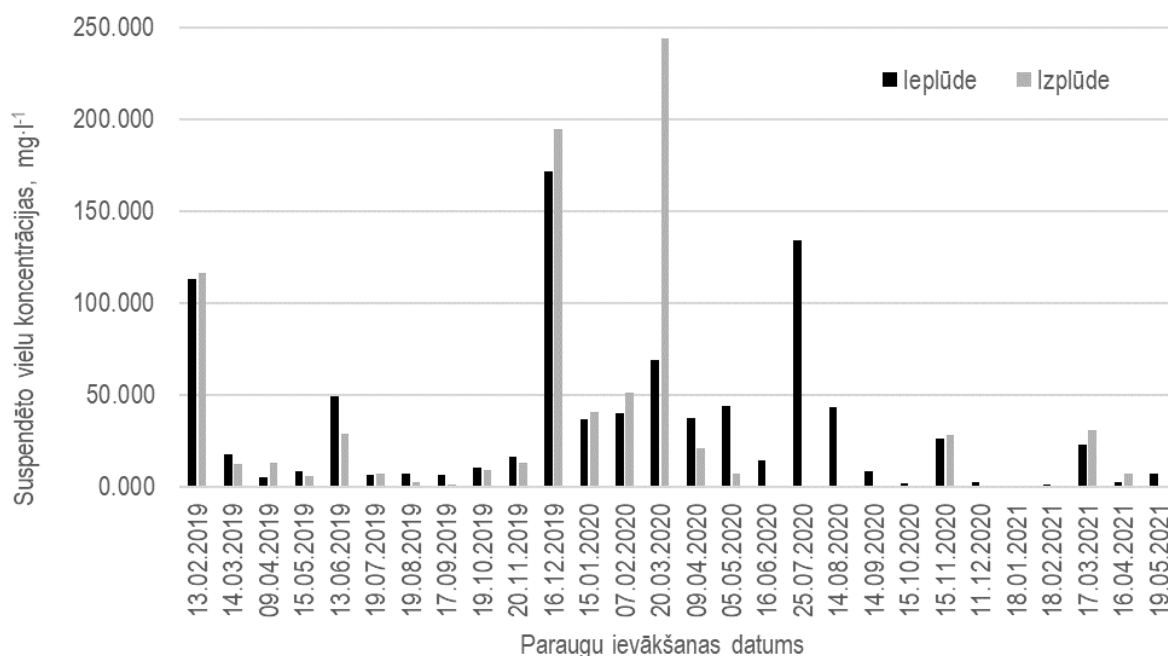
Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos novērotas zemākas suspendēto vielu vidējās koncentrācijas (3.14. attēls), salīdzinot ar tā paša monitoringa objekta pazemes plūsmas mitrājā novērotajiem (3.13. attēls). 2016. gadā avārijas dēļ notikusi neattīrītu notekūdeņu noplūde mitrāja vidusdaļā no vēsturiskas skābarības tvertnes. Precīzs apjoms, ieplūdes laiks vai saturs netika konstatēts, bet no marta līdz septembrim konstatētas slāpekļa savienojumu, īpaši amonija slāpekļa, palielinātas koncentrācijas pie izplūdes. Suspendēto vielu koncentrācijas pie izplūdes laikā no marta līdz maijam visās novērojumu epizodēs pārsniegušas ieplūdes rādītājus. Kā redzams 3.14. attēlā, 2018. gadā pie izplūdes novērotas par 26% augstākas vidējās koncentrācijas nekā pie ieplūdes. Aplūkojot datus šajā gadā, no 21 paraugu ievākšanas epizodes tikai 6 epizodēs pie izplūdes suspendēto vielu koncentrācija samazinājusies. Šajā gadā lauksaimnieciskā darbība tika veikta abās mitrāja ūdenskrātuves pusēs un lauka apstrādes laikā tika bojāta mitrāja nogāze, kā rezultātā mitrāja vidusdaļā ūdens tika saduļķots un augsne, augi un mēslojuma daļas nezināmā apjomā iekļuva mitrājā.

Virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos suspendēto vielu aizture pētījuma periodā ir mainīga. Pirmajā ekspluatācijas gadā, t.i., 2014. gadā suspendētās vielas nav aizturētas, kas skaidrojams ar veģetācijas nozīmi suspendēto vielu aizturēšanā. Veģetācija veicina suspendēto vielu izgulsnēšanos un mākslīgo mitrāju ekspluatācijas sākuma posmā, kad veģetācija vēl nav izplatījusies un izaugusi, suspendēto vielu aizture var neuzrādīt savas maksimālās iespējas. Turklāt būvniecības laikā radītais uzduļķojums var ietekmēt mērījumu rezultātus. Izteiktas suspendēto vielu koncentrāciju atšķirības novērotas pie ieplūdes mitrājā, 2017., 2018. un 2019. gadā uzrādot ap 60 mg·l⁻¹. 2018. gada griezumā suspendēto vielu koncentrācija pie izplūdes bijusi augstāka par ieplūdes koncentrāciju, kur var secināt, kā iepriekšējos monitoringa gados aizturētās suspendētās vielas tikušas uzkrātas sedimentos un uzduļķošanas rezultātā notikusi otrreizēja piesārņošanās.



3.14. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas un standartklūdas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos

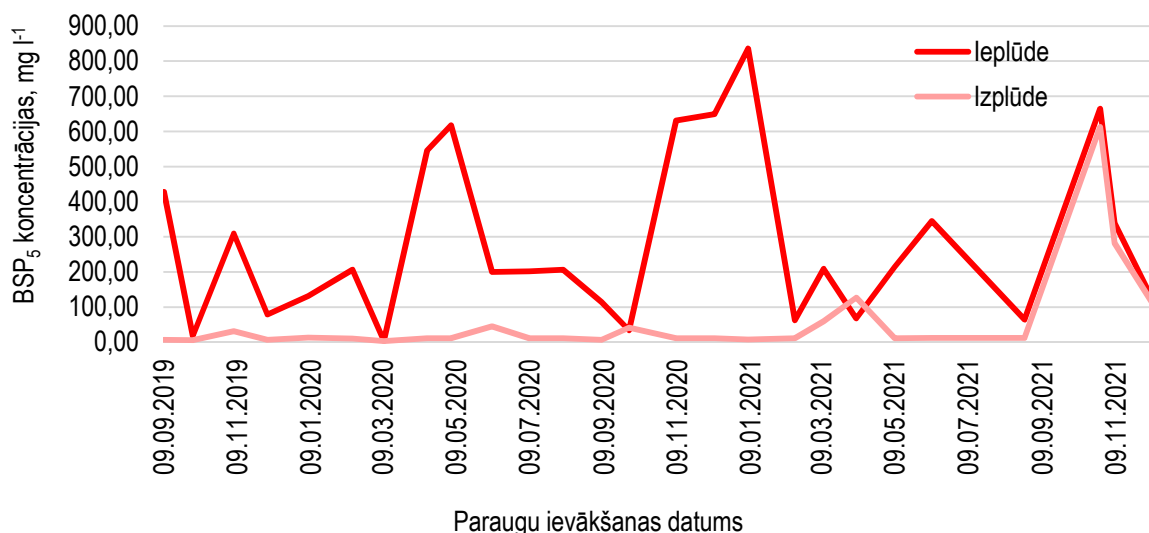
Virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Zantē suspendēto vielu koncentrācijas (3.15. attēls) 2019. un 2021. gadā vidēji nav samazinātas, bet 2020. gadā samazinātas vidēji par 35%. 2020. gada martā konstatēts straujš suspendēto vielu koncentrācijas pieaugums pie izplūdes, kas varētu būt saistīts ar epizodisku virszemes noteces ieplūdi mitrāja vidusdaļā un uzskatāms par eksploatācijas kļūdu. Līdzīgi kā pētījumu objektos Mežacīruļos, arī Zantē izteikta eksploatācijas ietekme uz suspendēto vielu aizturēšanas efektivitāti nav novērota.



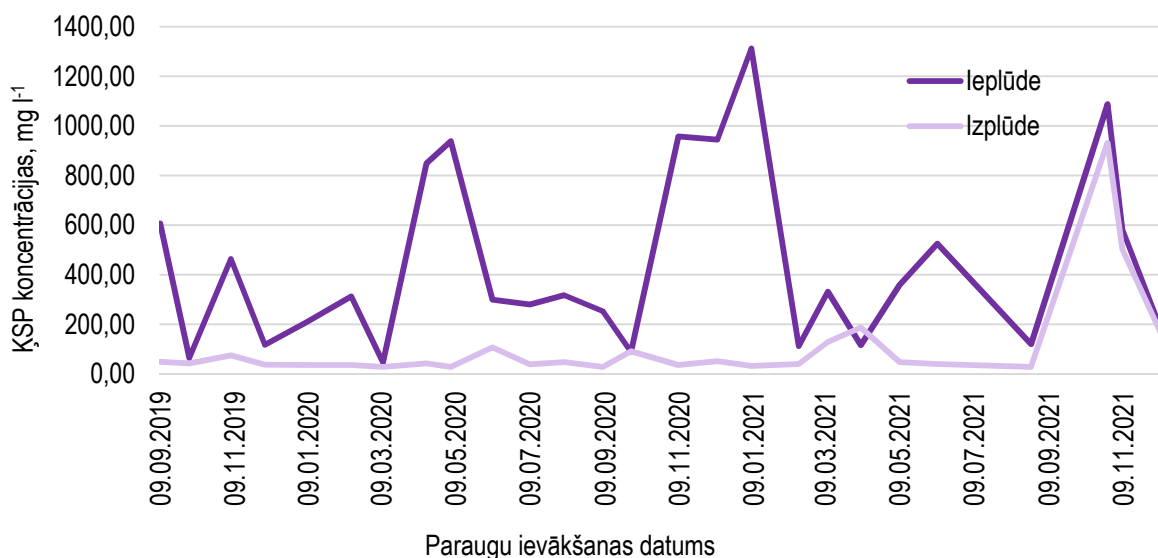
3.15. att. Vidējās suspendēto vielu koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes no virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē

3.1.4. BSP₅ un ĶSP izmaiņu analīze pazemes plūsmas mitrājā

Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos tika projektēts un būvēts lietusūdeņu attīrīšanai. Tomēr monitoringa laikā tika konstatēts, ka ieplūstošais notekūdens vizuālo parametru ziņā periodiski liecina par augstu organisko vielu sastāvu. Aplūkojot 3.16. un 3.17. attēlā un 3.2. tabulā ievietotos datus par novērotajām ieplūstošo BSP₅ un ĶSP koncentrācijām, redzams, ka notekūdens ne vien pietuvojas, bet periodiski pārsniedz LR MK noteikumus (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002) iekļautās tipisku sadzīves notekūdeņu koncentrācijas. Pētījumu objektā vidējās BSP₅ un ĶSP koncentrācijas pie ieplūdes novērotas attiecīgi 281 un 442 mg·l⁻¹.



3.16. att. BSP₅ koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos



3.17. att. ĶSP koncentrācijas pie ieplūdes un izplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

Attēlā redzams, ka novērojumu periodā no 2019. līdz 2020. gadam pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos darbojies izteikti efektīvi, samazinot piesārņojumu katrā no novērojumu epizodēm, un periodā līdz 2020. gada decembrim sasniedzot vidēji 87% un 80% samazinājumu BSP₅ un ĶSP koncentrācijām. Abi šie rādītāji ir savstarpēji cieši saistīti, par ko

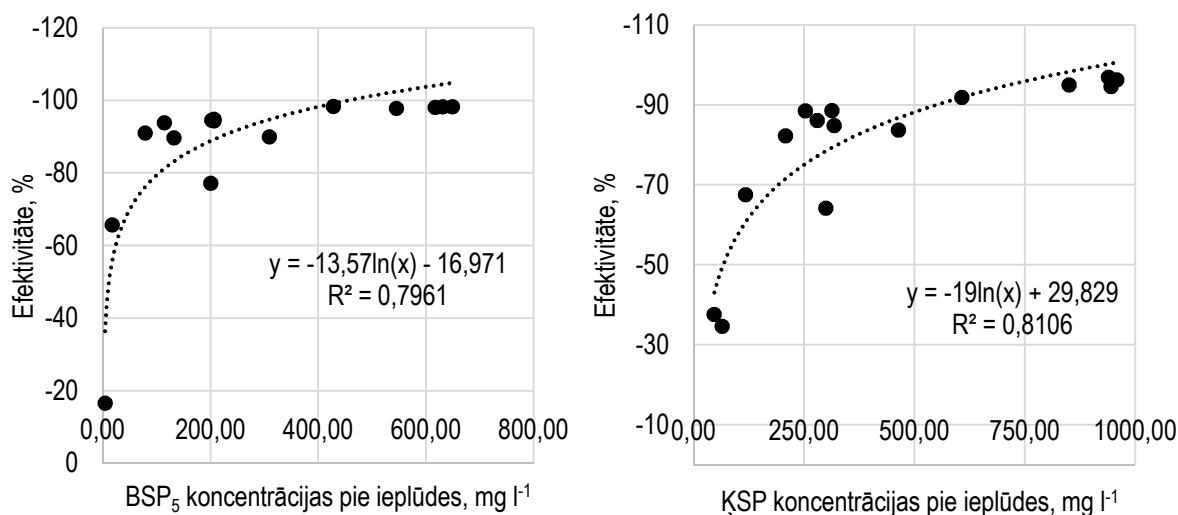
liecina iegūtie rezultāti. 2021. gada pavasarī redzams neilgs periods, kur BSP₅ un ŪSP koncentrācijas izplūdē pārsniedz ieplūdes rādītājus. Sākot ar 2021. gada septembri, abu rādītāju attīrīšanas efektivitāte samazinās līdz vidēji 12%. Šajā periodā monitoringa ietvaros tika novērotas vairākas ekspluatācijas kļūdas, kas netika savlaicīgi novērstas. Infiltrācijas caurule netika skalota, lai gan virs mitrāja filtra periodiski bija novērojams virsūdens. Notekūdens tika sūknēts pa vienu cauruli un izkļiedēts blakus mitrāja izplūdes daļai, nedodot iespēju notekūdenim filtrēties cauru filtra daļai, bet veicinot praktiski neattīrītu notekūdeņu strauju pārplūdi uz izteku. Tas rezultējies ar izteiktu piesārņojuma attīrīšanas efektivitātes samazināšanos minētajā ekspluatācijas laikā.

3.2. tabula. Analizēto ūdeņu kvalitātes parametru vidējās koncentrācijas, vidējā aizturēšanas efektivitāte, koncentrāciju un piesārņojuma aizturēšanas efektivitātes mediānas

Ūdeņu kvalitātes parametrs	Vidējā koncentrācija, mg·l ⁻¹		Koncentrāciju, mg·l ⁻¹ , mediāna		Vidējā aizturēšanas efektivitāte*, %	Aizturēšanas efektivitātes*, % mediāna
	Ieplūde	Izplūde	Ieplūde	Izplūde		
BSP ₅	280.62	57.15	206.00	11.50	-67	-91
ŪSP	441.54	110.93	315.50	42.45	-63	-83

*Poitīvs efektivitātes rādītājs nozīmē ūdeņu kvalitātes rādītāju palielināšanos pie izplūdes, bet negatīvs efektivitātes rādītājs liecina par piesārņojošās vielas koncentrācijas samazināšanos pie izplūdes.

Mitrāja darbības efektivitātes novērtēšanai, ņemot vērā atšķirīgus ekspluatācijas nosacījumus un citus ietekmējošos faktorus pētījumu periodā, izmantoti ne vien vidējie rādītāji, bet arī ieplūdes un izplūdes koncentrāciju un attīrīšanas efektivitātes mediānu vērtības. Minēto statistisko rādītāju rezultāti apkopoti 3.2. tabulā. Visā novērojumu periodā attīrīšanas efektivitātes mediāna BSP₅ un ŪSP samazinājumam sasniegta attiecīgi 91% un 83%.



3.18. att. BSP₅ un ŪSP attīrīšanas efektivitātes atkarība no šo parametru koncentrācijām pie ieplūdes pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

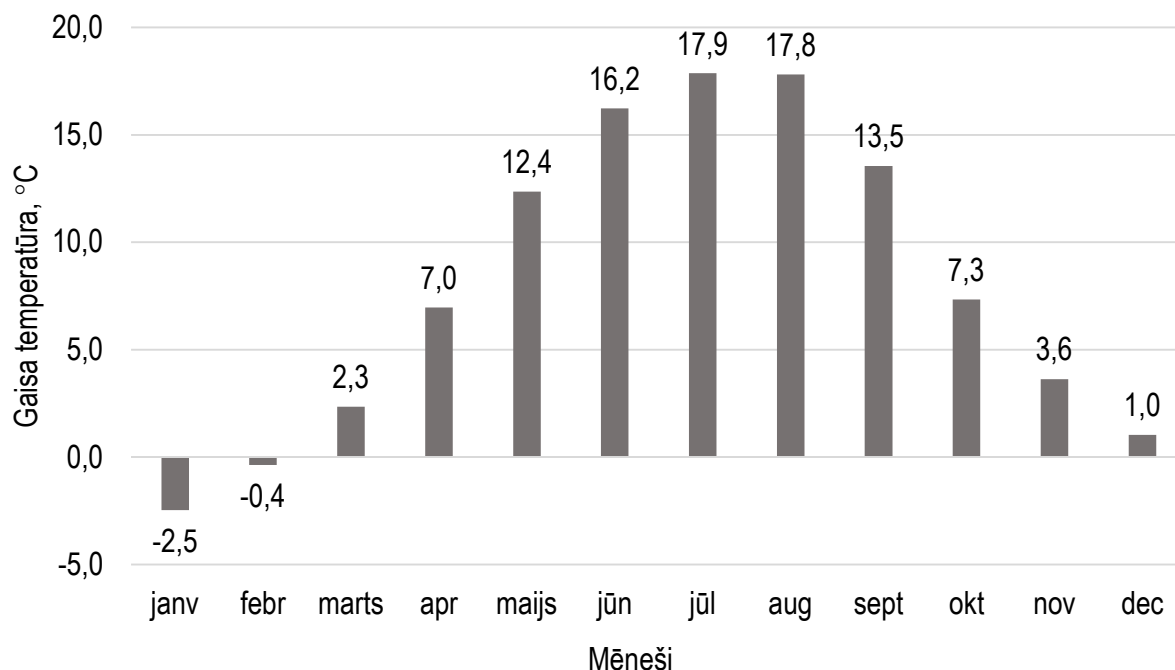
Attēlā parādīta sakarība starp BSP₅ koncentrācijām pie ieplūdes un BSP₅ samazināšanas efektivitāti, un analogi sakarība starp ŪSP koncentrācijām pie ieplūdes un ŪSP samazināšanas efektivitāti. Attēlā iekļauts pētījumu periods no 2019. līdz 2020. gadam. Attēls parāda salīdzinoši ciešu ($R^2=0.7961$ un $R^2=0.8106$) sakarību starp BSP₅ un ŪSP attīrīšanas efektivitāti un ieplūstošā notekūdens koncentrāciju. Tātad var secināt, ka, jo augstāka organisko vielu

koncentrācija ieplūstošajā notekūdenī, jo efektīvāk mitrājs darbojas. Vidēji novērojumu periodā BSP₅ un ĶSP attīrīšanas efektivitāte tika novērota attiecīgi 67% un 63%, kas ir pietiekami augsta pēc LR MK kritērijiem par atbilstošu sadzīves notekūdeņu attīrīšanu iekārtām ar CE 200 - 2000 (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002), un var pieņemt, ka konkrētajam pazemes plūsmas mitrājam ir potenciāls sekmīgi attīrīt arī augstākas piesārņojošo vielu koncentrācijas. Šādu secinājumu gan nevar izdarīt par novērotajiem biogēnajiem elementiem un suspendētajām vielām.

3.2. Piesārņojuma izmaiņu dinamika pa sezonām

Sezonālās gaisa temperatūras svārstības un meteoroloģiskie apstākļi var būtiski ietekmēt mākslīgā mitrāja darbības efektivitāti un izejošā ūdens kvalitāti (Valkama et.al., 1017). Reddy & Patrick (1984) raksta, ka temperatūrām, kas zemākas par 15 °C, ir negatīva ietekme uz nitrifikācijas procesu. Pētījumā iekļautos objektos mākslīgie mitrāji kopumā turpina darboties arī gada aukstajā laikā, kad gaisa temperatūra ir zem 0 °C. Pazemes plūsmas mitrājs Mežacīruļos apmierinoši darbojas 8 gadu novērojumu periodā. Niedres, kas rudenī netiek novāktas no mitrāja virsmas, kalpo kā papildu nodrošinājums pret aizsalšanu. Mehānisko piemaisījumu atdalīšana ar sedimentāciju vai filtrāciju turpinās neatkarīgi no temperatūras, ja vien ūdens nav sasalis. Filtra iekšpusē notiek bioķīmiskie procesi, kuros organisko vielu sadalīšanās un bioloģiskā aktivitāte ir pietiekama, lai kavētu filtra pazemes slāņu sasalšanu. Notekūdens attīrīšana turpinās arī zem ledus. Lai kompensētu zemo temperatūru radīto notekūdens attīrīšanas procesu palēnināšanos, var palielināt mitrāja platību un filtra daļas vai ūdens slāņa dziļumu (General consideration, 1995).

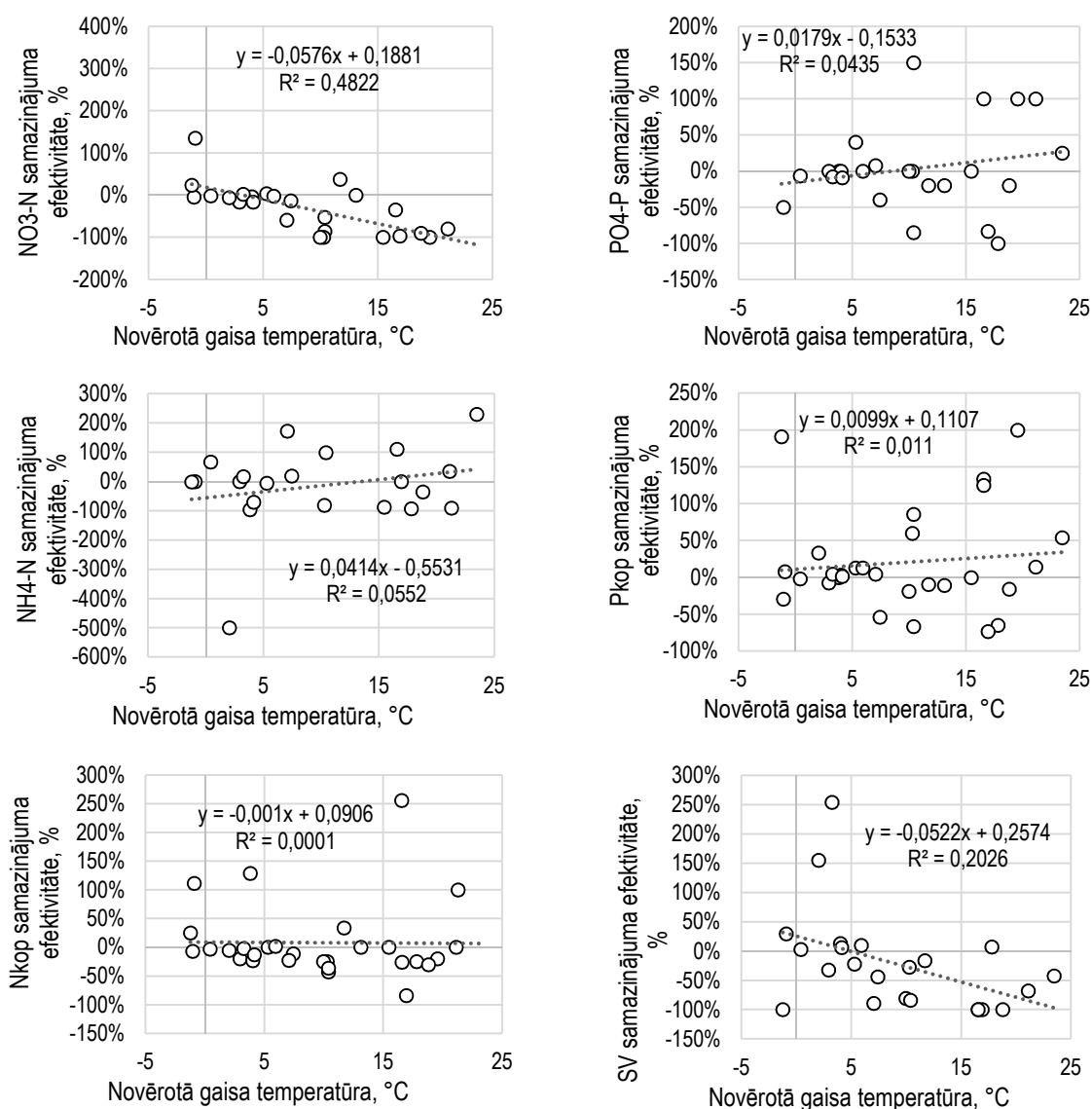
Vidējā gaisa temperatūra pētījumu objektiem tuvākajā meteoroloģisko novērojumu stacijā periodā no 2014. gada jūnija līdz 2020. gada decembrim konstatēta 8 °C, minimālā gaisa temperatūra -19.1 °C un maksimālā 26.3 °C. Vidējo novēroto gaisa temperatūru sadalījums pa mēnešiem attēlots 3.19. attēlā, kā gada aukstāko mēnesi konstatējot janvāri, bet kā karstāko – jūliju.



3.19. att. Vidējā novērotā gaisa temperatūra Dobeles novērojumu stacijā pa mēnešiem no 2014. līdz 2020. gadam

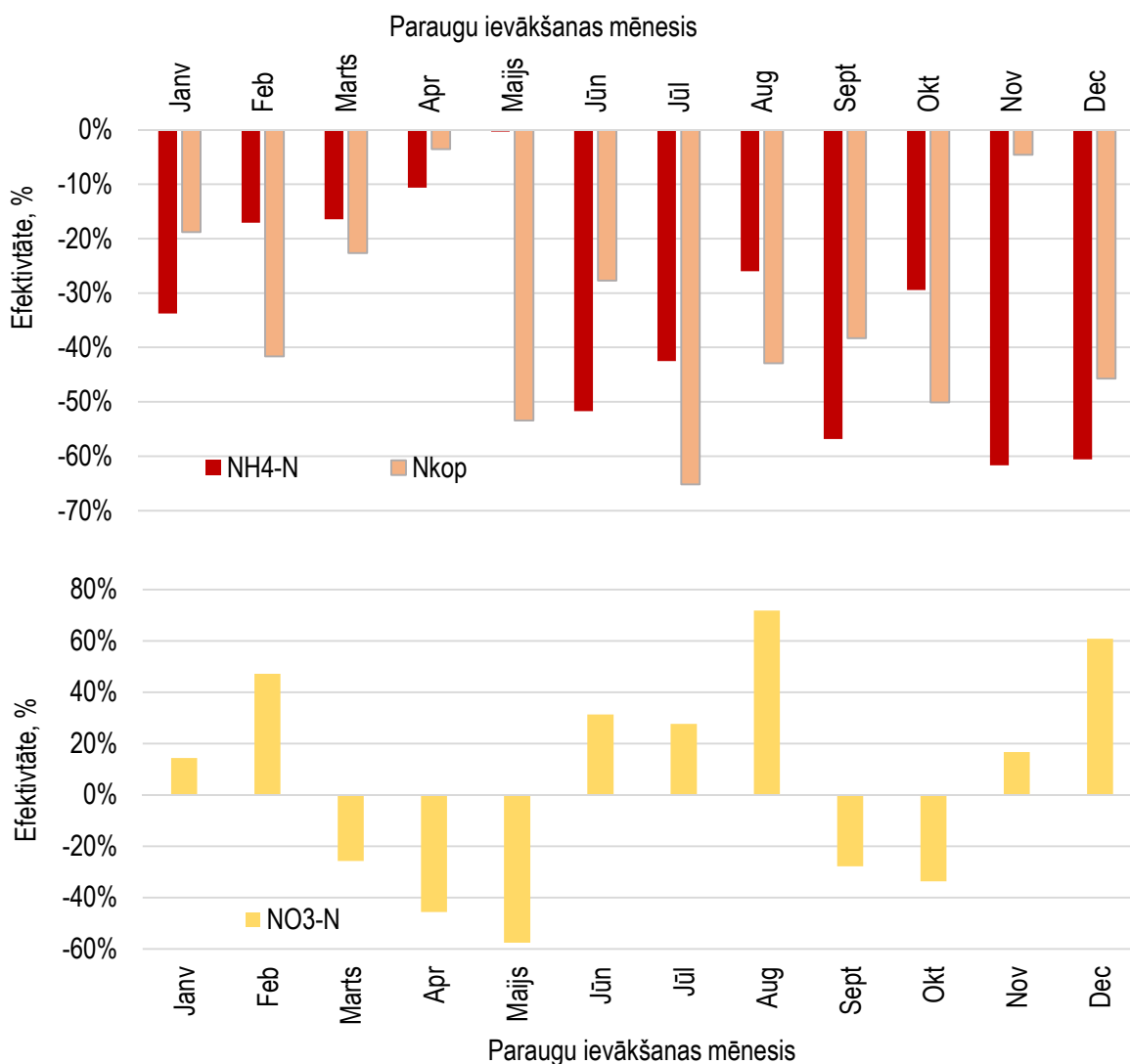
Gaisa temperatūra dažādās publikācijas minēta kā viens no nozīmīgākajiem attīrīšanas efektivitāti ietekmējošiem faktoriem (Kamilia et.al., 2022). Tas pamatots ar temperatūras ietekmi uz baktēriju darbību un aktivitāti (Singh et.al., 2022), kas ir pamatā nitrifikācijas un denitrifikācijas procesiem. Ļoti zema temperatūra izraisa priekšlaicīgu makrofītu bojāeju, un notekūdeņu sasaldšana var apturēt filtrāciju.

Meklējot statistisku sakarību starp dažādu novēroto ūdeņu kvalitātes rādītāju attīrīšanas efektivitāti un meteoroloģiskajā stacijā reģistrētajām gaisa temperatūrām, izmantota statistikas metode Pīrsona korelācijas koeficienta noteikšanai. Ūdeņu kvalitātes parametru samazināšanas efektivitātes un gaisa temperatūras lineārā sakarība ir ļoti vāja ($R^2 < 0.2$). Pazemes un virszemes plūsmas mitrājos Mežacīruļos un Zantē statistiski nav atrasta sakarība starp novērotajām vidējām gaisa temperatūrām parauga ievākšanas dienā un analizēto ūdeņu kvalitātes rādītāju samazināšanas efektivitāti. Skaitliski lielākā R^2 vērtība 0.48 noteikta virszemes plūsmas mitrējā Zantē nitrātu slāpekļa samazināšanas efektivitātei (3.20. attēlā). Tādējādi var secināt, ka gaisa temperatūra arī ziemas apstākļos būtiski neietekmē mitrāja darbības efektivitāti attiecībā uz fosfora savienojumu un suspendēto vielu aizturēšanu. Bet gaisa temperatūra ietekmē nitrātu slāpekļa koncentrāciju samazināšanos virszemes plūsmas mākslīgajā mitrējā, jo pie zemām gaisa temperatūrām tiek palēnināti denitrifikācijas procesi.



3.20. att. Ūdeņu kvalitātes parametru samazināšanas efektivitātes un novērotās gaisa temperatūras savstarpējā atkarība virszemes plūsmas mākslīgajā mitrējā Zantē

Visas novēroto parametru attīrīšanas efektivitātes sadalītas pa paraugu ievākšanas mēnešiem, lai kompleksi novērotu sezonālās izmaiņas. Pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā 3.20. attēlā demonstrēta slāpekļa savienojumu aizturēšanas efektivitāte. Šī objekta attīrāmajā notekūdenī novērota lielāka amonija slāpekļa proporcija, kas ietekmē arī kopējā slāpekļa izmaiņas. Amonija slāpekļa un kopējā slāpekļa aizturēšanas efektivitāte samazinās no janvāra līdz aprīlim, kopējam slāpeklim, aprīļa mēnesī sasniedzot 4% samazinājumu, un amonija slāpeklim maija mēnesī sasniedzot 0% jeb neitrālu līmeni. Nitrātu slāpekļi šajā laikā no marta līdz maijam pretēji uzrādījuši augstāko novēroto aizturēšanas un pārveidošanas efektivitāti, vidēji 26, 46 un 58%. Šajā laikā pie salīdzinoši zemām gaisa temperatūrām robežās vidēji no 2.3 – 12.4 °C un salīdzinoši augsta caurplūduma iespējamu pavasara palu un sniega kušanas dēļ, amonija jonu pārveidošanās notikusi lēnāk. No jūnija līdz augustam novērotās gaisa temperatūras bijušas visaugstākās, vidēji 16.2 – 17.9 °C, un tas ir labvēlīgi slāpekļa savienojumu pārveidošanās procesiem, var pieņemt, ka amonija slāpekļa koncentrācijas samazinājušās, jo tie tikuši pārveidoti nitrātu formā, kas redzama 3.21. attēlā nitrātu slāpekļa attīrīšanas efektivitātes samazinājuma veidā. Respektīvi, nitrātu slāpekļa koncentrācijas no jūnija līdz augustam palielinājušās aktīvas nitrifikācijas dēļ.

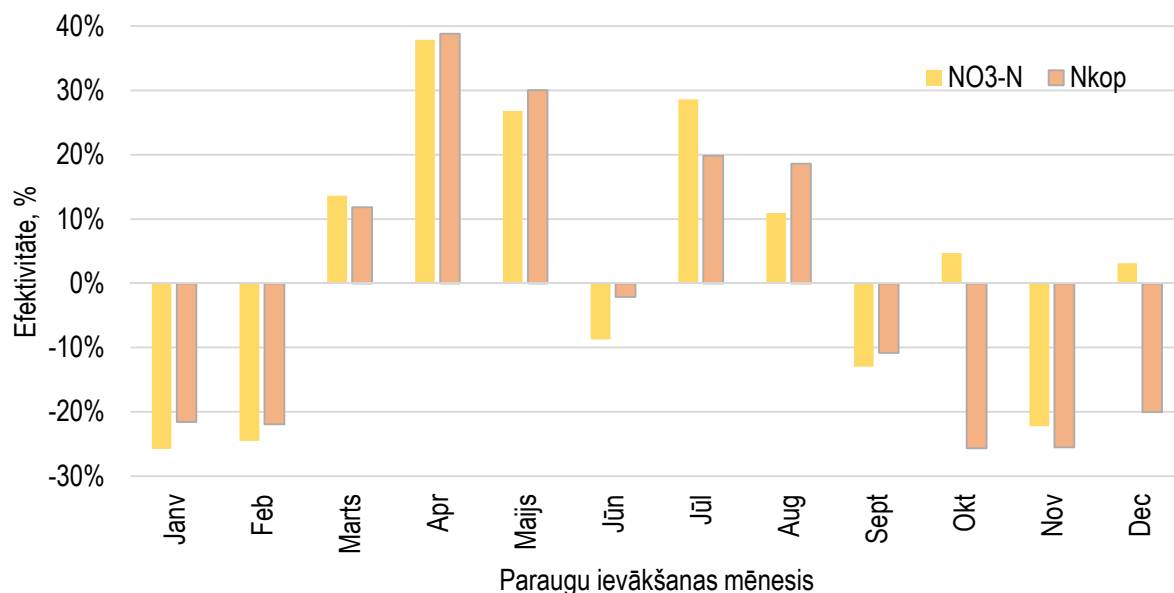


3.21. att. Slāpekļa savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem pazemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežaciruļos



3.22. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos vasarā un ziemā

Abos pētījumā iekļautos virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos tiek attīrīta tipiska drenu notece no lauksaimniecības platībām, un jau ienākošajā ūdenī dominē nitrātu slāpekļi, kamēr amonija slāpekļa koncentrācija ir zema. Arī mitrāja darbībā jāpievērš lielāka uzmanība nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa attīrīšanas efektivitātei. 3.23. attēlā redzama salīdzinoši tieša sezonālā ietekme, taču pretēji gaidītajam attīrīšanas efektivitāte gada siltākajā periodā samazinās. Var secināt, ka baktēriju darbība ir traucēta, neļaujot notikt denitrifikācijas procesam un nitrātu slāpekļa pārveidošana ir kavēta. Rezultāti norāda, ka marta, aprīļa, maija, jūlija un augusta mēnešos nitrātu un kopējā slāpekļa koncentrācijas pie izplūdes ir bijušas augstākas nekā pie ieplūdes, respektīvi, mitrājs ir radījis pretēju efektu vēlamajam. Tam par iemeslu var kalpot nekorekta apsaimniekošanas prakse, kur ūdensaugi rudenī vai pavasarī netiek aizvākti, radot papildu slāpekļa avotu. Kā arī intensīva lauksaimniecība abos mitrāja krastos tuvu nogāzei rada tiešu nitrātu slāpekļa ieplūdi mitrāja vidusdaļā, kas netiek kontrolēta vai uzskaitīta.

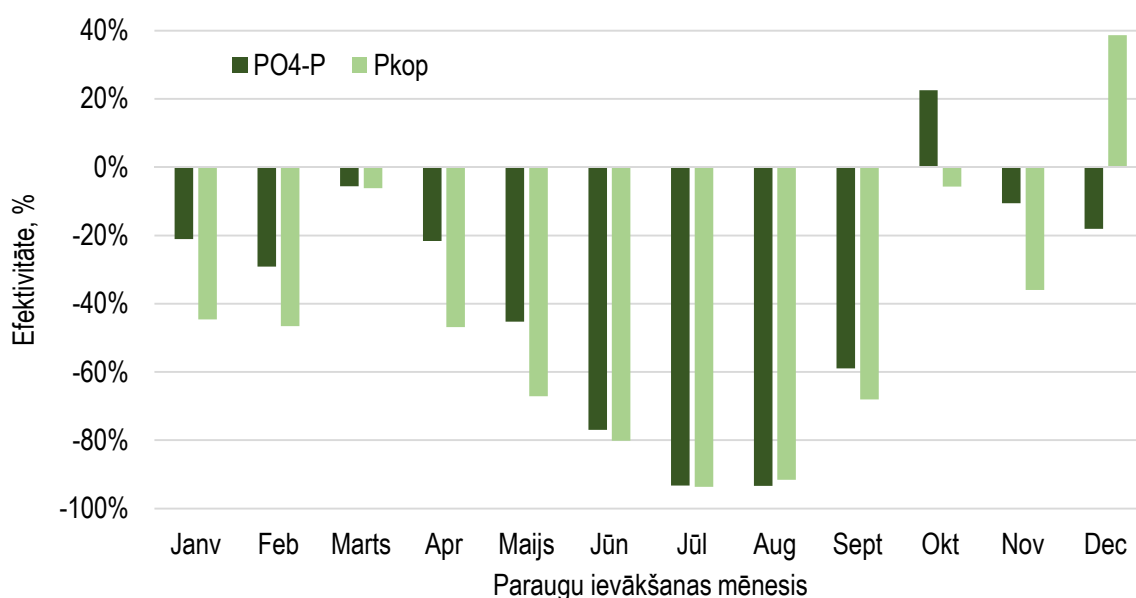


3.23. att. Nitrātu slāpekļa un kopējā slāpekļa attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgā mitrājā Mežacīruļos

Mežacīruļos jūnija mēnesis uzrāda netipisku rezultātu, ar izteiktu darbības maiņu. Cita tendence novērota Zantes pētījumu objektā, zemāko slāpekļa savienojumu attīrīšanas efektivitāti uzrādot februāra, marta un aprīļa mēnešos.

Fosfora savienojumu aizturi sezonalitāti var ietekmēt galvenokārt plūsmas ātruma izmaiņas. Pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja kopējā fosfora attīrīšanas efektivitāte vidēji visā periodā novērota 46%. Pazemes plūsmas mitrājs (3.24. attēlā) uzrāda saistību ar sezonalitāti, vasaras mēnešos jūlijā un augustā sasniedzot augstāko kopējā fosfora attīrīšanas efektivitāti vidēji 94% un 92%.

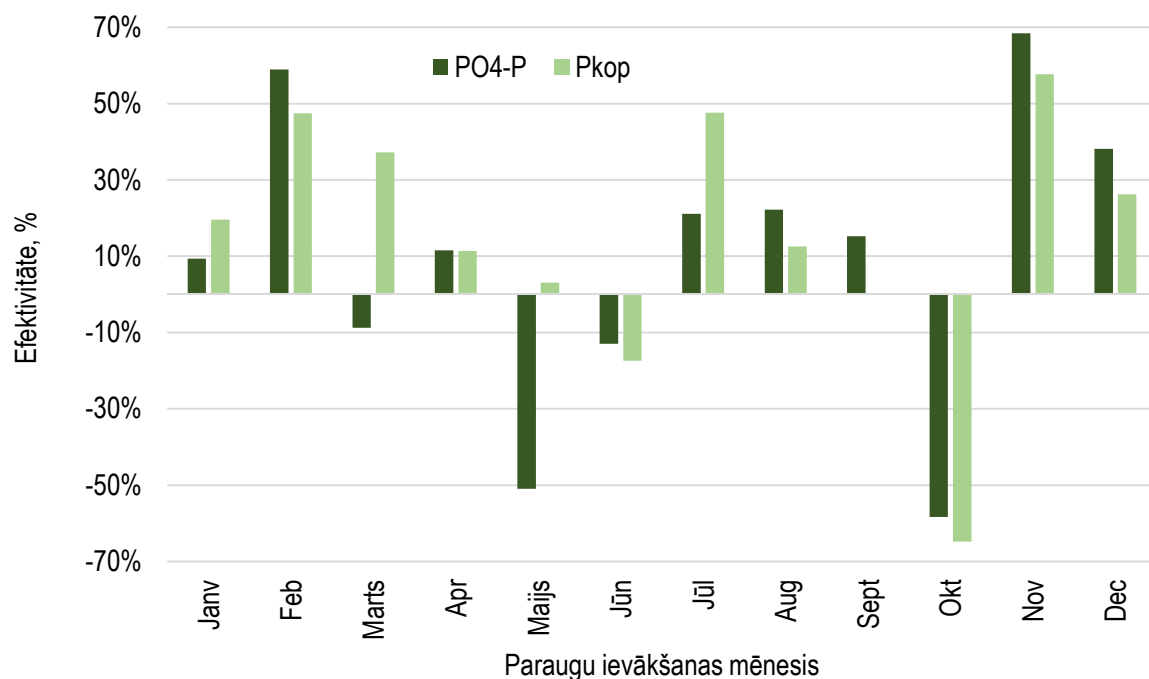
Zemākā efektivitāte, ar fosfora savienojumu koncentrācijas palielinājumu pie izplūdes, novērota oktobrī un decembrī. Var secināt, ka pazemes plūsmas mitrājā, kur notekūdeņu attīrīšana norisinās filtra slānī, kompleksa sezonālā ietekme ir novērojama, kur vasaras mēnešos efektivitāte ir paaugstinājusies. Tā kā tieša temperatūras ietekme netika konstatēta, tad veģetācija varētu būt nozīmīgs faktors fosfora savienojumu aizturēšanas paaugstināšanai veģetācijas periodā.



3.24. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

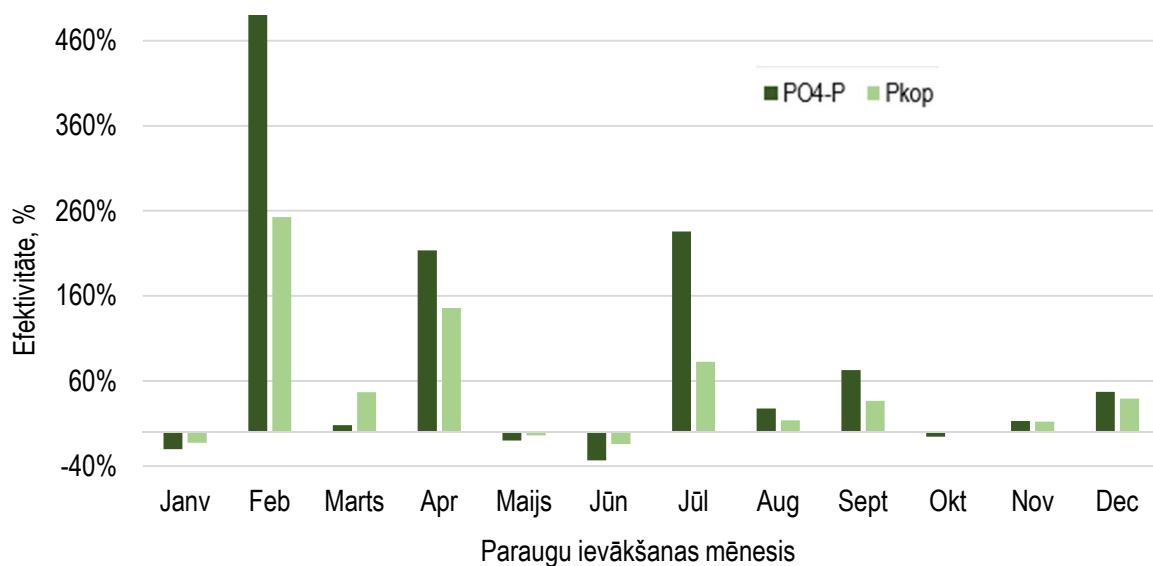


3.25. att. Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos vasarā un ziemā



3.26. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2014. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos

Ortofosfātu fosfora un kopējā fosfora aizture virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā Mežacīruļos visā monitoringa periodā nav novērota, attiecīgi +15% un +9%, kas nozīmē, ka vidēji nav panākta fosfora savienojumu attīrīšana no lauksaimniecības noteces, izņemot oktobra mēnesī attiecīgi -58% un -65%, un efektīvas epizodes marta, maija un jūnija mēnešos. Virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji Mežacīruļos un Zantē neuzrāda kopēju vai savstarpēji saistītas tendences fosfora savienojumu aizturēšanā (3.26 un 3.27. attēls). Tādējādi iespējams secināt, ka fosfora aizturēšanai virszemes plūsmas mitrājā nav sezonāla ietekme.



3.27. att. Fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte monitoringa perioda laikā no 2018. gada līdz 2021. gadam pa mēnešiem virszemes plūsmas mākslīgā mitrāja Zantē

Secinājumi par piesārņojuma izmaiņām pēc monitoringa datiem dažādas konstrukcijas mākslīgajos mitrājos Latvijā.

Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos BSP₅ un ĶSP attīra stabili un efektīvi, tur ieplūdes daļā raksturīga aeroba vide, jo samazina amonija slāpekļa koncentrācijas, un filtra apakšējā daļā pie izplūdes vai vidus daļā ir anoksa vai aneroba vide, jo samazina arī nitrātu slāpekļa koncentrācijas. Fosfora savienojumus kopumā aiztur ar augstu efektivitāti, jo filtra materiāls ir piemērots fosfora piesaistīšanai un veģetācija devusi labvēlīgu ietekmi uz fosfora savienojumu aizturi, iespējams, daļu fosfora savienojumu izmantojot savai augšanai. Gaisa temperatūrai nav ievērojamas ietekmes uz ūdeņu kvalitātes parametru samazināšanas efektivitāti, bet sezonālībai ir ietekme drīzāk mainīga caurplūduma un veģetācijas dēļ, taču tas nav viennozīmīgi, bet jāvērtē kompleksi. Ievērojama negatīva ietekme uz BSP₅ un ĶSP samazināšanu ir nepiemērotai ekspluatācijai.

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrāji pētījumu objektos uzrāda nestabilu efektivitāti attiecībā uz piesārņojošo vielu aizturēšanu. Liela nozīme varētu būt veģetācijai, kas veicina bakterioloģisko aktivitāti un suspendēto vielu aizturi. Tā kā galvenā piesārņojuma aiztures un pārveidošanas aktivitāte norisinās vaļējā ūdens slānī, tad gaisa temperatūra atstājusi nelielu ietekmi uz nitrātu slāpekļa aizturēšanas efektivitāti Zantē, taču kopumā sezonālā ietekme nav novērota. Virszemes plūsmas mākslīgie mitrāji papildu ūdeņu kvalitātes uzlabošanas funkcijai piedāvā dažādus papildu ieguvumus, pētījumu objektos nodrošinot ūdens resursus apūdeņošanas vajadzībām mitruma deficīta laikā veģetācijas periodā.

3.3. Aprēķinu modeļa pielietojums

Aprēķinu modeļa izmantošana paredzēta, par pamatu ņemot konkrēta objekta izmērāmus izejas datus, atkarībā no attīrāmā notekūdeņu veida. Lai aprobētu pētījuma ietvaros sagatavoto aprēķinu modeli un tādējādi pamatotu sagatavoto mākslīgo mitrāju aprēķinu metodiku, izmantoti trīs šajā pētījumā iekļauto mākslīgo mitrāju monitoringa objekti – divi virszemes plūsmas un viens pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs. Modelis pieejams tiešsaistē <https://lauvas.area.lv/MM/>. Modelī ievadīti izmērāmie izejas dati par katru no pētījumu objektiem un iegūti rezultāti par piemērotāko mākslīgā mitrāja konstrukciju un ieteicamo virsmas laukumi. Modeļa skati datu ievades laikā un rezultātu iegūšanas laikā ievietoti darbā attēlu veidā. Iegūtie parametri salīdzināti attiecīgajiem konstruktīvajiem parametriem pētījumu objektos un pamatoti ar pētījumu rezultātiem promocijas darba 3.1. un 3.2. apakšnodaļā.

Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos uztver lietus ūdeņus no zemnieku saimniecības pagalma teritorijas. Pēc apjoma uztvertais lietus ūdens daudzums atbilst aprēķinu modeļa izvēlei “Lietus notekūdeņi” (2.14. attēls), taču pēc paredzamās ūdeņu kvalitātes atbilst izvēlei “Lauksaimniecības notekūdeņi”. Modelī ir iekļauta izvēle, kas atbilst šādiem gadījumiem. Izdara izvēli “Lauksaimniecības notekūdeņi” un tālāk “Virszemes notecē no pagalma”. Šajā izvēlē modelis ņem vērā ūdeņu apjomu, kas veidojas atbilstoši lietus ūdeņu pieplūdes režīmam, un attīrāmo notekūdeņu kvalitāti pieņem līdzvērtīgu tipisku sadzīves notekūdeņu sastāvam, vērtējot pēc slāpekļa un fosfora savienojumu provizoriskā satura, kā arī pēc organisko vielu iespējamā daudzuma, balstoties uz BSP₅ un ĶSP koncentrācijām. Šāda modeļa izvēle balstīta uz šī pētījuma 3.1. un 3.2. nodaļā iegūtajiem rezultātiem par novērotajiem virszemes noteces parametriem monitoringa objektā Mežacīruļos, kā arī vispārīgi novērtējot virszemes noteces apsaimniekošanas praksi zemnieku saimniecību pagalmos Latvijā.

Pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos sākotnēji tika projektēts, tikai balstoties uz sagaidāmo ūdens apjomu, rēķinot aprēķina lietus ūdens daudzumu.

☒ Virszemes notece no pagalma	
☐ Drenētas aramzemes sateces baseina laukums, ha	Attālums no tālākās gūlijas līdz maģistrālei, m
Būvju jumti, ceļu asfaltbetona segumi, m ²	150
6237	Tuvākā apdzīvotā vieta
Kalto akmeņu bruģis, ceļu melnie šķembu segumi, m ²	Jelgava
	Rādītājs n, atkarībā no pilsētas un P (gadi) atkārtotības
Apaļo akmeņu bruģis, m ²	0.72
	Vidējais nokrišņu slānis (mm) atkarībā no pilsētas
Ar saistvielām neapstrādātu šķembu ceļu segumi, m ²	32.3
	Lietus intensitāte q 20 (l/s ha) atkarībā no pilsētas un varbūtības P
Dārzu un parku grants celiņi, m ²	43.6
	Vidējais diennakts nokrišņu daudzums gada siltajā sezonā (mm), atkarībā no pilsētas
Planēta grunts (dobes, puķudobes), m ²	155
	Aprēķināt
Zālāji, m ²	
1863	

3.28. att. **Modeļa datu ievades skats pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežaciruļos**

Izvērtējot monitoringa rezultātus un mitrāja darbības efektivitāti attiecībā uz ūdeņu kvalitātes uzlabošanu, var secināt, ka monitoringa objekta projektēšanas laikā izdarīta pareiza izvēle attiecībā uz mitrāja konstrukciju, taču virsmas laukums izvēlēts mazāks, nekā būtu nepieciešams. Šie secinājumi iestrādāti modeļa aprēķinā, kas demonstrēts 3.28. attēlā. Modelī ievadītie izejas dati projektēšanai iegūti empīriskā ceļā, izdarot attiecīgus mērījumus topogrāfiskajā plānā, un tie attiecas uz caurplūduma aprēķinu. Ūdeņu kvalitāti modelis pieņem līdzvērtīgu tipisku sadzīves notekūdeņu kvalitātei. Izejas dati parādīti 3.28. attēlā un atbilst monitoringa objektam, pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežaciruļos. Aprēķina modelis pēc ievadītajiem monitoringa objekta izejas datiem piedāvā rezultātu (3.28. attēls), kas pēc konstrukcijas sakrīt ar pētīto esošo situāciju. Horizontālas pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs uzrādīja augstu efektivitāti attiecībā uz BSP₅ un ŪSP koncentrāciju samazināšanu. Lai sasniegtu maksimālo vēlamo attīrīšanas efektivitāti attiecībā uz biogēno elementu aizturēšanu, ieteicams izvēlēties kopējo mitrāja platību ar virsmas laukumu 1696 m², kas ir 5 reizes lielāka nekā esošajā monitoringa objektā, rēķinot krājbaseina un filtra kopējo virsmas platību. Rezultātu pamato novērotie ienākošo notekūdeņu kvalitātes rādītāji un attīrīšanas efektivitāte. Slāpekļa savienojumu attīrīšanas efektivitāte pētījumu objektā novērota ar 54 % samazinājumu visā novērojumu periodā, kas ir nepietiekami jeb nav iegūts maksimālais iespējamais notekūdeņu attīrīšanas rezultāts. Pie modelī aprēķinātās platības sagaidāms, ka lietusgāžu laikā mitrājs netiktu caurskalots, tādējādi denitrifikācija varētu noritēt pilnvērtīgi. Var secināt, ka

pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos izbūvēts ar pārāk mazu kopējo virsmas platību. Optimālai tā darbībai objektā būtu jāpaplašina esošais, vai jāizbūvē vēl viens pazemes plūsmas mākslīgais mitrājs.

Lauksaimniecības notekūdeņi

kopējais laukums - 0.81 ha	
Būvju jumti procentos - 77%	
Kalto akmeņu bruģis procentos - 0%	
Apaļo akmeņu bruģis procentos - 0%	
Ar saistvielām neapstrādātu ceļu segums procentos - 0%	
Dārzu un parku grants celiņi procentos - 0%	
Planēta grunts procentos - 0%	
Zālāji procentos - 23%	
t _{con} parametrs (noteces ilgums) - 10 min	
t _{can} parametrs - 4 min	
Kopējais noteces laiks - 14 min	
Parametrs A - 577	Ja notekūdeņus attīra VERTIKĀLĀS
Virsmu raksturojošais koeficients z _{mid} - 0	PAZEMES plūsmas mitrājā, tad
44.218879097282l/s	
Aprēķinātais mitrāja laukums - 1696 kvadrātmetri	Aprēķinātais mitrāja laukums - 792 kvadrātmetri
Mitrāja dziļumam ir jābūt 1m. Tāpēc kopējais tilpums arī ir 1696 kubikmetri	Mitrāja dziļumam ir jābūt 1m. Tāpēc kopējais tilpums arī ir 792 kubikmetri
Attālumam starp ienākošo un izejošo cauruli jābūt 6.5 metriem	Attālumam starp ienākošo un izejošo cauruli jābūt 6.5 metriem
Tāpēc uz doto kopējo mitrāja laukumu tā platumam ir jābūt 261 metri	Tāpēc uz doto kopējo mitrāja laukumu tā platumam ir jābūt 121.8 metri

3.29. att. Modeļa rezultātu skats pazemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežacīruļos

Modelis piedāvā iespēju izvēlēties starp horizontālas un vertikālas pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja konstrukciju. Gadījumā, ja būtu plānots šajā objektā izbūvēt otru mākslīgo mitrāju maksimāla attīrīšanas efekta sasniegšanai, tad nepieciešamās platības aprēķinam būtu ieteicams izvēlēties modeļa iespēju “Citi notekūdeņi”. Ir pieejami novērojumu dati par ūdeņu kvalitātes rādītāju koncentrācijām pēc esošā mitrāja atbilstoši šī darba 3.1. un 3.2. tabulai, kas kalpotu kā izejas dati, kā arī ir zināms notekūdeņu apjoms.

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos tika projektēts pēc citu valstu pētījumos ieteiktā aprēķina, vadoties no ieteicamās mitrāja spoguļa virsmas platības attiecības pret sateces baseina kopējo platību. Modeļa aprēķins drenētu lauksaimniecības platību gadījumā arī balstīts uz minēto attiecību, tāpēc modeļa aprēķinātais rezultāts (3.30. attēls) sakrīt ar monitoringa objektā izbūvētā mitrāja spoguļa virsmas platību. Noteces uztveršanai no lauksaimniecībā izmantotajām platībām kā optimālā konstrukcijas izvēle visos gadījumos tiek piedāvāts virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs. Lai gan monitoringa objektā netika sasniegta maksimālā iespējamā ūdeņu kvalitāte, modelis apliecina korektu spoguļa virsmas laukuma izvēli. Mitrāja darbības efektivitāti šajā objektā nelabvēlīgi ietekmēja pārāk maza veģetācijas izplatība. Pētījuma rezultātu negatīvi ietekmēja epizodiska un nekontrolēta piesārņojošo vielu ieplūde mitrāja vidusdaļā. Tādējādi kopumā var secināt, ka virszemes plūsmas mākslīgais

mitrājs Mežacīruļos ir izbūvēts atbilstošā izmērā, bet attīrīšanas efektivitātes uzlabošanai būtu nepieciešama papildus ūdensaugu stādīšana mitrāja gultnē.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Lauksaimniecības notekūdeņi

☐ Virszemes notece no pagalma

☒ Drenētas aramzemes sateces baseina laukums, ha

74.7

Aprēķināt

Lauksaimniecības notekūdeņi

Šajā gadījumā mitrāja veids ir virszemes plūsmas mitrājs

Aprēķinātās dimensijas ir šādas -

Īsākās malas garums - no ~70.57 līdz 111.58 metri

Garākās malas garums - no ~211.71 līdz 334.74 metri

Mitrāja kopējais laukums - no ~14940 līdz 37350 kvadrātmetriem

3.30. att. Modeļa datu ievades un rezultātu skats virszemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Mežacīruļos

Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē attiecībā uz sateces baseinu izvietots atbilstoši ieteikumam – pēc iespējas tālāk hidrogrāfiskā tīkla lejtecē un tuvāk ieplūdei dabīgā ūdenskrātuvē. Šajā gadījumā tas rezultējas ar salīdzinoši lielu sateces baseina platību. Monitoringa objekta būvniecībai nebija pieejama nepieciešamā platība, tāpēc tika pieņemts lēmums samazināt aprēķināto mitrāja spoguļa virsmas platību.

Mākslīgo mitrāju aprēķina kalkulators

Izvēlies parametrus

Lauksaimniecības notekūdeņi

☐ Virszemes notece no pagalma

☒ Drenētas aramzemes sateces baseina laukums, ha

553.3

Aprēķināt

Lauksaimniecības notekūdeņi

Šajā gadījumā mitrāja veids ir virszemes plūsmas mitrājs

Aprēķinātās dimensijas ir šādas -

Īsākās malas garums - no ~192.06 līdz 303.67 metri

Garākās malas garums - no ~576.18 līdz 911.02 metri

Mitrāja kopējais laukums - no ~110660 līdz 276650 kvadrātmetriem

3.31. att. Modeļa datu ievades un rezultātu skats virszemes plūsmas mākslīgajam mitrājam Zantē

Modeļa piedāvātā mitrāja konstrukcija – virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs atbilst izvēlētajam monitoringa objektam Zantē (3.31. attēls), taču vēlamā mitrāja platība modelī aprēķināta 11 – 27 ha, kas ir gandrīz 10 reizes vairāk nekā esošā mitrāja platība. Modeļa aprēķini konkrētajā izvēlē balstīti uz pieņēmumu, ka sateces baseina teritoriju aizņem intensīvi lauksaimniecībā izmantotas platības. 2.10. attēlā redzams, ka Zantē lielu daļu sateces baseina teritorijas aizņem mežu platības, kas teorētiski liecina par zemākām biogēno elementu koncentrācijām notecē. To pierāda monitoringa rezultāti, jo novērotā ūdeņu kvalitāte pie ieplūdes mākslīgajā mitrājā Zantē var tikt raksturota kā augsta. Tādējādi aprēķinu modeļa piedāvātais rezultāts ir pamatots ar 3.1. un 3.2. nodaļā atspoguļotajiem ūdeņu kvalitātes rādītāju samazināšanas rezultātiem, vērtējot izmaiņas no ieplūdes pret izplūdi. Taču, tā kā novērotās minēto rādītāju koncentrācijas bija relatīvi zemas jau pie ieplūdes, var secināt, ka šajā objektā mākslīgais mitrājs ūdeņu kvalitātes uzlabošanai nav nepieciešams, un drīzāk kalpo citiem mērķiem, piemēram, bioloģiskās daudzveidības uzturēšanai lauksaimniecības zemēs.

Tā kā mākslīgos mitrājus iespējams un bieži vien arī ieteicams kombinēt, modelis pie atsevišķām izvēlēm piedāvā vairākus pieļaujamos konstrukciju variantus. Modeli var izmantot gan vienas individuālas konstrukcijas izvēlei, gan vairāku konstrukciju kombinēšanai, taču tādā gadījumā jāņem vērā ūdeņu kvalitātes rādītāju pakāpeniskas un atšķirīgas izmaiņas katrā no mitrāja konstruktīvajām sadaļām.

3.4. Mākslīgo mitrāju ekonomiskais un vides novērtējums

Galvenais šī promocijas darba ieguvums ir Latvijas klimatiskajiem apstākļiem aprobēta metodika mākslīgo mitrāju tehniskajiem risinājumiem un dimensionēšanai. Aprēķina metodika sagatavota, balstoties uz empīriskiem novērojumiem pētījumu objektos un noformēta aprēķinu modeļa veidā, kas interesentiem pieejams tiešsaistē. Šī pētījuma rezultāti ir iestrādāti Lauku atbalsta dienesta atbalsta pasākumā 4.3 “Atbalsts ieguldījumiem lauksaimniecības un mežsaimniecības infrastruktūras attīstībā īstenošanā”, kura mērķis ietver lauksaimniecības attīstību, bioloģiskas daudzveidības uzturēšanu un lauksaimniecības kā nozares konkurētspējas palielināšanu. Un attiecīgi minētajam atbalsta pasākumam pētījuma rezultāti iestrādāti LR MK noteikumos Nr.776 “Valsts un Eiropas Savienības atbalsta piešķiršanas kārtība atklātu projektu konkursa veidā pasākumā “Ieguldījumi materiālajos aktīvos” 2014.–2020. gada plānošanas perioda pārejas laikā 2021. un 2022. gadā”. Šajos noteikumos iestrādāti kritēriji mākslīgo mitrāju ierīkošanai atbalstam “Klimata pārmaiņu mazināšanas un pielāgošanās, kā arī vides aizsardzības ieguldījumi” kā ūdens resursu efektīvas izmantošanas un barības vielu noteces samazināšanas ieguldījums (LR MK noteikumi Nr.776, 2021). Bez tam, Latvijas normatīvajos aktos (LR MK noteikumi Nr.600, 2014) mākslīgais mitrājs definēts kā videi draudzīgs meliorācijas sistēmas elements lauksaimnieciskās darbības izraisīta piesārņojuma slodzes samazināšanai uz vaļējām ūdenskrātuvēm. Rezultāti ar minētajam mērķim izbūvētiem un ekspluatētiem mākslīgajiem mitrājiem atspoguļoti šajā promocijas darbā. Balstoties uz citu valstu pieredzi mākslīgo mitrāju izmantošanā, mitrāju demonstrēto efektivitāti attiecībā uz novēroto ūdeņu kvalitātes parametru samazināšanu pētījuma objektos, secināts, ka mākslīgais mitrājs pie noteiktiem ekspluatācijas apstākļiem var kalpot kā efektīva bioloģiskā ūdeņu attīrīšanas iekārta saimnieciskās darbības izraisīta ūdens piesārņojuma samazināšanai Latvijā.

Izvērtējot ekonomisko aspektu, veikts pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja salīdzinājums ar pielietojuma un attīrīšanas procesa ziņā līdzvērtīgo bioloģisko notekūdeņu attīrīšanas metodi ar aktīvajām dūņām un aerāciju. Bioloģiskās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas Latvijā tiek plaši izmantotas komunālo un sadzīves notekūdeņu attīrīšanai centralizēti un individuāli. Aktīvajām dūņām dzīvības uzturēšanai ir nepieciešama intensīva gaisa vai skābekļa padeve, kas tiek nodrošināta ar kompresora vai skābekļa sūkņa palīdzību. Salīdzinājumam izvēlēti vienas ģimenes dzīvojamās mājas radīti sadzīves notekūdeņi ar apjomu $1 \text{ m}^3 \cdot \text{dnn}^{-1}$. Pieņemot, ka

tipiski sadzīves notekūdeņi (LR MK noteikumi Nr. 34, 2002) ir ar BSP₅ parametra koncentrāciju robežās no 150 – 350 mg·l⁻¹ un satur ap 60 g·l⁻¹ organisko vielu, un tipiskā skābekļa nepieciešamība ir 1.1 – 1.5 kg O₂, lai oksidētu 1 kg BSP (EPA, 2000), tad mineralizācijas procesā tiks izmantoti aptuveni 15 – 20 m³ gaisa uz katru notekūdeņu kubikmetru. Tas nozīmē elektroenerģijas patēriņu 0.264 – 0.352 kW uz katru notekūdeņu kubikmetru atkarībā no gaisa kompresora jaudas. Mākslīgais mitrājs ir iespēja bioloģiski attīrīt sadzīves notekūdeņus, neizmantojot elektroenerģiju patērējošas iekārtas, izslēdzot šo izmaksu pozīciju ekspluatācijas laikā.

Galvenās būvniecības un ekspluatācijas izmaksu pozīcijas uzskaitītas 3.3. tabulā, kā arī dots šo izmaksu salīdzinājums neliela apjoma sadzīves notekūdeņu attīrīšanai mākslīgajā mitrājā vai rūpnieciski izgatavotā bioloģiskajā attīrīšanas iekārtā ar aerāciju un aktīvajām dūņām. Rūpnieciski ražotas bioloģiskās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas aprīkojuma izmaksas ietver metāla vai polimēru konteineru materiāla un ražošanas izmaksas ar tipisku aprīkojumu, ko parasti piedāvā uzņēmums. Aprīkojumā ietilpst arī gaisa kompresors un gaisa ieplūdes diski. Šīs aprīkojuma izmaksas lielākoties ir fiksētas un nav atkarīgas no objekta topogrāfiskajiem vai ģeoloģiskajiem apstākļiem un atrašanās vietas (Tilgalis & Grinberga, 2011). Savukārt mākslīgā mitrāja būvniecības izmaksas ir atkarīgas no filtra materiāla iegūšanas vietas attāluma, transporta izmaksām utt. Mākslīgā mitrāja lielāko būvniecības izmaksu pozīciju veido grunts darbi. To izmaksas par izrakto grunts kubikmetru atkarīgas no mitrāja kopējā apjoma. Pazemes plūsmas mitrājam otra lielākā izmaksu pozīcija būvniecības laikā ir filtra daļas pildījums. Tas sastāv no trīs veidu filtra materiāla – skalotas rupjas smilts, skalotiem oļiem un grants. Tā kā nav pieļaujams izvēlēties neskalotu rupju smilti sākot no nulles frakcijas, jo tas kavēs ūdens filtrāciju, tad rūpīgi jāpievērš uzmanība karjera izvēlei. Tādējādi atkarībā no piemērotas filtra materiālu ieguves vietas attāluma līdz objektam, cena par katru no nepieciešamajām smiltis un grants frakcijām būs atšķirīga. Būvniecības un uzstādīšanas iekārtas veido izmaksu pozīciju, pirms attīrīšanas iekārtu darbības uzsākšanas, kas veidosies jebkuru minēto notekūdeņu attīrīšanas iekārtu izvēles gadījumā. Iekārtu darbības ilgums un kvalitāte pirmreizējās izmaksas neietekmē.

Uzņēmumi, kas piedāvā standarta notekūdeņu attīrīšanas iekārtas ar aerāciju, mēdz iekļaut būvniecības izmaksas iekārtu apjoma cenā vai aprīkojuma izmaksās. Apkopes izmaksas ekspluatācijas laikā mehāniskajam un elektrotehniskajam aprīkojumam veido darbaspēks iekārtu uzraudzībai. Bioloģiskajām iekārtām ir nepieciešama īpaši izglītota persona regulārai tehnikas un aprīkojuma apkalpošanai, taču mākslīgajam mitrājam galvenā notekūdeņu attīrīšana notiek bez mehāniska vai elektrotehniska aprīkojuma smilts grants filtrā ar ūdensaugu stādījumu un dabīgu aerāciju, tāpēc apkopes izmaksas ir zemas.

Izmaksu pozīcijas šajā darbā nav norādītas absolūtās naudas vērtībās, taču modelī iestrādāts provizorisks cenu kalkulators, kas atbilstoši aprēķinātajai mākslīgā mitrāja konstrukcijai un vēlamajai platībai izrēķina provizoriskās būvniecības izmaksas. Grunts darbu izmaksas tiek rēķinātas, pieņemot, ka ekskavatora pakalpojumu cena ir 500.00 EUR par 100 m³ izraktās grunts. Infiltrācijas un drenu cauruļu cena tiek rēķināta, pieņemot, ka caurules cena ir 8.00 EUR par metru. Ja nepieciešama hidroizolācija, tad tiek rēķināta PE plēves cena ieklāšanai divās kārtās mitrāja pamatnē, pieņemot 1.70 EUR par m².

Vērtējot mākslīgo mitrāju no vides viedokļa, jāizdala mitrāji pēc attīrāmo notekūdeņu sākotnējās kvalitātes, jo tā nosaka mitrāja konstrukcijas izvēli. Mākslīgie mitrāji sadzīves, komunālo un piesārņotu ražošanas notekūdeņu attīrīšanai, kur ieplūstošo notekūdeņu kvalitātes rādītāji pārsniedz emisijas limitus vidē, tiek projektēti hermētiski, bez neattīrītu notekūdeņu noplūdes vidē. Attīrīšanas process norit mitrāja iekšpusē un nerada tiešus piesārņojuma riskus gruntij vai gruntsūdeņiem.

3.3. tabula. Galveno izmaksu pozīciju salīdzinājums

	Galvenās izmaksu pozīcijas	Mākslīgajam mitrājam	Rūpnieciski ražotai sadzīves notekūdeņu attīrīšanas iekārtai
Būvniecības izmaksas	Grunts darbi (būvbedres rakšana)	Jā	
	Grunts darbi (būvbedres aizbēršana ar filtra materiālu)	Jā	Nē
	Hidroizolācijas ieklāšana pamatnē	Jā	Nē
	Noteiktas frakcijas filtra materiāla ieguve un transportēšana	Jā	Nē
	Iekārtas rūpnieciska izgatavošana un transportēšana	Nē	Jā
	Iekārtas uzstādīšana objektā	Nē	Jā
Ekspluatācijas izmaksas	Veģetācijas pļaušana un novākšana reizi gadā	Jā	Nē
	Periodiska sedimentu izvākšana	Reizi 2 - 3 gados	Reizi 2 - 3 mēnešos
	Regulāra apsekošana	Ne retāk kā 2 reizes mēnesī	
	Infiltrācijas cauruļu skalošana nepieciešamības gadījumā	Jā	Nē
	Nepārtraukta elektroenerģijas izmantošana	Nē	Jā
	Baktēriju atjaunošana nepieciešamības gadījumā	Nē	Jā
	Regulāra sūkņa un kompresora apkope un nomaiņa	Nē	Jā

Mākslīgo mitrāju izmantošana virszemes un drenu noteču uztveršanai un attīrīšanai kalpo kā barjera biogēno elementu un suspendēto vielu aizturēšanai pirms dabīgas ūdenskrātuves, tādējādi samazinot piesārņojuma slodzi uz dabas ūdeņiem. Ūdeņu attīrīšanas process balstīts uz dabā notiekošiem procesiem un nepatērē elektroenerģiju un dabas resursus.

Mākslīgo mitrāju novērtējums apkopots 3.4. tabulā SVID analīzes veidā. Lielākais ieguvums no šāda veida notekūdeņu attīrīšanas metodes ir zemais vai neesošais energoresursu patēriņš salīdzinājumā ar citām attīrīšanas metodēm. Mākslīgajam mitrājam nav nepieciešamas elektroierīces, un tas ievērojami samazina regulārās ekspluatācijas izmaksas, jo nav nepieciešams nodrošināt elektroenerģiju un ierīču remontu vai nomaiņu. Mākslīgais mitrājs tādējādi ir autonoma iekārta, kuras darbība nav atkarīga no ārējiem resursiem. Mākslīgā mitrāja uzturēšanai galvenais uzdevums ir vērot un uzraudzīt, lai nenotiktu vizuālas izmaiņas mitrāja darbībā ekspluatācijas laikā. Mitrāja uzraudzībai nav nepieciešams speciāli apmācīts personāls, kā tas ir cita veida notekūdeņu attīrīšanas iekārtām. Lai mitrāja darbības efektivitāte nepasliktinātos, nepieciešams reaģēt uz tādām darbības izmaiņām kā smaku parādīšanās, izplūstošā ūdens krāsas izmaiņas, virsūdens parādīšanās pazemes plūsmas mitrājiem vai vizuālas veģetācijas izmaiņas. Katrs šāda veida defekts var tikt novērts ar minimālu finansiālu

un darbaspēka iesaisti, piemēram, skalojot infiltrācijas caurules ar spēcīgu ūdens strūklu. Pretējā gadījumā minētie defekti var radīt ievērojamu notekūdeņu attīrīšanas efektivitātes pazemināšanos ilgtermiņā. Notekūdeņu attīrīšana mākslīgajā mitrājā uzskatāma par videi draudzīgu metodi, jo tās darbināšana neietver dabas resursu patēriņu. Mākslīgie mitrāji pasaulē tiek plaši pielietoti un ir daudz iespēju to kombinēt, pielāgot un papildināt dažādiem mērķiem, tai skaitā šiem mērķiem papildinot vienam otru. Mākslīgais mitrājs visbiežāk kalpo ne vien ūdeņu kvalitātes uzlabošanai, bet pilda arī plūdu riska samazināšanas, bioloģiskās daudzveidības nodrošināšanas un rekreācijas funkciju.

3.4. tabula. Mākslīgo mitrāju SVID analīze

Stiprās puses	Vājās puses
• Zems vai neesošs energoresursu patēriņš ekspluatācijas laikā • Zemas uzturēšanas izmaksas • Videi draudzīga un ilgtspējīga metode	• Nepieciešama relatīvi liela platība
Iespējas	Draudi
• Iespējams kombinēt un pielāgot dažāda veida notekūdeņu attīrīšanai • Veicina bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu • Ainavu papildinošs elements • Decentralizētas kanalizācijas sistēmas sastāvdaļa	• Maz pazīstama notekūdeņu attīrīšanas metode Latvijā • Efektivitāte var būt mainīga un atkarīga no dažādu ietekmējošo faktoru kombinācijām • Neatbilstošas konstrukcijas un platības izmantošanas rezultātā var nesasniegt vēlamu darbības efektivitāti

Mitrājam nepieciešamā platība, īpaši salīdzinājumā ar cita veida notekūdeņu attīrīšanas metodēm, nepieciešama relatīvi lielāka. Tā kā piesārņojuma koncentrācijas samazināšanai notekūdeņos mitrājā tiek izmantoti dabā notiekošie procesi, ir nepieciešams vairāk laika baktēriju darbībai nekā intensificētās sistēmās. Tas nozīmē ilgāku notekūdeņu uzturēšanās laiku iekārtā, tāpēc mākslīgā mitrāja tilpums un virsmas laukums salīdzinoši ir lielāks nekā cita veida bioloģiskajām notekūdeņu attīrīšanas iekārtām.

Mākslīgos mitrājus var kombinēt ne tikai savstarpēji variējot ar konstrukcijas izvēli, bet arī papildinot cita veida notekūdeņu attīrīšanas iekārtas. Mitrāja pievienotā vērtība, ietverot 3.4. tabulā minētās stiprās puses, ļauj izmantot šo iekārtu daudzveidīgiem mērķiem. Lauksaimniecībā izmantotās platībās, kā arī blīvi apdzīvotu pilsētu teritorijās mākslīgais mitrājs var kalpot kā bioloģiskās daudzveidības veicinātājs. Mākslīgajā mitrājā var izmantot dažāda veida mitrumu mīlošu augu stādījumus, tos kombinējot. Mitrāja formu ir iespējams konceptuāli pielāgot ainavtelpas vajadzībām. Latvijā un citviet pasaulē decentralizētajām kanalizācijas sistēmām būtu jāpievērš pastiprināta uzmanība, piedāvātajiem privāto notekūdeņu apsaimniekošanas risinājumiem būtu jābūt vienkāršiem un efektīviem, un šajā pētījumā aplūkotā metode atbilst šiem nosacījumiem. Mākslīgajiem mitrājiem ir augsta pielāgošanās spēja mainīgām organiskajām slodzēm notekūdeņos, kas cita veida attīrīšanas metodēm savukārt ir ļoti zema.

Latvijas mērogā mākslīgie mitrāji joprojām ir maz pazīstama un inovatīva notekūdeņu

attīrīšanas metode. Šis pētījums ir nozīmīgs ieguldījums mākslīgo mitrāju turpmākai izmantošanai dažāda veida notekūdeņu attīrīšanai Latvijā. Neatbilstošas konstrukcijas un platības izmantošanas rezultātā mākslīgais mitrājs var nesasniegt vēlamo darbības efektivitāti attiecībā uz ūdeņu kvalitāti, tāpēc korekts aprēķins un konstrukcijas izvēle ir nozīmīga.

Pasaulē mākslīgos mitrājus pēta kopš 1970. gadiem un pēdējo 5 – 10 gadu laikā novērojams straujš tehnoloģijas pilnveidošanas vilnis, kur interese par šo metodi dažādu valstu vidū ievērojami pieaug. Intensīvi tiek meklēti veidi, kā atgūt barības vielu resursus un iekļaut notekūdeņu attīrīšanu mākslīgajos mitrājos aprites ekonomikas ciklā. Tiek pētīts mākslīgo mitrāju pielietojums īpaši piesārņotu notekūdeņu attīrīšanai, kā arī vides sanācijai.

SECINĀJUMI

1. Citur pasaulē, kur novērojami līdzīgi klimatiskie apstākļi kā Latvijā, mākslīgos mitrājus izmanto kā vienīgās bioloģiskas notekūdeņu attīrīšanas iekārtas vai papildu attīrīšanas iekārtas dažādu notekūdeņu attīrīšanai. Mitrāja darbības efektivitāte attiecībā uz dažādiem ūdeņu kvalitātes rādītājiem var būt atšķirīga un mainīga. Ūdeņu attīrīšanas efektivitāte ir atkarīga no gaisa temperatūras, ūdens plūsmas ātruma, hidrauliskās slodzes ātruma, veģetācijas, ekspluatācijas un minēto faktoru savstarpējām kombinācijām.
2. Latvijas meteoroloģiskajiem un ekspluatācijas apstākļiem piemērotas tādas pazemes un virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju tehnoloģiskās shēmas, kas ievērtē notekūdeņu veidu un attiecīgo attīrāmo notekūdeņu kvalitātes rādītājus, apjomu un pieplūdes režīmu.
3. Salīdzinot vidējās koncentrācijas pirms un pēc pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja Mežacīruļos ievāktajos ūdeņu paraugos, novērots koncentrāciju samazinājums par 17%, 67% un 54% attiecīgi NO_3^- -N, NH_4^+ -N un N_{kop} rādītājiem. Aizturēšanas efektivitāte vidējām P_{kop} un PO_4^- -P koncentrācijām novērota attiecīgi 67% un 72%. SV koncentrācijas samazinātas vidēji par 62% visā novērojumu periodā. Rādītāji BSP_5 un KSP samazināti vidēji attiecīgi par 67 un 63%.
4. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Mežacīruļos uzrāda vidēji 10%, 24% un 9% samazinājumu attiecīgi NO_3^- -N, NH_4^+ -N un N_{kop} koncentrācijām. Mitrājs darbojies ar 21% un 3% samazinājuma efektivitāti PO_4^- -P un P_{kop} koncentrācijām. SV koncentrācijas aizturētas vidēji par 11%.
5. Virszemes plūsmas mākslīgais mitrājs Zantē neietekmē NO_3^- -N un N_{kop} koncentrācijas, taču konstatēts NH_4^+ -N koncentrāciju palielinājums vidēji par 50%. Mitrājs darbojies neitrāli attiecībā uz fosfora savienojumu aizturēšanu. Novērota vidēji 8% SV aizturēšanas efektivitāte.
6. Viens no nozīmīgiem ūdeņu kvalitātes uzlabošanu ietekmējošiem faktoriem ir mitrāja konstrukcija. Kopumā pazemes plūsmas mākslīgā mitrāja konstrukcija uzrādījusi augstāku ūdeņu attīrīšanas efektivitāti visiem rādītājiem nekā virszemes plūsmas mākslīgo mitrāju konstrukcija. Mākslīgajos mitrājos ieplūstošo ūdeņu koncentrācijas visos pētījumu objektos bija mainīgas, un Pīrsona korelācijas analīze neuzrādīja statistiski būtisku sakarību starp ieplūstošo notekūdeņu sastāvu un piesārņojošo vielu samazināšanas efektivitāti.
7. Ekspluatācijas laiks nav būtiski ietekmējis mitrāju darbības efektivitāti, taču apsaimniekošanas prakse ekspluatācijas laikā ievērojami samazinājusi BSP_5 un KSP koncentrāciju samazināšanos pazemes plūsmas mākslīgajā mitrājā un slāpekļa savienojumu aizturi virszemes plūsmas mākslīgajā mitrājā.
8. Gaisa temperatūra nav būtiski ietekmējusi virszemes un pazemes plūsmas mākslīgo mitrāju darbības efektivitāti. Vērtējot mākslīgo mitrāju darbību sezonāli un, ietverot kompleksu dažādu faktoru ietekmi, t.sk. gaisa temperatūru, veģetācijas attīstību un ieplūstošā ūdens kvalitāti un kvantitāti, pazemes plūsmas mitrājā slāpekļa un fosfora savienojumu attīrīšanas efektivitāte pazeminājusies pavasara sezonā, bet virszemes plūsmas mākslīgajos mitrājos konstatēta zema fosfora savienojumu aizturēšanas efektivitāte ziemas sezonā.
9. Aprēķinu metodika mākslīgā mitrāja konstrukcijas izvēlei un dimensionēšanai un virsmas laukuma aprēķina formulas balstītas uz ūdens kvalitātes rādītāju izmaiņām pie ieplūdes un izplūdes. Sagatavotais aprēķinu modelis dažāda veida un apjoma notekūdeņu attīrīšanai ir pieejams tiešsaistē vienkārši lietojama kalkulatora veidā.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Abed, S. N., Almuktar, S. A., & Scholz, M. (2019) Phytoremediation performance of floating treatment wetlands with pelletized mine water sludge for synthetic greywater treatment. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(2), p 581–608. doi:10.1007/s40201-019-00372-z
2. AL Falahi, O. A., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., Ewadh, H. M., Al-Baldawi, I. A., Kurniawan, S.B., Imron, M.F., Ismail, N. Izzati. (2021). Simultaneous removal of ibuprofen, organic material, and nutrients from domestic wastewater through a pilot-scale vertical sub-surface flow constructed wetland with aeration system. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102214. doi:10.1016/j.jwpe.2021.102214
3. Alayu, E., Leta, S. (2021) Post treatment of anaerobically treated brewery effluent using pilot scale horizontal subsurface flow constructed wetland system. *Bioresour. Bioprocess.* 8. doi:10.1186/s40643-020-00356-0
4. Berzina, L., & Sudars, R. (2010). Seasonal Characterization and Trends Study of Nutrient Concentrations in Surface Water from Catchments with Intensive Livestock Farming. *Scientific Journal of Riga Technical University, Environmental and Climate Technologies*. Volume 5, p 8–15.
5. Biebighauser T.R. (2009) *Wetland Drainage, Restoration, and Repair*. The University press of Kentucky. 241 p.
6. Biebighauser T.R. (2011) *Wetland restoration and construction. A technical guide*. Upper Susquehanna Coalition. 186 p.
7. Brown, D S., Kreissl J F., Gearhart R. A., & et al. (2000) *Manual, Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, EPA/625/R-99/010, 166 p.
8. Castellar, J. A. C., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclús, H., Arias, C. A., Carvalho, P. N., Galvao, A., Comas, J. (2022). Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities. *Journal of Cleaner Production*, 340 p. doi:10.1016/j.jclepro.2022.130660
9. Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., Bastian, R. K., & Reed, S. C. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. 2nd edition. 92 B/W Illustrations, 552 p. ISBN 9781466583269
10. Crumpton W., Stenback G. (2020) *Annual Report on Performance of Iowa CREP Wetlands: Monitoring and Evaluation of Wetland Performance*. Iowa Department of Agriculture and Land Stewardship. 10 p.
11. Deelstra J., Iital A., Povilaitis A., Kyllmar K., Greipsland I., Blicher-Mathiesen G., Jansons V., Koskiaho J., Lagzdins A. (2014). Hydrological pathways and nitrogen runoff in agricultural dominated catchments in Nordic and Baltic countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 195, 211–219.
12. Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. (2017) *Treatment Wetlands, Biological Wastewater Treatment Series, VOLUME SEVEN*, IWA Publishing, 172 p. ISBN13:9781780408767
13. EPA (1982) *Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater*. United States Environmental Protection Agency. 418 p.
14. EPA (2000) *Wastewater Technology Fact Sheet, Oxidation Ditches*. United States Environmental Protection Agency. 6 p.

15. ES ūdens direktīva (2000/60/EC, 2000) Direktīva 2000/60/EK – tiesiskais regulējums Kopienas rīcībai ūdens politikas jomā On 23 October 2000, the “Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy” or, for short, the EU Water Framework Directive (WFD)
16. European Commission (1991) Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban wastewater treatment. Official Journal of the European Communities, No. L135, p. 40–52.
17. European Commission (1991) Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Official Journal of the European Communities, No. L375, 1–8
18. European Commission (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, No. L327, p. 1–73.
19. FAO report. (2021) Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. ISBN 92-5-104698-1. Available at: <https://www.fao.org/3/y2780e/y2780e02.htm> (accessed on 13/08/2022)
20. Feuerbrach P., Strand J. (2010) Water and biodiversity in the agricultural landscape. With support of the Environmental Protection Agency, Sweden. 50 p.
21. Fia FRL., de Matos AT., Fia R., Borges AC., Teixeira DL. (2012) Organic matter removal and assessment of kinetic parameters in laboratory-scale constructed wetland systems. *Acta Scientiarum Technology*, Volume 34, Issue 2, p. 149-156
22. Gajewska, M., Skrzypiec, K., Józwiakowski, K., Mucha, Z., Wójcik, W., Karczmarczyk, A., & Bugajski, P. (2020) Kinetics of pollutants removal in vertical and horizontal flow constructed wetlands in temperate climate. *Science of the Total Environment*, 718. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137371
23. Galanopolos C., Lyberatos G. (2016) Dynamic modelling and design of free water surface constructed wetland systems. *Global NEST Journal*, Vol 18, No 2, 321-328.
24. General considerations. (1995) *A Handbook of Constructed Wetlands: Volume 1. A guide to creating wetlands for: Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region*. 53 p.
25. Gimenez-Maranges M., Pappalardo V, La Rosa D., Breuste J., Hof A. (2020). The transition to adaptive storm-water management: Learning from existing experiences in Italy and Southern France, *Sustainable Cities and Society*, Volume 55, 102061, ISSN 2210-6707, doi:10.1016/j.scs.2020.102061.
26. Gordon, B. A., Lenhart, C., Peterson, H., Gamble, J., Nieber, J., Current, D., & Brenke, A. (2021). Reduction of nutrient loads from agricultural subsurface drainage water in a small, edge-of-field constructed treatment wetland. *Ecological Engineering*, 160, 106128. doi:10.1016/j.ecoleng.2020.106128
27. Greenway M. (2017) Stormwater wetlands for the enhancement of environmental ecosystem services: case studies for two retrofit wetlands in Brisbane, Australia. *Journal of Cleaner Production* 163, S91-S100.
28. Grinberga L., Lagzdins A. (2017) Nutrient retention in surface flow constructed wetland in agricultural land in Latvia. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017*, p 593-598.
29. Grinberga, L. (2020) *Water Quality Assurance with Constructed Wetlands in Latvia*. Springer Water, 2020, p. 87–103.

30. Grinberga, L., Lauva, D., Lagzdins, A. (2021) Treatment of Storm Water from Agricultural Catchment in Pilot Scale Constructed Wetland. *Environmental and Climate Technologies*, 2021, 25(1), p. 640–649. doi:10.2478/rtuect-2021-0048
31. Guittonny-Philippe, A., Masotti, V., Höhener, P., Boudenne, J.L., Viglione, J., Laffont-Schwob, I. (2014) Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions, *Environment International*, Volume 64, p. 1-16, ISSN 0160-4120, doi:10.1016/j.envint.2013.11.016.
32. Heistad A, Paruch A.M, Vrale L, Adam K, Jenssen P.D. (2006) A high–performance compact filter system treating domestic wastewater. *Ecological engineering* 28. p. 374 – 379.
33. HELCOM. (2000) Nutrient Pollution to the Baltic Sea in 2000. Helsinki Commission, Baltic Marine Environment Protection Commission. Balt. Sea Environ. Proc. No.100.
34. HELCOM. (2009) Eutrophication in the Baltic Sea – an integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region. Helsinki Commission. Balt. Sea Environ. Proc. No.115B.
35. HELCOM. (2011) The Fifth Baltic Sea pollution Load Compilation (PLC-5). Helsinki Commission. Balt. Sea Environ. Proc. No.128
36. Henrichs, M., Langergraber, G., & Uhl, M. (2007). Modelling of organic matter degradation in constructed wetlands for treatment of combined sewer overflow. *Science of The Total Environment*, 380(1-3), 196–209. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.11.044
37. Hoseinzadeh E. (2019) Nitrogen Removal Processes for Wastewater Treatment. Bentham Science Publishers, 166 p.
38. Jansons, V., Grinberga, L. (2012) Mākslīgie mitrāji ūdens piesārņojuma samazināšanai. Jelgavas tipogrāfija, 41 lapa.
39. Jansons, V., Lagzdīņš, A., Bērziņa, L., Sudars, R., & Abramenko, K. (2011). Temporal and Spatial Variation of Nutrient Leaching from Agricultural Land in Latvia: Long Term Trends in Retention and Nutrient Loss in a Drainage and Small Catchment Scale. *Scientific Journal of Riga Technical University. Series 13: Environmental and Climate Technologies*, Vol.7. ISSN 1691-5208, 54-65.
40. Juston, J., & Kadlec, R. (2019). Data-driven modeling of phosphorus (P) dynamics in low-P stormwater wetlands. *Environmental Modelling & Software*. Volume 118, 226-240, doi:10.1016/j.envsoft.2019.05.002
41. Kadlec R. H. (2010) Phosphorus Removal in Emergent Free Surface Wetlands. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 40: 6, 1293 — 1306.
42. Kadlec R.H., Wallace S.D. (2009) *Treatment wetlands*, second edition, Taylor & Francis Group, 366 p. ISBN 978-1-56670-526-4
43. Kadlec, R. H. (2008). The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing. *Ecological Engineering*, 33(2), 126–141. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.02.012
44. Kadlec, R.H., (2009.) Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands, *Ecological Engineering*, 35, Issue 2, 159-174, doi:10.1016/j.ecoleng.2008.04.008
45. Kamilya, T., Majumder, A., Yadav, M.K., Ayoob, S., Tripathy, S., Gupta, A.K. (2022) Nutrient pollution and its remediation using constructed wetlands: Insights into removal and recovery mechanisms, modifications and sustainable aspects. *Journal of*

46. Keddy P. A. (2010) Wetland Ecology. Principles and conservation. Cambridge university press, 497 p.
47. Kill, K., Grinberga, L., Koskiaho, J., Mander, U., Wahlroos, O., Lauva, D., Pärn, J., Kasak, K. (2022) The phosphorus removal performance of in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff in temperate climate. Journal of Ecological Engineering, ECOLENG-D-22-00043.
48. Kusler, J., Christie, J. (2012) Wetland Water Quality Standards for States. Association of State Wetland Managers, 100 p. Available at: https://www.nawm.org/pdf_lib/wwq_standards_for_states.pdf (accessed on 15/10/2021)
49. Lagzdins, A., Jansons V., Sudars R., Abramenko K. (2012) Scale issues for assessment of nutrient leaching from agricultural land in Latvia. Hydrology research 43.4, 383–399.
50. Langergraber, G. (2007) Simulation of the treatment performance of outdoor subsurface flow constructed wetlands in temperate climates. Science of the Total Environment 380, 210–219.
51. LGIA - Latvian Geospatial Information Agency. (2017) Online map. Available at: <https://kartes.lgia.gov.lv/karte/>
52. LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 327. (2015) Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 223-15 “Kanalizācijas būves”, Latvijas Vēstnesis, 125.
53. LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 34. (2002) Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī. Regulations Regarding Discharge of Polluting Substances into Water. Latvijas Vēstnesis, 16.
54. LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 384. (2017) Noteikumi par decentralizēto kanalizācijas sistēmu apsaimniekošanu un reģistrēšanu. Regulations Regarding the Management and Registration of Decentralized Sewerage Systems. Latvijas Vēstnesis, 129.
55. LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 776. (2021) Valsts un Eiropas Savienības atbalsta piešķiršanas kārtība atklātu projektu konkursa veidā pasākumā “Ieguldījumi materiālajos aktīvos” 2014.–2020. gada plānošanas perioda pārejas laikā 2021. un 2022. gadā. Latvijas Vēstnesis, 237.
56. LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 600. (2014) Kārtība, kādā piešķir valsts un Eiropas Savienības atbalstu atklātu projektu konkursu veidā pasākumam “Ieguldījumi materiālajos aktīvos”. Latvijas Vēstnesis, 215.
57. LR Ministru kabinets (2015). Vides monitoringa programma 2015.-2020. gadam. (Environmental monitoring program 2015.-2020). II Ūdeņu monitoringa programma. Rīga. (in Latvian)
58. LVGMC (n.d.) Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. Meteoroloģiskais tīkls, dati. Available at: <https://www.meteo.lv/meteorologija-datu-meklesana/?nid=461> (accessed on 14/02/2022)
59. LVS EN 872. (2005) Water quality - Determination of suspended solids - Method by filtration through glass fibre filters.
60. Mader, A.E., Holtman, G.A., Welz, P.J. (2022) Treatment wetlands and phyto-technologies for remediation of winery effluent: Challenges and opportunities, Science of The Total Environment, Volume 807, Part 1, 150544, ISSN 0048-9697, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150544.

61. Mahmood, Q., Pervez, A., Zeb, B.S., Zaffar, H., Yaqoob, H., Waseem, M., Zahidullah, Afsheen, S. (2013) Review Article: Natural Treatment Systems as Sustainable Ecotechnologies for the Developing Countries. *BioMed Research International*, Volume 2013, Article ID 796373, 19 p. Doi:10.1155/2013/796373
62. Meyer, D., Chazarenc, F., Claveau-Mallet, D., Dittmer, U., Forquet, N., Molle, P., Morvannou, A., Pálffy, T., Petitjean, A., Rizzo, A., Campà, S.A., Scholz, M., Soric, M., Langergraber, G. (2015). Modelling constructed wetlands: Scopes and aims – a comparative review. *Ecological Engineering*, 80, 205–213. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.10.031
63. Ni, S.-Q., Ahmad, H. A., Ahmad, S. (2020) Immobilization of anaerobic ammonium oxidation bacteria for nitrogen-rich wastewater treatment. *Emerging Technologies in Environmental Bioremediation*, 1–22. doi:10.1016/b978-0-12-819860-5.00001-8
64. Nivala J., Hoos M.B., Cross C., Wallace S., Parkin G. (2007) Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 380: 19–27.
65. Nurmahomed, N., Ragen, A.K., Sheridan, C.M. (2022) Performance intensification of constructed wetland technology: a sustainable solution for treatment of high-strength industrial wastewater. *Water Science & Technology* Vol 85 No 6, 1765 doi: 10.2166/wst.2022.083
66. Python, Python Software Foundation. Available at: <https://www.python.org/> (accessed on 19/12/2021)
67. Rahmadyanti, E., Wiyono, A., & Firmansyah, G. A. (2020). Integrated system of biofilter and constructed wetland for sustainable batik industry. *International Journal of GEOMATE*, 18(70), 138–148. doi:10.21660/2020.70.61681
68. Reddy K. R., Patrick W. H. & Broadbent F. E. (1984) Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments, *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, 13:4, 273-309, doi:10.1080/10643388409381709
69. Said, N.S.M., Abdullah, S.R.S., Hasan, H.A., Othman, A.R., Ismail, N.I. (2021) Endurance of *Phragmites karka* in removing colour and suspended solids from industrial coffee processing effluents in a continuous reed bed system, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 40, 101832, ISSN 2214-7144, doi:10.1016/j.jwpe.2020.101832"
70. Scholz M. (2011) *Wetland Systems, Storm Water Management Control*. University of Salford, UK. Springer. 235 p.
71. Seres M., Hnatkova T., Vymazal J., Vanek T. (2017) Removal efficiency of constructed wetland for treatment of agricultural wastewaters. *Chemistry journal of Moldova. General, Industrial and Ecological Chemistry*, 12(1), 45-52.
72. Sharma, G.K., Khan, S.A., Shrivastava, M., Bhattacharyya, R., Sharma, A., Gupta, N., Bhatia, A. (2022) Phycoremediated N-fertilization approaches on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching. *Journal of Cleaner Production*, Volume 345, 131120, ISSN 0959-6526, doi:10.1016/j.jclepro.2022.131120.
73. Singh, A., Katoch, S. S., Bajpai, M., & Rawat, A. (2022). Constructed wetlands: A sustainable way of treating wastewater in cold climate - A review. *Pollution*, 8(2), 373-396. doi:10.22059/POLL.2021.324626.1103
74. Stefanakis, A.I., Tsihrintzis, V.A. (2012) Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands, *Chemical Engineering Journal*, Volumes 181–182, Pages 416-430, ISSN 1385-8947, doi:10.1016/j.cej.2011.11.108.

75. Tilgalis, E., Grinberga, L. (2011) Energy-efficient Wastewater Treatment Technologies in Constructed Wetlands. Civil Engineering '11 - 3rd International Scientific Conference, Proceedings, p. 263–266.
76. The Ramsar Convention on Wetlands. (1971) Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat. Available at: http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar-documents-texts-convention-on/main/ramsar/1-31-38%5E20671_4000_0__ (accessed on 08/09/2020)
77. Van Lossdrecht M.C.M., Nielsen P.H., Lopez-Vazquez C.M., Brdjanovic D. (2016) Experimental Methods in Wastewater Treatment. IWA Publishing, 362 p.
78. Valkama P., Mäkinen E., Ojala A., Vahtera H., Lahti K., Rantakokko K., Vasander H., Nikinma E., & Wahlroos O. (2017). Seasonal variation in nutrient removal efficiency of a boreal wetland detected by high-frequency on-line monitoring. Ecological Engineering 98, 307–317.
79. VZD (2022) Valsts zemes dienests, Zemes sadalījums zemes lietošanas veidos, Statistika par zemes sadalījumu zemes lietošanas veidos 2022. gada 1. janvārī.
80. VARAM (2006) Ramsāres konvencija. Available at: http://www.varam.gov.lv/lat/likumdosana/starptautiskie_ligumi/daba/?doc=2952 (accessed on 17/03/2022)
81. VARAM (2021) Vides politikas pamatnostādnes 2021. – 2027. gadam. 114 lpp.
82. Varga, D., Soto, M., Arias.C.A., Oirschot, D., Kilian, R., Pascual, A., Alvarez, J. (2017) Chapter 8: Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients. In Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater. IGI Global, 202-230 p. Doi:10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008
83. Ventura, D., Barbagallo, S., Consoli, S., Ferrante, M., Milani, M., Licciardello, F., & Cirelli, G. L. (2019). On the performance of a pilot hybrid constructed wetland for stormwater recovery in Mediterranean climate. Water Science and Technology, 79(6), 1051–1059. doi:10.2166/wst.2019.103
84. Virszemes ūdeņu kvalitātes monitoringa rokasgrāmata. (2003) State Ltd. “Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre”. Available at: <https://www.meteo.lv/lapas/noverojumi/noverojumu-arhivs/monitoringa-rokasgramatas/monitoringa-rokasgramatas?id=1536&nid=690> (accessed on 10/11/2019)
85. Vymazal J, Kropfelova L. (2010) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Czech University of Life Sciences Prague. Springer. 566 p.
86. Vymazal J. (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 380: 48–65.
87. Vymazal J. (2008) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. Proceedings of Taal 2007, The 12th World Lake Conference, 965–980.
88. Vymazal J. (2009) Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. Science of the Total Environment, 407: 3911 – 3922.
89. Vymazal J., Brezinova T. (2015) The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review. Environment International 75, 11-20.
90. Vymazal, J. (2002) The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. Ecological Engineering 18, 633–646.

91. Vymazal, J., Sochacki, A., Fučík, P., Šereš, M., Kaplická, M., Hnátková, T., & Chen, Z. (2020). Constructed wetlands with subsurface flow for nitrogen removal from tile drainage. *Ecological Engineering*, 155, 105943. doi:10.1016/j.ecoleng.2020.105943
92. Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318. doi:10.1016/j.ecoleng.2021.106318
93. Walkowiak, D.K. (2008) Isco Open Channel Flow Measurement Handbook. Sixth Edition. Teledyne Isco. ISBN 0-9622757-3-5
94. Wang J., Wang W., Xiong J, Li L., Zhao B., Sohail I., He Z. (2021). A constructed wetland system with aquatic macrophytes for cleaning contaminated runoff/storm water from urban area in Florida. *Journal of Environmental Management*, Volume 280, 111794, ISSN 0301-4797. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111794
95. Weerakoon G.M.P.R, Jinadasa K.B.S.N. Herath G.B.B. Mowjood M.I.M., van Bruggen J.J.A. (2013) Impact of the hydraulic loading rate on pollutants removal in tropical horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, Volume 61, Part A, Pages 154-160, ISSN 0925-8574, doi:10.1016/j.ecoleng.2013.09.016
96. Wojciechowska, E., Gajewska, M., & Ostojski, O. (2017). Reliability of nitrogen removal processes in multistage treatment wetlands receiving high-strength wastewater. *Ecological Engineering* 98, 365–371.

Pateicības

Monitoringa objekts ar mākslīgajiem mitrājiem Mežacīruļos izbūvēts ar Pasaules dabas fonda un Jura Cīruļa personīgo atbalstu. Ūdeņu kvalitātes monitorings veikts Lauku atbalsta dienesta un Zemkopības ministrijas subsīdiju tēmu projektu “Virszemes ūdeņu un gruntsūdeņu kvalitātes pārraudzība īpaši jutīgajās teritorijās un lauksaimniecības zemēs lauksaimniecības noteču monitoringa programmā” ietvaros, Central Baltic programmas Interreg projekta NUTRINFLOW ietvaros, kā arī LLU programmas “Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU” projekts “Bioķīmiskā un ķīmiskā skābekļa patēriņa novērtējums pazemes plūsmas mākslīgajā mitrzemē” ietvaros. Aprīkojums ūdens līmeņa mērījumiem iegādāts ar ES Kohēzijas fonda infrastruktūras projekta finansējuma atbalstu. Esmu pateicīga par iespēju piedalīties zinātniskajos projektos, kas veidoja finansiālo atbalstu pētījumam un pētījuma rezultātu izplatīšanai.

Pateicība manam pirmajam vadītājam profesoram Ērikam Tilgalim, lai viņam viegli ūdeņi! Viņš man parādīja ceļu uz manu pētījuma tēmu un ievadīja mākslīgo mitrāju pasaulē. Viņš mani vadīja, ticēja un uzticējās, rēķinājās ar mani pat sākumā, kad es vēl daudz ko nezināju. Ar lieku padomu viņš netraucēja, bet, ja es jautāju, viņš vienmēr bija pieejams un maksimāli iedziļinājās. Vienmēr bez izņēmuma es iznācu no viņa kabineta ar konsultantu telefona numuriem, kuri jau gaidīja manu zvanu, ar turpmāko darbu sarakstu un ar zīmuli sašvīkātām rasējumu skicēm uz otrreiz izmantotajām lapām. Viņš neizkrāsoja manas drukas kļūdas vai komatus, tas palika uz manu atbildību, tika izlabota tikai būtība, ja bija nepieciešams. Viņam viss bija vienkārši, un es nebaidījos darīt! Esmu pateicīga par šo pieredzi.

Paldies maniem kolēģiem par sadarbību projektu ietvaros, ieteikumiem un motivējošām sarunām promocijas procesa nobeigumā.

Paldies manai ģimenei par pacietību! Bērni, es vairs nesēdēju tikai pie datora brīvdienās, vakaros un svētku dienās. Un ģimenes brīvdienu ekskursijās mēs turpmāk dosimies ne tikai uz to objektu “ar siltumnīcām un govīm” pēc ūdeņu paraugiem.

Paldies manam vistuvākajam un vislielākajam atbalstam Didzim, kurš mani atbalstīja, mudināja, izaicināja un pats galvenais, nekad nepārstāja ticēt.

PIELIKUMI

Aprēķinu modeļa blokshēma

