



Interreg
Latvija-Lietuva

European Regional Development Fund



EUROPEAN UNION



MEDWwater

**Ieteikumi notekūdeņu attīrīšanas
iekārtām drošai farmaceitisko vielu
attīrīšanai un monitorējamām
farmaceitiskajām vielām**

D.T3.3.1 ziņojums

2023

Nature
Needs
No Pill



LATVIJAS
HIDROEKOĻĢIJAS
INSTITŪTS



KURZEMES
PLĀNOŠANAS
REĢIONS



LATVIJAS VIDES, ĢEOĻĢIJAS
UN METEOROLOĢIJAS CENTRS



Klaipeda
University



Zāļu valsts aģentūra





Projekts Nr. LLI-527

Farmaceitiskās vielas notekūdeņos – daudzums, ietekmes un iespējas to samazināšanai MEDWwater

Projekta mērķis ir uzlabot farmaceitisko vielu piesārņojuma pārvaldības efektivitāti un stiprināt sadarbību starp valsts institūcijām un notekūdeņu attīrīšanas iekārtu operatoriem

Kopējās projekta izmaksas
673 773 EUR

Projekta līdzfinansējums no Eiropas Reģionālās attīstības fonda
572 707 EUR

Projekta īstenošanas laiks:
01.02.2021. - 31.12.2022.

PROJEKTA PARTNERI:

- Daugavpils Universitātes aģentūra "Latvijas Hidroekoloģijas Institūts". www.lhei.lv
- Kurzemes Plānošanas reģions. www.kurzemesregions.lv
- Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. www.videscentrs.lv/gmc.lv
- Klaipēdas Universitāte. www.ku.lt
- Zāļu valsts aģentūra. www.zva.gov.lv
- Lietuvas veselības ministrijas valsts zāļu kontroles aģentūra. www.vvkt.lt

Projektu līdzfinansē

Interreg V-A Latvijas - Lietuvas pārrobežu sadarbības programma
2014.–2020. gadam. www.latlit.eu

Dabai
Tableti
Nevajag



Autors: **Erki Lembers (Erki Lember)**, ME Water Consult OÜ (pamatteksts)

Anete Kubliņa¹⁾, Ilga Kokorīte¹⁾, Ieva Putna²⁾, Sergej Suzdalev³⁾ (1. pielikums)

- 1) Latvijas Ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs
- 2) Latvijas Hidroekoloģijas institūts
- 3) Klaipēdas universitāte

Šis dokuments ir sagatavots ar Eiropas Savienības finansiālu atbalstu. Par šī dokumenta saturu pilnībā atbild Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs / Latvijas Hidroekoloģijas institūts / Klaipēdas universitāte un tas nekādos apstākļos nav uzskatāms par Eiropas Savienības nostāju.

Saturs

<i>Glosārijs</i>	5
<i>levads</i>	6
<i>Pašreizējais stāvoklis notekūdeņu attīrīšanā</i>	6
1. FAV notekūdeņos	10
1.1. Juridiskie stimuli attīrīšanai no FAV	10
2. Paraugu ņemšana un mikropiesārņotāju analīze	12
3. FAV komunālajās NAI	14
3.1. FAV attīrīšanas efektivitāte komunālajās notekūdeņu attīrīšanas iekārtās	16
4. FAV attīrīšanas tehnoloģijas plānošana	19
4.1. Pēcattīrīšanas tehnoloģijas izvēle	24
5. Aktīvās ogles process	26
5.1. PAO apstrādes plānošana	28
5.1.2. PAO uzglabāšana	32
5.1.3. PAO turpmāka apstrāde.....	32
5.2. GAO apstrādes plānošana	33
5.2.1. GAO reģenerācija	36
5.3. Aktivētās ogles procesa kontrole	37
6. Ozonēšana	37
6.1. Ozonēšanas plānošana, lai attīrītu mikropiesārņotājus	39
6.2. FAV attīrīšana ar ozonēšanu	41
6.3. Ozonēšanas procesa kontrole	43
7. Padziļināta oksidēšana	44
8. Dzelzs (+6) oksīds	45
9. Membrānu filtrēšana	46
10. Citi tehnoloģiskie risinājumi mikropiesārņotāju likvidēšanai	47
11. Mikropiesārņotāju attīrīšanas izmaksas	49
12. FAV notekūdeņu dūnās	51
13. Ieteikumu kopsavilkums par mikropiesārņotāju attīrīšanu Latvijā un Lietuvā	54
<i>Bibliogrāfija</i>	56
<i>Pielikums</i>	58

Glosārijs

BAO - bioloģiski aktīvās ogles filtrācija

BSP – bioķīmiskais skābekļa patēriņš

CE – cilvēka ekvivalents

DOC – izšķīdušais organiskais ogleklis

FAV – farmaceutiski aktīvā viela

GAO – granulveida aktīvā ogle

ĶSP – ķīmiskais skābekļa patēriņš

LOX – šķidrās skābeklis

NAI – notekūdeņu attīrīšanas iekārta

PAO - pulverveida aktīvā ogle

QL - kvantitatīvās noteikšanas robeža, apzīmē minimālo iespējamo koncentrāciju, ko var uzticamā veidā noteikt ar analītisko metodi.

TSS – kopējās suspendētās vielas

Levads

Daudzviet pasaulē ar notekūdeņu attīrīšanu nodarbojas jau vairāk nekā 100 gadu. Notekūdeņu attīrīšanas mērķis ir aizsargāt virszemes ūdeņus no piesārņojuma, galvenokārt samazinot organisko vielu, fosfora un slāpekļa daudzumu. Šie piesārņotāji izraisa izšķīdušā skābekļa koncentrācijas samazināšanos virszemes ūdeņos un ūdenstilpju eitrofikāciju. Baltijā komunālās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas (NAI) vēl nav paredzētas bīstamo vielu, piemēram, smago metālu, mikroplastmasu un mikropiesārņotāju, tostarp farmaceitisko preparātu atlieku, attīrīšanai. Dažās ražotnēs notiek attīrīšana no smagajiem metāliem un īpaši bīstamajām vielām.

ES ir atļāvusi vairāk nekā 100 000 dažādus ķīmiskos savienojumus (tostarp vairāk nekā 3 600 dažādu aktīvo farmaceitisko vielu jeb FAV), kur 1/3 no tām ražo daudzumos, kas pārsniedz 1 tonnu gadā. Šo savienojumu atliekas no ražošanas vietām un patērētājiem var nonākt notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, no kurām tās nevar attīrīt ar pašreizējām tehnoloģijām. Lai gan mikropiesārņotāju gadījumā tiek runāts par koncentrācijām, ko mēra $\mu\text{g/l}$ un ng/l un kas vairumā gadījumu nerada apdraudējumu, zinātnieki joprojām ir nobažījušies par dažu šo savienojumu dzīves ciklu. Ja šie savienojumi nav bioloģiski noārdāmi, tie uzkrājas vidē un var sasniegt bīstamu līmeni. Turklāt nav pilnīgi skaidrs, kāda ir mikropiesārņotāju kombinētā ietekme. Līdz ar to ES ir apņēmusies samazināt mikropiesārņotāju, tostarp FAV, radīto slodzi uz vidi. Vislabākais veids, kā to panākt, ir novērst piesārņojumu tā rašanās vietā, aizstāt dažus produktus ar videi nekaitīgākiem u. tml., taču tas ne vienmēr ir iespējams. Tāpēc var gadīties, ka ar laiku arī komunālajām NAI tiks piemērotas prasības notekūdeņus attīrīt arī no mikropiesārņotājiem.

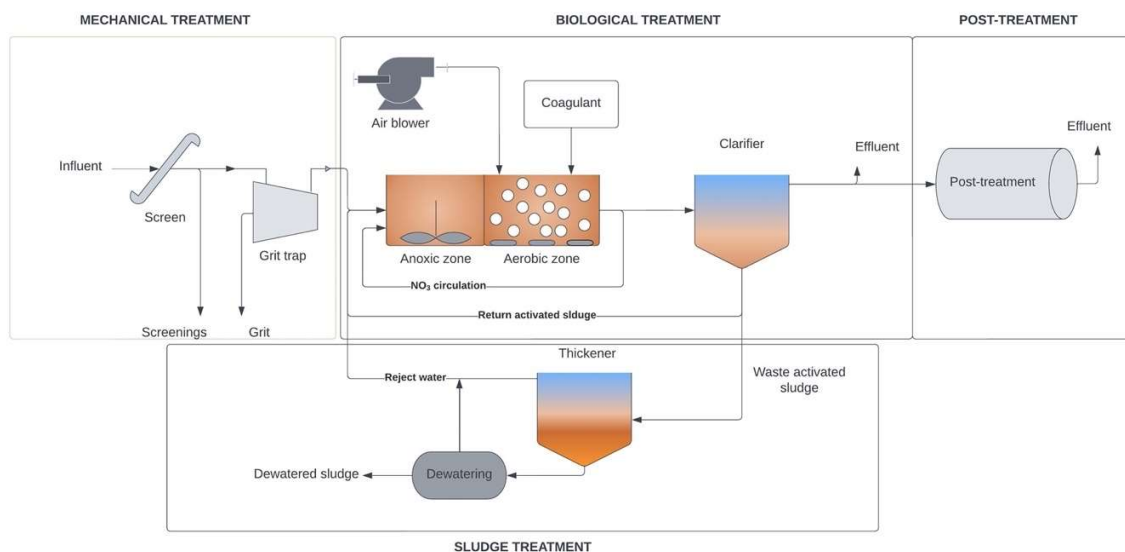
Šajā vadlīniju materiālā tiek sniegts pārskats par notekūdeņu attīrīšanas pašreizējo stāvokli un iepazīstināts ar tehnoloģisko risinājumu veidiem ceturtās pakāpes notekūdeņu attīrīšanas¹ (pēcattīrīšanas) izveidei. Aizvien stingrāki piesārņojuma ierobežojumi un jaunas problēmas, piemēram, mikropiesārņotāji notekūdeņos, veicina vajadzību pēc pēcattīrīšanas. Tā kā daudzi tehnoloģiskie risinājumi ļauj vienā apstrādes posmā atrisināt vairākas problēmas, tiek aplūkotas arī iespējamās sinerģijas, kas ļauj samazināt izmaksas.

Pašreizējais stāvoklis notekūdeņu attīrīšanā

Parastajās NAI process sākas ar mehāniskās attīrīšanas posmu, kurā tiek atdalītas peldošās un nogulsņejošās vielas. Tas tiek darīts, lai novērstu sūkņu aizsērēšanu ar peldošām cietajām

¹ Komunālo notekūdeņu papildu attīrīšana, lai novērstu pēc iespējas plašāku mikropiesārņotāju spektru. Avots: Priekšlikums pārskatītajai komunālo notekūdeņu direktīvai (26.10.2022)

daļiņām un lai no notekūdeņiem atdalītu daļiņas, kas nenosēžas, piemēram, plastmasu, ko nevar atdalīt turpmākajos attīrīšanas procesa posmos, kuros cietās daļiņas no notekūdeņiem galvenokārt tiek atdalītas gravitācijas ceļā. Suspēdētās vielas, piemēram, smiltis, ir abrazīvas un nogulsņējas uz grunts, radot sūkņu un atkritumu aktivēto dūņu centrifūgu nodilumu un nogulumus tajās, piemēram, bioreaktora dibenā. Tāpēc liela izmēra suspēdētās un peldošās vielas bieži tiek atdalītas, izlaižot notekūdeņus caur sietiem, bet maza izmēra suspēdētās vielas, piemēram, smiltis, tiek atdalītas, izmantojot smilšu uztvērējus.



1. attēls. Tipiska notekūdeņu attīrīšanas iekārtas (NAI) procesa shēma.

Termini attēlā:

- Aerobic zone - aerobā zona
- Air blower - gaisa pūtējs
- Anoxic zone - anoksā zona
- Biological treatment - bioloģiskā attīrīšana
- Clarifier - dzidrinātājs
- Coagulant - koagulants
- Dewatered sludge - atūdeņotās dūņas
- Dewatering - atūdeņošana
- Effluent - efluents (izplūde)
- Grit - nosēdumi
- Grit filter - smilšu ķērājs
- Influent - influents (ieplūde)
- Mechanical treatment - mehāniskā attīrīšana
- NO₂ circulation - NO₂ cirkulācija
- Post-treatment - pēcattīrīšana
- Reject water - fugāts
- Return activated sludge - atgrieztās aktīvās dūņas
- Screen - režģi
- Screenings - rupjā frakcija

Sludge treatment - dūņu apstrāde
Thickener - biezinātājs
Waste activated sludge - atstrādātās aktīvās dūņas

Pēc mehāniskās attīrīšanas seko bioloģiskā attīrīšana, lai no notekūdeņiem atdalītu bioloģiski noārdāmo piesārņojumu. Visizplatītākie bioloģiskās attīrīšanas veidi ir aktivēto dūņu process un bioplēves apstrāde. Baltijā visizplatītākais attīrīšanas veids ir aktīvās dūņas, kas labāk darbojas salīdzinoši aukstā klimatā. Bioloģiskās attīrīšanas laikā izšķīdušās piesārņojošās vielas, piemēram, organiskās vielas (ko mēra kā KSP un BSP), slāpekli un fosforu, patērē mikroorganismi. Rezultātā palielinās biomasas īpatsvars, t. i., izšķīdušās piesārņojošās vielas no šķidrums pāriet notekūdeņu dūņu biomasā, kura periodiski tiek aizvāktas kā atstrādātās jeb liekās aktīvās dūņas. Arī kopējās suspendētās vielas (TSS), kas sastāv no organiskām vielām, slāpekļa un fosfora, nonāk biomasā. Piesārņotāju attiecība, ko uzskata par ideālu bioloģiskai attīrīšanai, ir 100-5-1, t. i., uz katrām 100 daļām BSP_5 tiek izmantotas 5 daļas slāpekļa un 1 daļa fosfora (ja tiek izmantota arī denitrifikācija, tad 1,5 daļas).

1. piemērs:

Piemērā parādīta NAI ar šādiem ieplūdes raksturlielumiem:

BSP_5 350 mg/l

$N_{\text{Kopā}}$ 55 mg/l

$P_{\text{Kopā}}$ 15 mg/l

Šajā piemērā, lai patērētu visu BSP_5 , mikroorganismi izmanto $350 \text{ mg/l} * 0,05 = 17,5 \text{ mg/l}$ slāpekļa, t. i., kopējā slāpekļa koncentrācija notekūdeņos ir $55 \text{ mg/l} - 17,5 \text{ mg/l} = 37,5 \text{ mg/l}$, bet fosfora — $350 \text{ mg/l} * 0,01 = 3,5 \text{ mg/l}$, ja fosfora koncentrācija notekūdeņos ir $15 \text{ mg/l} - 3,5 \text{ mg/l} = 11,5 \text{ mg/l}$.

1. piemērs liecina, ka liela daļa piesārņojošo vielu jau tiek izmantota mikroorganismu augšanai, tomēr ar to nepietiek, lai saglabātu vai uzlabotu virszemes ūdeņu stāvokli. Tāpēc daudzās lielākās NAI tiek nodrošināta pastiprināta slāpekļa attīrīšana jeb nitrifikācija un denitrifikācija. Tā kā, ieplūstot notekūdeņu attīrīšanas iekārtā, slāpekļis galvenokārt nonāk amonija un organiskā slāpekļa veidā, amonija slāpekļis ($\text{NH}_4\text{-N}$) vispirms jāoksidē līdz nitrātu slāpeklim ($\text{NO}_3\text{-N}$). Šo procesu sauc par nitrifikāciju un tas notiek izšķīdušā skābekļa klātbūtnē, t. i., aerobos apstākļos. Nitrātu atdalīšanai izmanto denitrifikāciju, kad anoksiskos apstākļos (t. i., nav izšķīdušā skābekļa, bet ir ķīmiski saistītais skābeklis) mikroorganismi izmanto saistīto skābekli, lai atdalītu organiskās vielas, t. i., atņem to no $\text{NO}_3\text{-N}$. Šī procesa rezultātā N_2 izdalās kā gāze.

Fosforu no notekūdeņiem izvada gan bioloģiski, gan ķīmiski. Visizplatītākais tehnoloģiskā risinājuma veids ir ķīmiskā koagulācija, kad, piemēram, bioloģiskajai attīrīšanai pievieno ķīmiskās vielas uz FeCl_3 un $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ bāzes, kas ūdenī hidrolizējas un reaģē ar ortofosfātiem ($\text{PO}_4\text{-P}$), veidojot nešķīstošus savienojumus (sāļus), kuri uzkrājas atkritumu aktīvajās dūņās. Bioloģiskā fosfora aizvākšana ir balstīta uz mikroorganismiem, kas spēj savās šūnās uzkrāt vairāk fosfora, nekā tiem nepieciešams dzīvībai, t. i., 1. piemērā 1% BSP vietā tiek uzskaitīti 2,5%.

Bioloģiskās attīrīšanas pēdējais posms parasti ietver biomasas atdalīšanu no attīrītajiem notekūdeņiem, izmantojot otrējos nostādinātājus (dzidrinātājus) (sedimentācijas posms periodiskās attīrīšanas iekārtās) vai membrānu filtrus membrānu bioreaktorā. Tā kā bioloģiskajai attīrīšanai nepieciešamās biomasas (turpmāk tekstā — „aktīvās dūņas“) augšana ir relatīvi lēna (vasarā procesa sākšanai nepieciešamas 2–3 nedēļas, bet ziemā — pat vairāki mēneši), liela daļa aktīvo dūņu ir jāpārsūknē atpakaļ procesa sākumā. Tikai neliela daļa aktivēto dūņu tiek aizvadīta kā atstrādātās (liekās) dūņas, kuras atkarībā no notekūdeņu attīrīšanas iekārtas tiek sabiezinātas, atūdeņotas un stabilizētas.

Lai gan daudzās attīrīšanas iekārtās Baltijā ir ieviesta pēcattīrīšana, vairumā gadījumu tā nav paredzēta mikropiesārņotāju, bet galvenokārt barības vielu, piemēram, slāpekļa un fosfora, tālākai atdalīšanai. Visizplatītākais pēcapstrādes tehnoloģijas veids ir disku filtrs, kas likvidē TSS un tādējādi samazina fosfora radīto ietekmi uz vidi. Turpmākajās nodaļās sīkāk tiek aplūkota FAV likvidēšana notekūdeņu attīrīšanas iekārtās un analizēta iespējamā sinerģija, kas ļautu izmantot vienu attīrīšanas posmu vairāku problēmu risināšanai:

- Kā samazināt mikropiesārņotāju, tostarp FAV, koncentrāciju?
- Kā samazināt barības vielu, piemēram, slāpekļa un fosfora, koncentrāciju?

1. FAV notekūdeņos

Tā kā FAV ir samērā šaurs jēdziens, turpmāk, runājot par tehnoloģisko risinājumu veidiem, tiks lietots termins „mikropiesārņotāji“. Tas ir saistīts ar to, ka FAV un daudzu mikropiesārņotāju, piemēram, biocīdu, pesticīdu u. c., likvidēšanas tehnoloģisko risinājumu veidi ir vienādi. Mikropiesārņotāji ir bīstami savienojumi, kuru koncentrācija ir daži μ /l vai mazāka. Parasti tie ir antropogēni savienojumi, piemēram:

- FAV (lietošanai cilvēkiem un veterinārijā);
- rūpnieciskās ķīmiskās vielas;
- kopšanas līdzekļi;
- hormoni (mākslīgi un dabiski);
- augu aizsardzības līdzekļi (pesticīdi, herbicīdi).

Galvenā problēma, kas saistīta ar mikropiesārņotājiem, ir to zemā adsorbcijas spēja, t. i., daudzas vielas izkļūst cauri komunālo notekūdeņu attīrīšanas iekārtām un nonāk vidē. Lai gan ir savienojumi, kas uzkrājas, piemēram, notekūdeņu dūņās, tas atkal rada problēmas ar notekūdeņu dūņu atkārtotu izmantošanu lauksaimniecībā. Mikropiesārņotāji nonāk ūdens aprītē, laika gaitā palielinot to koncentrāciju dzeramajā ūdenī (Vācijā gruntsūdeņos konstatētas 60 FAV, kamēr Šveicē FAV konstatētas 15% gruntsūdeņu mērījumu punktos²). Tomēr tie vēl ātrāk un tieši ietekmē virszemes ūdeņu organismus, kas arī var nonākt uz mūsu pusdienu šķīvja.

1.1. Juridiskie stimuli attīrīšanai no FAV

Tiks veiktas izmaiņas Komunālo notekūdeņu attīrīšanas direktīvā saskaņā ar Eiropas Komisijas priekšlikumiem, kas saistīti ar ūdeni un nākotnē paredzēs nulles emisiju paketi. Lai gan dažu vielu pilnīga attīrīšana notekūdeņu attīrīšanas iekārtās būtu neekonomiska, tomēr ir ierosināts sākt ar pēcattīrīšanu, lai samazinātu mikropiesārņotāju radīto slodzi uz vidi. Sākotnēji uzmanība tiks pievērsta NAI ar > 100 000 cilvēku ekvivalentu (CE), kam jāsākas ar mikropiesārņotāju attīrīšanu. Ierosinātā prasība ir nodrošināt 80% koncentrācijas samazinājumu izplūdē sešām sarakstā iekļautajām vielām. Vēlāk šo pašu prasību piemēros notekūdeņu attīrīšanas iekārtām, kurās ir > 10 000 CE vai kuras atrodas teritorijās, kas identificētas kā jutīgas pret piesārņojumu ar mikropiesārņotājiem, ja vien dalībvalstis, pamatojoties uz riska novērtējumu,

² Federal Office for the Environment FOEN, 2022. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-des-grundwassers/grundwasser-qualitaet/arsneimittel-im-grundwasser.html>

nepierādīs, ka nepastāv risks videi vai sabiedrības veselībai. Tiks palielināta arī farmaceitisko produktu ražotāju atbildība, kas paredzēta *Eiropas farmācijas stratēģijā*.

Saskaņā ar ierosināto jauno Komunālo notekūdeņu attīrīšanas direktīvu ūdensapgādes uzņēmumiem ir jāsāk uzraudzīt turpmāk uzskaitītās organiskās piesārņojošās vielas, tostarp dažas FAV, un jāpanāk, lai 6 no tām tiktu nodrošināta koncentrācijas samazināšana izplūdē vismaz 80% apmērā.³ Lai gan šajā direktīvā nav teikts, vai šīs prasības tiks uzskatītas par izpildītām, ja atdalīšana tiek panākta bez pēcapstrādes, tomēr tiek pieņemts, ka tiek veikta pēcapstrāde.

1. kategorija (ļoti viegli apstrādājamas vielas)⁴:

- Amisulprīds (CAS Nr. 71675-85-9)
- Karbamazepīns* (CAS Nr. 298-46-4)
- Citaloprams (CAS Nr. 59729-33-8)
- Klaritromicīns* (CAS Nr. 81103-11-9)
- Diklofenaks* (CAS Nr. 15307-86-5)
- Hidrohlortiazīds* (CAS Nr. 58-93-5)
- Metoprolols* (CAS Nr. 37350-58-6)
- Venlafaksīns* (CAS Nr. 93413-69-5)

2. kategorija (viegli iznīcināmas vielas):

- Benzotriazols (CAS Nr. 95-14-7)
- Kandesartāns (CAS Nr. 139481-59-7)
- Irbesartāns (CAS Nr. 138402-11-6)
- 4-metilbenzotriazola (CAS Nr. 29878-31-7) un 6-metilbenzotriazola (CAS Nr. 136-85-6) maisījums

** Ar zvaigznīti (*) apzīmētās FAV tika pētītas arī 16 dažādās Latvijas un Lietuvas notekūdeņu attīrīšanas iekārtās projekta MEDWwater ietvaros.*

Prasības turpmākai FAV uzraudzībai ir apkopotas 1. pielikumā. Pielikumā ir iekļautas FAV, kuras ir prasīts monitorēt vidē priekšlikumos par jauno Komunālo notekūdeņu attīrīšanas direktīvu, priekšlikumā par Eiropas Parlamenta un Padomes direktīvu, ar ko groza Direktīvas 2000/60/EK, 2006/118/EK,

³ Attīrīšanas procentuālo daudzumu aprēķina vismaz sešām vielām. Vielu skaits 1. kategorijā ir divreiz lielāks par vielu skaitu 2. kategorijā. Ja pietiekamā koncentrācijā var izmērīt mazāk nekā sešas vielas, kompetentā iestāde, ja tas ir nepieciešams, norāda citas vielas, lai aprēķinātu minimālo samazinājuma procentuālo daudzumu. Lai novērtētu, vai ir sasniegta prasītā minimālā 80% attīrīšanas efektivitāte, izmanto visu aprēķinā izmantoto vielu samazinājuma procentu vidējo vērtību.

⁴ Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Brussels, 26.10.2022 COM(2022) 541 final ANNEXES 1 to 8.

2008/105/EK⁵, lēmumā par virszemes ūdeņu monitoringa sarakstu un HELCOM indikatoru prasībām, un kuras saskaņā ar MEDWwater projekta rezultātiem bija problemātiskas ūdens videi.

2. Paraugu ņemšana un mikropiesārņotāju analīze

Mikropiesārņotāji NAI dažviet tiek pētīti jau šobrīd, bet šeit ir daži pamatjautājumi, uz ko būtu jāpievērš uzmanība, ņemot paraugus. Saskaņā ar jauno ierosināto Komunālo notekūdeņu attīrīšanas direktīvu mikropiesārņotāju paraugi jāņem šādi:

- NAI 10 000–49 000 i.e.: 1 paraugs mēnesī,
- NAI ar > 50 000 i.e.: 2 paraugi nedēļā.

Ņemot paraugus no mikropiesārņotājiem, jāņem vērā, ka to koncentrācija ir ļoti zema, tāpēc tā atšķiras no tradicionālajām standartizētajām metodēm. Diemžēl šobrīd nav standarta metožu mikropiesārņotāju paraugu ņemšanai, bet, tā kā zinātnieki jau kādu laiku strādā pie šī jautājuma, ir zināmi daži principi, kas būtu jāievēro.

Paraugu ņemšana tieši ietekmē analīzes rezultātus. Rezultāti, protams, vispirms būs atkarīgi no paraugu ņemšanas veida — vai tas ir vienreizējais paraugs vai saliktais paraugs, kas savukārt var būt laika ziņā proporcionāls vai plūsmas ziņā proporcionāls saliktais paraugs. Šajā gadījumā priekšroka būtu jādod 24 stundu saliktajiem paraugiem (dažos gadījumos arī 48 stundu un 72 stundu paraugiem, kas savākti kā 24 stundu saliktie paraugi), nevis vienreizējiem paraugiem. Rezultātus ietekmē arī izmantotie paraugu ņemšanas instrumenti. Daži mikropiesārņotāji var adsorbēties uz automātisko paraugu ņemšanas ierīču caurulītēm, blīvēm vai traukiem un atkal izdalīties, mainoties noteiktiem apstākļiem. Tas tieši ietekmē piesārņotāju koncentrāciju paraugā. Tāpēc rezultāti, kas ir augstāki nekā parasti, ir jāvērtē kritiski. Koncentrācija mainās arī sezonāli. Piemēram, ziemā tiek lietots vairāk antibiotiku nekā vasarā. Tā kā daži no mikropiesārņotājiem ir bioloģiski noārdāmi, to koncentrācijas samazināšanās paraugā jānovērš, piepildot parauga pudeli līdz galam, lai izvairītos no pārmērīgas aerācijas, un paraugs nekavējoties jānovieto aukstumā, apmēram 4°C temperatūrā, paraugu sasaldēšana nav ieteicama^{6,7}

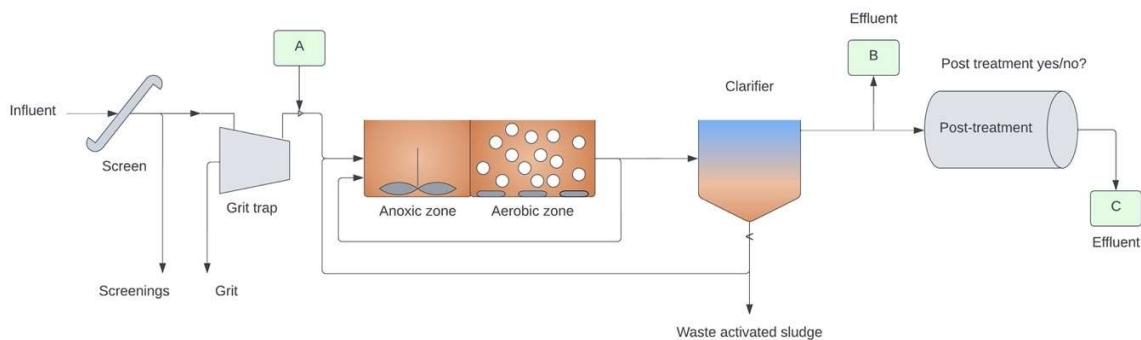
Lai novērtētu NAI mikropiesārņotāju slodzi un attīrīšanas efektivitāti, vēlams ņemt iekļūdes paraugus no notekūdeņiem, kas ir mehāniski attīrīti. Tas samazinās peldošo un suspendēto vielu

⁵ Eiropas Parlamenta un Padomes direktīva, ar kuru groza Direktīvu 2000/60/EK, ar ko izveido sistēmu Kopienas rīcībai ūdens resursu politikas jomā, Direktīvu 2006/118/EK par gruntsūdeņu aizsardzību pret piesārņojumu un pasliktināšanos un Direktīvu 2008/105/EK par vides kvalitātes standartiem ūdens resursu politikas jomā

⁶ Spurenstoffe im Abwasser, eine Handlungsempfehlung für Kommunen, Kompetenzzentrum Spurenstoffe, Oktober 2020.

⁷ Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen, DWA T3/2015, April 2015.

īpatsvaru, kas jebkurā gadījumā analīzes laikā tiek filtrēts. Notekūdeņu paraugus notekūdeņu attīrīšanas iekārtās bez pēcattīrīšanas ņem pēc gala attīrītājiem. Ja ir pieejama pēcapstrāde, paraugus ņem gan pēc gala attīrīšanas, gan pēcattīrīšanas.



2. attēls. Mikropiesārņotāju paraugu ņemšanas vietas: A — ieplūde, B — notekūdeņi un, ja ir pieejama pēcattīrīšana, papildu paraugu ņem no C punkta.

Termini attēlā:

Aerobic zone - aerobā zona
 Air blower - gaisa pūtējs
 Anoxic zone - anoksā zona
 Biological treatment - bioloģiskā attīrīšana
 Clarifier - dzidrinātājs
 Coagulant - koagulants
 Dewatered sludge - atūdeņotās dūņas
 Dewatering - atūdeņošana
 Effluent - efluents (izplūde)
 Grit - nosēdumi
 Grit filter - smilšu ķērājs
 Influent - influents (ieplūde)
 Mechanical treatment - mehāniskā attīrīšana
 NO₂ circulation - NO₂ cirkulācija
 Post-treatment - pēcattīrīšana
 Reject water - fugāts
 Return activated sludge - atgrieztās aktīvās dūņas
 Screen - režģis
 Screenings - rupjā frakcija
 Sludge treatment - dūņu apstrāde
 Thickener - biezinātājs
 Waste activated sludge - atstrādātās aktīvās dūņas

Attiecībā uz parauga tvertni nav iespējams izvairīties no tā, ka daļa parauga tiek adsorbēta uz tās sieniņām. Paraugu ņemšanai un uzglabāšanai vispiemērotākās ir brūna stikla pudeles, kas arī samazina iespējamo FAV noārdīšanos gaismas ietekmē. Pudele ir jāaiztaisa ar vienkāršu vāciņu vai vāciņu ar teflona pārklājumu.

Paraugu var īslaicīgi uzglabāt 4 °C temperatūrā vai sasaldēt. Sasaldējot jāņem vērā, ka tas var ietekmēt FAV koncentrāciju, jo parauga sasaldēšana un atkārtota atkausēšana izraisa kristalizācijas procesus. Ja izmanto citas uzglabāšanas metodes, piemēram, paskābināšanu, jāņem vērā, ka arī tas var ietekmēt piesārņotāju koncentrāciju. Tas īpaši ietekmē dažu mikropiesārņotāju adsorbciju, t. i., var palielināties mikropiesārņotāju adsorbcija uz paraugu ņemšanas trauka virsmas. Piemēram, paskābināšana uz fenola bāzes samazina parauga pH, kas palielina dažu FAV adsorbciju. Jāizvairās no parauga konservēšanas ar biocīdiem, vara sāļiem un nātrija azīdu.

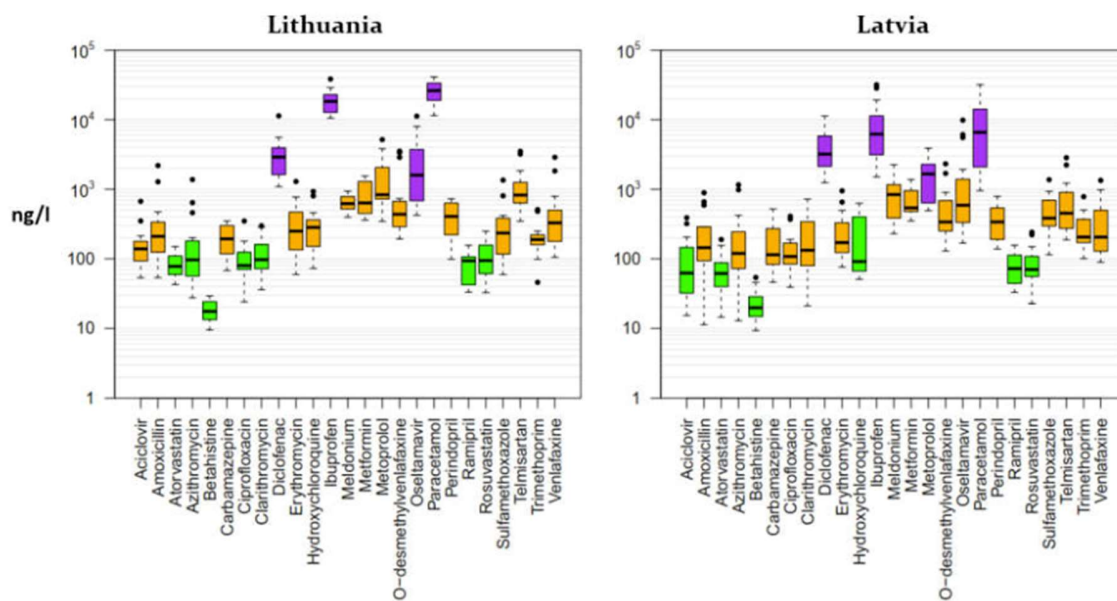
Bieži pirms mikropiesārņotāju mērīšanas paraugs ir jākoncentrē. Izplatīta ir paraugu sagatavošana, mainot pH. Piemēram, lai izmērītu diklofenaku un ibuprofēnu, paraugu paskābina, veic karbamazepīnu un propfenazonu ekstrakciju, izmantojot, piemēram, neitrālu vai sārmainu paraugu. Līdzīgi tiek noņemtas matricas, kas traucē parauga analīzi, piemēram, TSS, kas diemžēl arī var mainīt analīžu rezultātus.

Lielu daļu mikropiesārņotāju koncentrāciju var izmērīt ar hromatogrāfijas metodi. Šim nolūkam izmanto gāzu (GC/MS) vai šķidrums hromatogrāfus (HPLC/MC/MS). Tā kā paraugu rezultāti ir atkarīgi no daudziem faktoriem, jāņem vērā, ka paraugu, kas pārsniedz kvantitatīvās noteikšanas robežu (QL), variācija var būt 20–30%, bet paraugu, kas ir tuvu QL, variācija var būt pat 50%.

3. FAV komunālajās NAI

Notekūdeņi no NAI ir viens no svarīgākajiem FAV piesārņojuma avotiem, jo tajos koncentrējas gan bezrecepšu zāļu atliekas, gan slimnīcās lietotie farmaceitiskie preparāti. Tomēr nevar apgalvot, ka NAI rada FAV slodzi videi. Šis ir viens no iespējamiem punktiem, kur varētu noņemt FAV. Vispiemērotākais veids, kā risināt šo problēmu, būtu pārtraukt videi bīstamo farmaceitisko līdzekļu lietošanu vai aizstāt tos ar mazāk bīstamiem, taču tas ne vienmēr ir iespējams.

Latvijā un Lietuvā FAV notekūdeņu attīrīšanas iekārtās ir pētīta vairākos projektos, sīkāk CWPharma un MEDWwater projekta ietvaros. Papildus slodzei notekūdeņu ieplūdē un izplūdē tika novērtēta arī FAV koncentrācija notekūdeņu dūņās, kas ir svarīgi, ja dūņas tiek izmantotas aprites ekonomikā.



3. attēls. FAV koncentrācijas, kas izmērītas Lietuvas (pa kreisi) un Latvijas (pa labi) NAI iepildē. 2 paraugu ņemšanas reizes uz NAI kopā 8 NAI katrā valstī ($n = 16$ valstī; $C < QL = QL^8$). Krāsas izceļ dažādus koncentrācijas līmeņus, ņemot vērā koncentrācijas mediānu > 1000 ng/l (violeta), $100\text{--}1000$ ng/l (dzeltena) un < 100 ng/l (zaļa).

3. attēlā parādītas FAV koncentrācijas, kas izmērītas Latvijas un Lietuvas NAI (8 NAI katrā valstī) MEDWwater projekta ietvaros. Analizēto 25 dažādu FAV koncentrācija svārstījās no 10 līdz 40 000 ng/l. Augstākā koncentrācija tika konstatēta diklofenakam, ibuprofēnam un paracetamolam (NPL un pretsāpju līdzekļiem), metoprololam un oseltamivīram. Tomēr tika konstatēts, ka FAV koncentrācija kopumā abās valstīs saglabājas aptuveni tādā pašā līmenī. Līdzīgi rezultāti ir iegūti arī citās valstīs un citu projektu ietvaros, jo vadlīnijas par zāļu lietošanu visā ES ir līdzīgas. Tomēr ir konstatētas reģionālas atšķirības, piemēram, pilsētās, kurās ir daudz aprūpes iestāžu un slimnīcu, kur FAV koncentrācija ir attiecīgi lielāka. Ir noteikts, ka kopējais farmaceitisko vielu daudzums no slimnīcām uz notekūdeņu attīrīšanas iekārtām vasarā un ziemā Turcijā ir attiecīgi 2% un 4% vai no $< 0,1\%$ līdz 14,8% Japānā, bet Zviedrijā slimnīcu notekūdeņos konstatēto

⁸ QL – kvantitatīvās noteikšanas robeža; apzīmē minimālo iespējamo koncentrāciju, ko var uzticamā veidā noteikt ar analītisko metodi.

AFL kopējā slodze bija maksimāli 3,2% no kopējās FAV slodzes⁹. Jāņem vērā, ka no slimnīcām nāk dažas vielas, kuru avots var būt tikai Veselības aprūpes iestādes^{10,11}.

3.1. FAV attīrīšanas efektivitāte komunālajās notekūdeņu attīrīšanas iekārtās

Lai gan pašlaik Baltijā ekspluatētās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas nav paredzētas attīrīšanai no FAV, tām tomēr izdodas samazināt daudzu vielu koncentrāciju. Attīrīšanas efekta sasniegšanas pakāpe ir atkarīga no vielas biodegradācijas un sorbcijas īpašībām. Bioloģiski noārdāmās FAV noārda mikroorganismi, savukārt sorbējamie savienojumi uzkrājas aktīvajās dūņās. Aplūkojot FAV attīrīšanas efektivitāti, kas sasniegta NAI, galvenokārt redzami šādi procesi:

- atdalīšana: gaistošie savienojumi tiek atdalīti no notekūdeņiem aerācijas laikā;
- biodegradācija: šajā procesā izšķir divus procesus. Pirmajā gadījumā mikroorganismiem ir nepieciešami enzīmi, lai noārdītu daļu piesārņotāju un izmantotu to šūnu būvei/enerģijai. Otrajā gadījumā organiskās vielas tiek noārdītas kopā ar kādu citu savienojumu (piemēram, farmaceitisko preparātu atbalsta vielas dēļ) bez īpašiem enzīmiem;
- adsorbācija aktīvajās dūņās/bioplēvē: daudzi FAV ir viegli adsorbējami to virsmas īpašību dēļ, tāpēc FAV koncentrācija biomasā palielinās, bet koncentrācija notekūdeņos samazinās.

Biodegradācija ir saistīta arī ar risku, ka veidojas jauni metabolīti, kas var ietekmēt vidi vēl nelabvēlīgāk nekā sākotnējā FAV. Tāpēc esošajās NAI ir grūti veikt attīrīšanu no tādām FAV, kas nav gaistošas, bioloģiski noārdāmas vai nesorbējas.

⁹ Henning, H.E., Putna-Nīmane, I. et al. Pharmaceuticals in the Baltic Sea Region – emissions, consumption and environmental risks, 2020. Available: <https://www.lansstyrelsen.se/ostergotland/om-oss/vara-tjanster/publikationer/2020/pharmaceuticals-in-the-baltic-sea-region---emissions-consumption-and-environmental-risks.html>

¹⁰ Ulvi, A., Aydın, S. & Aydın, M.E. Fate of selected pharmaceuticals in hospital and municipal wastewater effluent: occurrence, removal, and environmental risk assessment. *Environ Sci Pollut Res* 29, 75609–75625 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21131-y>

¹¹ Takashi Azuma, Natsumi Arima, Ai Tsukada, Satoru Hiram, Rie Matsuoka, Ryogo Moriwake, Hirokata Ishiuchi, Tomomi Inoyama, Yusuke Teranishi, Misato Yamaoka, Yoshiki Mino, Tetsuya Hayashi, Yoshikazu Fujita, Mikio Masada, Detection of pharmaceuticals and phytochemicals together with their metabolites in hospital effluents in Japan, and their contribution to sewage treatment plant influents, *Science of The Total Environment*, Volumes 548–549, 2016, Pages 189-197, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.157>.

Aplūkojot sīkāk dažādus notekūdeņu attīrīšanas procesus, piemēram, mehānisko attīrīšanu, bioloģisko attīrīšanu un pēcattīrīšanu, lai atdalītu TSS un fosforu, redzams, ka visaugstākā attīrīšanas efektivitāte ir novērojama bioloģiskajai attīrīšanai.

FAV atdalīšanas efektivitāte bioloģiskajā attīrīšanā ir pētīta arī vairākos projektos, tostarp MEDWwater projektā. Tomēr joprojām ir grūti mērķtiecīgi kontrolēt šo procesu. Tā kā FAV koncentrācija ir ārkārtīgi zema, mikroorganismi tos drīzāk metabolizē nejauši, un nevar pieņemt, ka tie mērķtiecīgi vai optimizēti likvidē FAV. Šobrīd ir zināms, ka attīrīšanas efektivitāte zināmā mērā ir atkarīga no dūņu vecuma. Jaunās dūņās atdalīšana galvenokārt notiek adsorbcijas rezultātā. Vecākajās dūņās, kas vienlaikus ir nepieciešamas slāpekļa koncentrācijas samazināšanai, ir sasniegts ievērojami augstāks bioloģiskās attīrīšanas līmenis. Tajā pašā laikā FAV koncentrācija aktīvajās dūņās, visticamāk, palielināsies.

Labi bioloģiskās noārdīšanās rezultāti aktīvajās dūņās ir novēroti šādām FAV¹²:

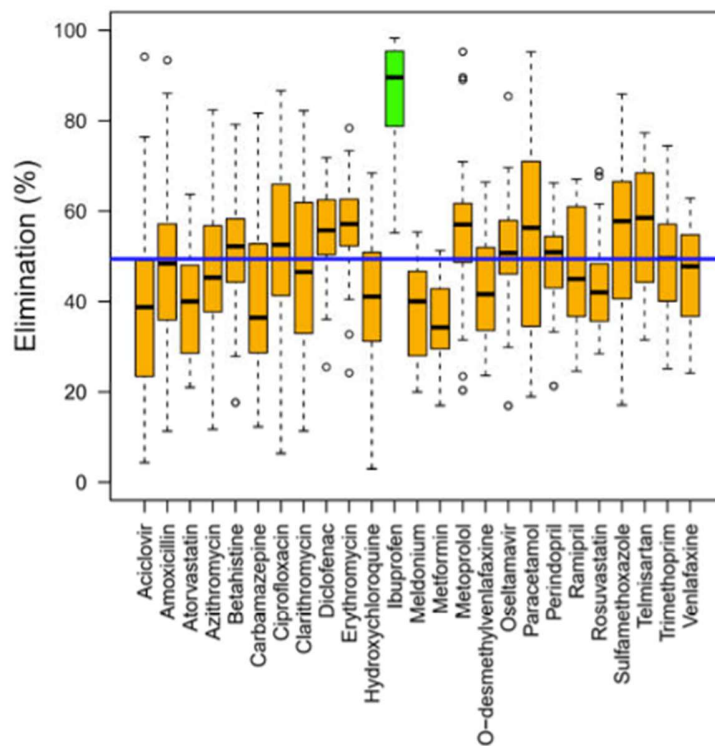
- ibuprofēns, ja dūņu vecums ir > 2 dienas;
- bezafibrāts (dūņu vecums > 2 dienas);
- etinilestradiols (dūņu vecums > 10 dienas);
- jopromīds (rentgena kontrastviela, dūņu vecums > 10 dienu).

Tomēr tādu savienojumu kā karbamazepīns un diazepāms koncentrāciju samazinājums nenotiek pat tad, ja dūņu vecums ir augsts, bet daži apstrādes efektivitātes rādītāji tiek sasniegti tikai ar adsorbciju.

Pēcattīrīšanas filtru, piemēram, disku filtru vai smilšu filtru, izmantošana īpaši neietekmē FAV atdalīšanu. Saskaņā ar dažādiem pētījumiem ir konstatēts, ka attīrīšanas efektivitāte ir aptuveni 5–15 %, bet tas lielā mērā ir saistīts arī ar TSS samazinājumu un adsorbciju uz filtrējošajiem materiāliem.⁷

MEDWwater projekta ietvaros analizētajās NAI tika konstatēta šāda vispārējā attīrīšanas efektivitāte, kā parādīta 4. attēlā.

¹² Spurenstoffe im Abwasser, eine Handlungsempfehlung für Kommunen, Kompetenzzentrum Spurenstoffe, Oktober 2020.



4. attēls. Kopējā FAV attīrīšanas efektivitāte, nenošķirot paraugu ņemšanas reizes (vasara/ziema) un valsti (Lietuva/Latvija). Kopā 32 datu punkti katram FAV ($C < QL = QL$). Zilā līnija ir vidējā mediānas vērtība.

No 4. attēla redzams, ka visu FAV vidējā attīrīšanas efektivitāte svārstās no 40% līdz 60%, bet vidējais attīrīšanas līmenis ir gandrīz 50%. Šī projekta ietvaros tika novērtēta arī FAV koncentrācija notekūdeņu aktīvajās dūņās, kā rezultāti liecina, ka notekūdeņu dūņās faktiski nonāk ievērojamas FAV slodzes. Ja dūņas izmanto, piemēram, lauksaimniecībā vai kā mēslojumu dārzkopībai, FAV var atkal nonākt vidē. Tāpēc, analizējot ar FAV saistītos procesus un izvēloties apstrādes tehnoloģijas, ir jāņem vērā viss potenciālais dzīves cikls. Plašāku informāciju par Latvijā un Lietuvā notekūdeņu attīrīšanas iekārtās konstatētajām FAV koncentrācijām var iegūt no MEDWwater ziņojumiem „Konsultācijas par izvēlētajām notekūdeņu attīrīšanas iekārtām ar ieteikumiem farmaceitisko vielu attīrīšanas uzlabošanai” un „Datu interpretācija par patēriņu, notekūdeņu attīrīšanas iekārtu slodzēm, nonākšanu ūdenstilpēs un ietekmi uz ūdens vidi”.

1. tabulā ir norādīta vidējā FAV attīrīšanas efektivitāte notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, kas analizētas MEDWwater projekta ietvaros. Treknrakstā ir izceltas FAV, kas notekūdeņos no NAI jāsamazina vismaz par 80%, kā ieteiktas jaunajā ES Direktīvas par komunālo notekūdeņu attīrīšanu ierosinājumā.

1. tabula. Vidējā FAV attīrīšanas efektivitāte notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, kas analizētas MEDWwater projekta ietvaros.

FAV	Vidējā FAV attīrīšanas efektivitāte komunālajās NAI %
Aciklovīrs	40
Amoksicilīns	46
Atorvastatīns	38
Azitromicīns	45
Betahistīns	49
Karbamazepīns	41
Ciprofloksacīns	54
Klaritromicīns	48
Diklofenaks	53
Eritromicīns	56
Hidroksihlorhinīns	43
Ibuprofēns	86
Meldonijs	37
Metformīns	32
Metoprolols	55
O-desmetil-venlafaksīns	44
Oseltamavīrs	48
Paracetamols	50
Perindopriils	47
Ramipriils	44
Rosuvastatīns	45
Sulfametoksazols	54
Telmisartāns	52
Trimetopriims	49
Venlafaksīns	44

4. FAV attīrīšanas tehnoloģijas plānošana

NAI operatoram, kas plāno sākt attīrīšanu no mikropiesārņotājiem, tostarp FAV, vispirms būtu jāsāk analizēt iespējamie veidi, kā samazināt piesārņojuma slodzi no apkalojamās aglomerācijas. Tas var nozīmēt, piemēram, veikt masas bilances analīzi, kartējot galvenos piesārņojuma avotus, piemēram, slimnīcas un pansionātus. Tā kā notekūdeņu plūsmas ātrums NAI ir simtiem, ja ne tūkstošiem reižu lielāks nekā, piemēram, slimnīcās, ieguldījumi, kas nepieciešami, lai samazinātu FAV slodzes notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, ir lielāki. Svarīga

priekšrocība, samazinot piesārņojošo vielu koncentrāciju pirms NAI, ir notekūdeņu dūņu pasargāšana no FAV slodzes, jo šobrīd visi NAI izmantotie tehnoloģiskie risinājumi FAV ir paredzēti tieši notekūdeņu attīrīšanai (t.i., pārnesot piesārņojumu no ūdens uz dūņām).

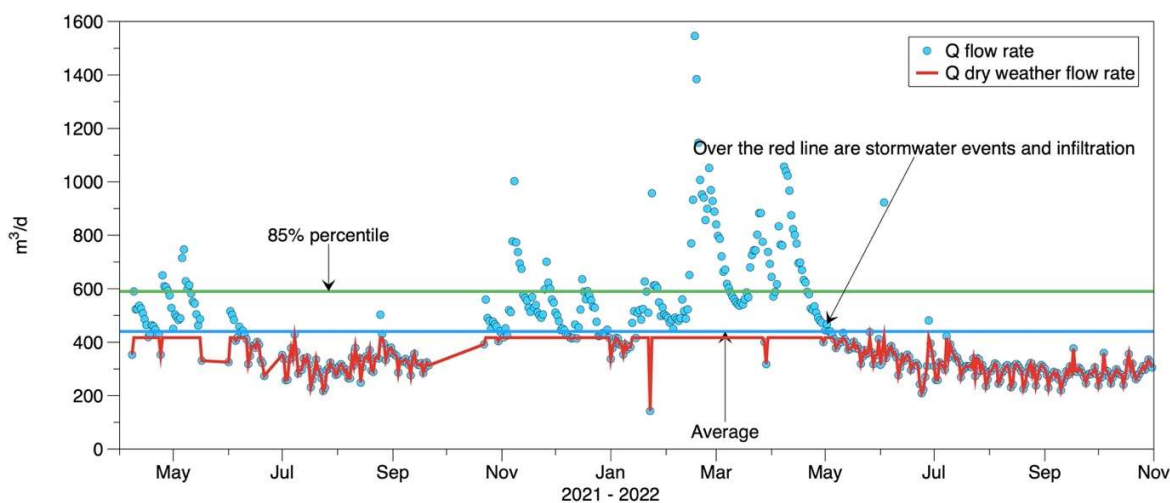
Papildus piesārņojuma avotu monitoringam ir jāmonitorē arī notekūdeņu ieplūde un izplūde no NAI. Tas ir nepieciešams, lai novērtētu pašreizējo situāciju un attiecīgi nepieciešamo mikropiesārņotāju attīrīšanas efektivitāti. Parasti jo vairāk ir datu par avotu, jo precīzāk iespējams izstrādāt pēcapstrādes tehnoloģiju. Ja iepriekš nav veikti mikropiesārņotāju mērījumi, jāpieņem šādi principi:

- vismaz 2 paraugu ņemšanas kampaņas NAI ar $CE < 50\,000$ ¹³;
- vismaz trīs paraugu ņemšanas kampaņas NAI ar $CE > 50\,000$.

Paraugu ņemšanas kampaņa jāplāno tā, lai iespēju robežās izvairītos no sadzīves notekūdeņu atšķaidīšanās ar lietusūdeņiem un infiltrāciju. Lai noteiktu pēcapstrādes risinājumus, ļoti svarīgi ir noteikt visaugstāko mikropiesārņotāju koncentrāciju.

Plānošanas procesā ir svarīgi noteikt arī plānotās pēcattīrīšanas hidraulisko jaudu. Mikropiesārņotāju attīrīšanas tehnoloģija ir piemērojama tikai tad, ja tā uzstādīta sausā laika plūsmā, nevis NAI maksimālajai plūsmā. Ir pieejamas dažādas metodes, kā to aprēķināt, bet viens no iespējamiem veidiem ir ņemt pēdējo 3 gadu plūsmas un nokrišņu datus un analizēt tos, ņemot vērā tikai to dienu plūsmas, kurās nokrišņu daudzums ir mazāks par 1 mm. Vēl viena laba analītiskā metodika ir sniegta ATV-DVWK-A 198E (*Notekūdeņu iekārtu izmēru vērtību standartizācija un atvasināšana*).

¹³ Vienas paraugu ņemšanas kampaņas laiks ir vismaz viena nedēļa, t. i., kopā apvienotie paraugi tiek ņemti 7 * 24 st.



5. attēls. NAI plūsmas analīze, kas sagatavota, lai aprēķinātu hidraulisko slodzi, uz kuras pamata nosaka pēcattīrīšanas iekārtu projektējamo jaudu.

Termini attēlā:

Q flow rate - notekūdeņu plūsma

Q dry weather flow rate - notekūdeņu plūsma sausos laikapstākļos

Stormwater events and infiltration - lietusgāzes un infiltrācija

Pēc monitoringa perioda pabeigšanas ir laiks formulēt pēcapstrādei, atbildot uz šādiem jautājumiem:

- Kādas FAV ir jāattīra?
- Kāda ir paredzamā attīrīšanas efektivitāte?
- Kādi ir hidrauliskie apstākļi, kādos pēc attīrīšanas paredzēts sasniegt šo attīrīšanas efektivitāti (pie maksimālās, vidējās, sausā laika plūsmas utt.)?
- Vai attīrīšanas efektivitātei vienmēr ir jāatbilst paredzētajiem efektivitātes mērķiem, vai arī tehnoloģijas veikspēja tiek vērtēta, pamatojoties uz gada vidējiem rezultātiem?

Kad ir atbildēts uz iepriekšminētajiem galvenajiem jautājumiem, nākamais solis ir analizēt dažādas pašlaik pieejamās mikropiesārņotāju attīrīšanas tehnoloģijas. Šajā brīdī ir svarīgi atrast potenciālo sinerģiju ar citu piesārņojošo vielu attīrīšanu. Piemēram, ozonēšana galvenokārt samazina organisko vielu, savukārt adsorbēcija samazina gan smago metālu, gan FAV u.c. vielu koncentrācijas. Arī smilšu filtri kopā ar aktīvās ogles filtriem palīdz samazināt TSS un fosfora slodzi, kā arī FAV un smago metālu koncentrāciju. Ja ir paredzēts izmantot notekūdeņu dūņas, ir svarīgi izpētīt, vai ir pieejami tehnoloģiski risinājumi, kas samazinātu FAV uzkrāšanos tajās.

Piemēram, PAO (pulverveida aktīvās ogles) dozēšana bioreaktorā lielu daļu bīstamo vielu pārvieto uz aktīvajām dūņām, tāpēc šīs dūņas bieži vien ir jāsadedzina. No otras puses, ja notekūdeņu attīrīšanas iekārtās dūņas tik un tā sadedzina citu iemeslu dēļ, tad PAO būs labs un lēts veids, kā samazināt mikropiesārņotāju radīto slodzi. Šobrīd Latvijā notekūdeņu dūņu sadedzināšana nenotiek.

Tehnoloģiskie risinājumi, kas šodien tiek uzskatīti par tādiem, kuriem ir vislielākais potenciāls mikropiesārņotāju attīrīšanā, nav nekas jauns, bet tie galvenokārt tiek izmantoti dzeramā ūdens sagatavošanā. Visbiežāk izmantotie apstrādes procesi ir šādi:

- adsorbcija, izmantojot aktivēto ogli — GAO (granulveida aktivēto ogli) vai PAO (pulverveida aktivēto ogli);
- padziļināta oksidēšana, piemēram, ar ozonu vai ūdeņraža peroksīdu;
- membrānu filtrēšana (nanofiltrēšana un reversās osmozes filtrēšana).

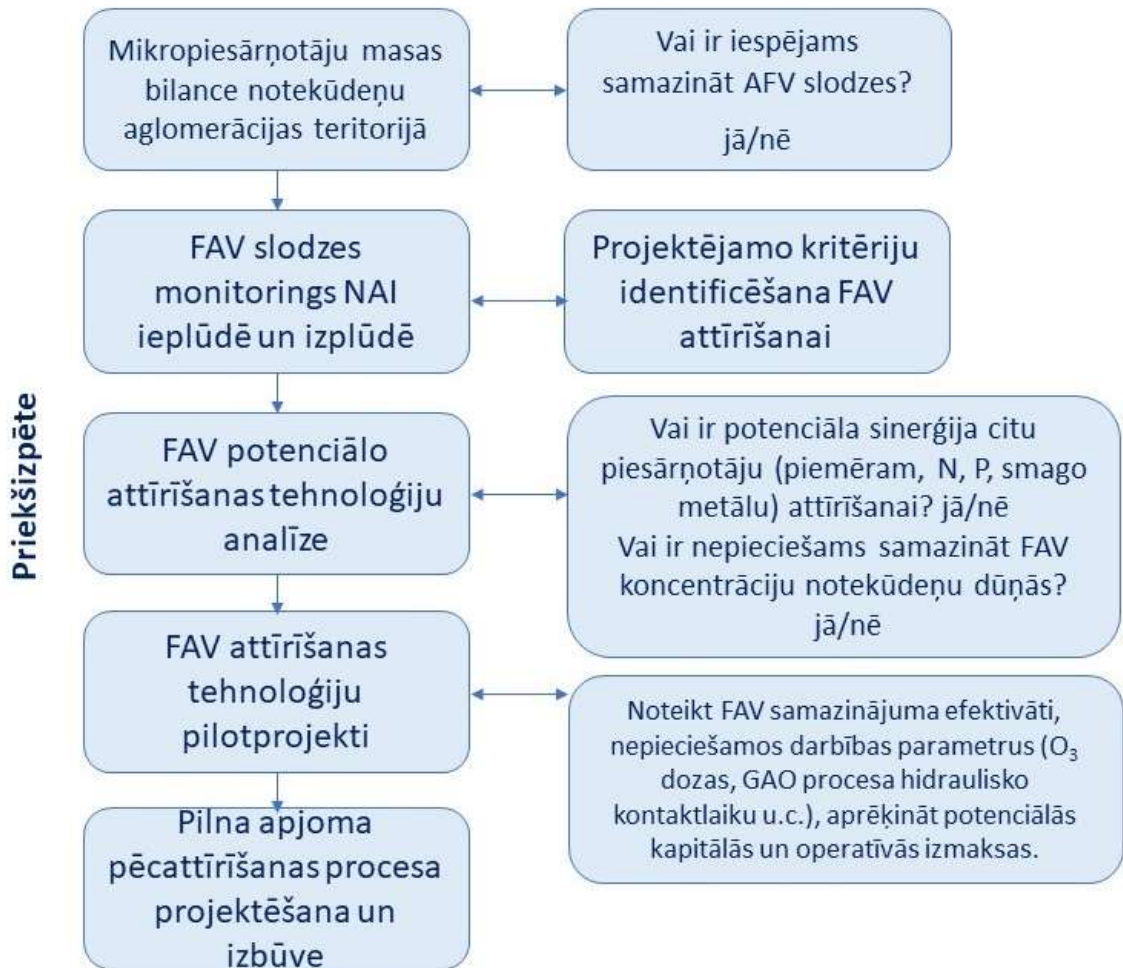
Tiek izmantotas arī šo tehnoloģiju kombinācijas. Katram no šiem risinājumiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Diemžēl mums joprojām trūkst labākās pieejamās tehnoloģijas mikropiesārņotāju attīrīšanai. Tomēr pētījumi un praktiskā pieredze ir pietiekama, lai atrastu pēcspādes tehnoloģiju, kas vairumā gadījumu ir piemērota mikropiesārņotāju attīrīšanai.

Kad ir izvēlēts atbilstošs tehnoloģiskais risinājums, tas vienmēr ir izmēģināms, jo katra attīrīšanas iekārta ir atšķirīga, tāpēc nevar pilnībā paļauties uz iepriekš citur veiktiem pētījumiem. Pilottestus var organizēt laboratorijas apstākļos, tomēr ir ieteicams veikt ilgtermiņa testus daļēji rūpnieciskā izmēģinājuma iekārtā, lai pārbaudītu izvēlētas tehnoloģijas piemērotību vismaz 3 mēnešus pirms galīgās pēcattīrīšanas projekta izstrādes. Tas dod pietiekami daudz laika, lai pārbaudītu dažādus darbības parametrus un izvēlētos labākos režīmus konkrētajā vietā. Izmēģinājuma testu veikšana var šķist lieli izdevumi, taču patiesībā tā palīdz samazināt potenciāli nepareizus investīciju lēmumus vai nepareizi izvēlētu attīrīšanas procesu, kas galu galā izrādītos daudz dārgāks.

- veicot eksperimentālos testus, ieteicams vismaz 2 reizes nedēļā ņemt 24 stundu saliktos paraugus. Jāatceras, ka jebkuras izmaiņas, kas veiktas darba režīmos vai apstrādes efektivitātē var būt redzamas tikai pēc vairākām dienām vai, atkarībā no procesa, pat pēc vairākām nedēļām.

Pēc izmēģinājuma var sagatavot faktiskā pēcattīrīšanas procesa projektu, izmantojot vērtīgos izmēģinājuma testos iegūtos datus. Plānojot notekūdeņu attīrīšanas procesu, vienmēr jāņem vērā iespējamais hidrauliskās slodzes samazinājums vai palielinājums, tāpēc procesi jāprojektē kā modulāra sistēma. Tas nozīmē, ka, vēloties sākt, piemēram, ar pēcattīrīšanu, kas spētu attīrīt 50 000 m³/d notekūdeņu, ir jāizveido vismaz 2 atsevišķas attīrīšanas līnijas. Tādējādi,

ja nepieciešams, iespējams uz laiku slēgt vienu no līnijām, lai veiktu apkopi, vai arī, samazinoties slodzei, to slēgt pilnībā. Tajā pašā laikā plānā iespējams paredzēt vietu arī iespējamai paplašināšanai, t. i., trešajai apstrādes līnijai, ja hidrauliskā slodze palielināsies.



6. attēls. Pēcattīrīšanas tehnoloģijas izvēles process, kurā uzsvars likts uz FAV koncentrāciju samazināšanu, vienlaikus analizējot arī iespējamo sinerģiju ar citu piesārņotāju attīrīšanu, izmantojot tos pašus vai kombinētus risinājumus.

4.1. Pēcattīrīšanas tehnoloģijas izvēle

Vairumā gadījumu gan ozonēšana, gan aktīvās ogles adsorbcija var veiksmīgi attīrīt no > 80% mikropiesārņotāju. Tomēr precīza attīrīšanas efektivitāte ir jānosaka ar izmēģinājuma testiem. Piemēram, ir konstatēts, ka ozonēšana samazina mikropiesārņotāju koncentrāciju vidēji par 50–65%, bet zināmā mērā to likvidē arī ar parasto bioloģisko attīrīšanu, tāpēc sagaidāms, ka vidējā attīrīšanas efektivitāte kopā būs 80–90%, ja ozona devas ir no 0,4 līdz 0,7 mgO₃/mgDOC. Ozona deva ir atkarīga ne tikai no DOC koncentrācijas, bet arī, piemēram, no NO₂-N koncentrācijas, kas oksidēts līdz NO₃-N. Tāpat kā ozona gadījumā, papildus filtrēšanas parametriem DOC jāizmanto arī aktīvās ogles procesa jaudas noteikšanai, jo līdz šim ir savākts diezgan daudz datu par mikropiesārņotāju attīrīšanas efektivitāti atkarībā no DOC.

Dažādu FAV attīrīšanas rādītāji, izmantojot ozonu un aktivēto ogli, ir salīdzināti 2. tabulā. Šajā gadījumā nav ņemta vērā notekūdeņu dūņu apstrādes (izmantošanas) jauda.^{14,15,16} Kā parādīts tabulā, lielākā daļa FAV abos procesos uzvedas līdzīgi, bet vairumā gadījumu ir iespējams sasniegt > 70% attīrīšanas efektivitāti. Ja vielas ir grūti attīrāmas, var būt nepieciešama dažādu procesu kombinācija, piemēram, iepriekšēja ozonēšana, kam seko aktīvās ogles adsorbcija. Precīzu vajadzību nosaka ar izmēģinājuma testiem.

2. tabula. Attīrīšanas efektivitāte no dažādiem FAV, izmantojot ozonu un aktīvo ogli.^{10,11,12}

FAV	Ozona	Aktīvā ogle
Karbamazepīns	ļoti labi — labi (> 70%)	
Amoksicilīns		
Klaritromicīns		
Diklofenaks		
Ibuprofēns		
Hidroksihlorhinīns		
Metoprolols		
Venlafaksīns		
Tramadols	slikti—vidēji 30—70%	labi—ļoti labi > 70%
Azitromicīns		
Benzotriazols	labi—ļoti labi > 70%	slikti—vidēji 30—70%

¹⁴ Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen, DWA T3/2015, April 2015.

¹⁵ Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung, Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte, DWA T1/2019, Mai 2019.

¹⁶ Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrens- technische Aspekte und offene Fragen, DWA T2/2022, November 2022.

Irbesartāns		
Kandesartāns		
Olmesartāns	slikti—vidēji 30—70%	
Sulfametoksazols		
Valsartāns		
Valsartāna skābe		

Turklāt 3. tabulā ir atsevišķi parādītas dažādu FAV sorbcijas īpašības.^{10,12} Labi attīrīšanas rādītāji, izmantojot aktivēto ogli, ir garantēti visiem FAV, izņemot gabapentīnu un metformīnu. Izmantojot aktivētās ogles procesu, viegli tiek atdalīti arī visi ES Direktīvā par komunālo notekūdeņu attīrīšanu ieteiktie mikropiesārņotāji.

3. tabula. FAV sorbcijas īpašības, izmantojot aktīvo ogli.

Ļoti labi/labi	Labi—slikti	Vāji vai nemaz
Azitromicīns	Kandesartāns	Gabapentīns
Karbamazepīns	4-Formilaminoantipirīns	Metformīns
Ciprofloksacīns	Diciāndiamīds	
Klaritromicīns	Ibuprofēns	
Diklofenaks	Sulfametoksazols	
Ibuprofēns	Valsartāns	
Eritromicīns		
Hidroksihlorhinīns		
Metoprolols		
Venlafaksīns		

Izmantojot ozonēšanu, jāņem vērā iespējamā oksidācijas blakusproduktu veidošanās vairāku FAV gadījumā. Atsevišķos gadījumos šo pārveidošanās produktu ekotoksikoloģiskā ietekme var būt daudz lielāka nekā sākotnējā FAV. Daži FAV piemēri, kas ozonēšanas laikā var veidot blakusproduktus, ir šādi:

- aciklovīrs;
- acesulfāms;
- amoksicilīns;
- karbamazepīns;
- ciprofloksacīns;

- diklofenaks;
- metoprolols;
- sulfametoksazols;
- tramadols
- penicilīni;
- cefaleksīns;
- venlafaksīns.

Lielākā daļa blakusproduktu ir viegli attīrāmi, ja ir pietiekams ekspozīcijas laiks un ozona deva. Vairākos pētījumos ir pierādīts, ka ozons uzlabo bioloģisko attīrīšanu no FAV. Tomēr izņēmumi ir tramadols, venlafaksīns, metoprolols un ciprofloksacīns, no kuru oksidācijas blakusproduktiem ir grūtāk attīrīt nekā no sākotnējiem FAV.^{17,18}

5. Aktīvās ogles process

Adsorbcija ir process, kurā viela, no kuras notiek attīrīšana, tiek atdalīta no ūdens fāzes un koncentrējas uz adsorbenta virsmas fizikālo spēku dēļ. Adsorbcija ar aktīvo ogli ir kļuvusi par vienu no svarīgākajām metodēm, ko izmanto, lai notekūdeņus vai dzeramo ūdeni attīrītu no mikropiesārņotājiem, piemēram, smagos metālus un FAV. To plaši izmanto arī tādu ĶSP attīrīšanai, kas nav viegli bioloģiski noārdāmas. Iepriekšējā pieredze liecina, ka adsorbcijas procesu raksturo zemas ekspluatācijas izmaksas un augsta attīrīšanas efektivitāte, padarot to par vienu no labākajiem iespējamajiem nākotnes risinājumiem, ko NAI var izmantot arī attīrīšanai no mikropiesārņotājiem. Tomēr adsorbciju ir grūti izmantot, jo tā ir jutīga pret temperatūru un pH, jo tas ir līdzsvara process, kurā saistītie mikropiesārņotāji var atkal izdalīties, mainoties līdzsvara punktam. Jāņem vērā arī tas, ka notekūdeņos mikropiesārņotāji ir ļoti zemā koncentrācijā, bet citas organiskās vielas, piemēram, ĶSP, ir augstā koncentrācijā. Adsorbcijas procesā šīs divas vielas savstarpēji konkurē. Adsorbcijas efektivitāti var uzlabot, izvēloties atbilstošāko adsorbentu, ekspozīcijas laiku utt.

¹⁷ Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrens- technische Aspekte und offene Fragen, DWA T2/2022, November 2022.

¹⁸ Stapf, M., Miehe, U., Knoche, F., Lukas, M., Bartz, J., Brauer, F., Gutsche, M., Kullwatz, J., Petkow, C., Schneider, M., Winckelmann, D., Bogusz, A., Tomczyk, B., Trzcińska, M., Dworak, A., Chojniak-Gronek, J., Szumska, M., Zieliński, M., Walkowiak, R., Putna-Nimane, I., Liepina-Leimane, I., Dzintare, L., Barda, I., Bester, K., Kharel, S., Sehlén, R., Nilsson J., Larsen, S. B. (2020). Impact of ozonation and post-treatment on ecotoxicological endpoints, water quality, API and transformation products. CWPharma project report for GoA3.3: Comparison of post-treatment options.

Aktīvā ogle ir ogle, kas apstrādāta tā, lai materiāls būtu pēc iespējas poraināks. To panāk, materiālu karsējot bezskābekļa vidē līdz 1000 °C temperatūrai, kamēr porās esošās organiskās vielas tiek sadedzinātas un poras pēc tam attīrītas ar ūdens tvaiku. Aktīvo ogli parasti ražo no biomasas, piemēram, koksnes, kokosriekstu čaumalas, brūnoglēm vai akmeņoglēm, taču zinātnieki turpina meklēt jaunus materiālus, lai iegūtu labu absorbentu ar zemām izmaksām un augstu efektivitāti. Aktīvās ogles labās adsorbcijas īpašības galvenokārt ir saistītas ar tās lielo īpatnējo virsmas laukumu, kas var būt pat no 500 līdz 1 500 m²/g. Lai gan aktīvās ogles adsorbcija ir fizikāls process un tajā nav ķīmisku saišu, radītā sasaiste ir ļoti spēcīga. Izmanto galvenokārt divu veidu aktivēto ogli: pulverveida aktivēto ogli (PAO) un granulveida aktivēto ogli (GAO). PAO parasti ražo, sasmalcinot GAO, bet tās īpatnējā virsma ir lielāka nekā GAO. Tā kā 1 kg aktīvās ogles ražošanai nepieciešami 2–5 kg izejmateriāla, priekšroka jādod aktīvai oglei, kas ražota no atjaunojamiem materiāliem, piemēram, koksnes, kokosriekstu čaumalām utt.

PAO ir pulverveida aktīvā ogle, ko dažkārt izmanto arī attīrīšanai no dažādām bīstamām vielām. PAO daļiņu izmērs parasti ir no 0,005 līdz 0,1 mm, tāpēc tam ir lielāka īpatnējā virsma nekā GAO, t. i., PAO efektīvāk adsorbē lielāko daļu vielu nekā GAO, kas ir lielākās daļiņās. GAO daļiņu izmērs parasti ir no 0,5 mm līdz 2,5 mm.

4. tabula. Dažādu veidu aktīvās ogles priekšrocības un trūkumi.

	Granulētā aktīvā ogle GAO	Pulverveida aktīvā ogle PAO
Priekšrocības	<ul style="list-style-type: none"> - viegli lietojama; - neprasa lielu uzturēšanu; - nav iespējama aktivētās ogles daļiņu izdalīšanās notekūdeņos; - papildu TSS, t. sk. fosfora daļiņu, attīrīšana; - GAO ir iespējams reģenerēt; - var darboties efektīvi, t. i., pilnībā izmantojot GAO adsorbcijas spēju. 	<ul style="list-style-type: none"> - PAO izmaksas ir salīdzinoši zemas; - viegla dozēšana un kontrole; - nav nepieciešamas papildu PAO atdalīšanas ierīces, dozējot tieši aktivēto dūņu procesā; - ātra adsorbcija, jo PAO daļiņas ir maza izmēra; - bīstamās vielas regulāri tiek saistītas notekūdeņu dūņās, samazinot to emisiju izvadīšanas iespējamību.
Trūkumi	<ul style="list-style-type: none"> - augstas ieguldījumu izmaksas; - lēnāka adsorbcija GAO daļiņu izmēra dēļ; - dažos gadījumos adsorbētās piesārņojošās vielas var atkal atbrīvoties. 	<ul style="list-style-type: none"> - PAO nevar reģenerēt; - adsorbcijas spējas bieži netiek pilnībā izmantotas, jo PAO tiek aizvadīta kopā ar aktīvajām dūņām; - aktīvās ogles daļiņas, kas tiek izvadītas no procesa, nonāk notekūdeņos;

		<ul style="list-style-type: none"> - ja aktīvajās dūņās iestrādā PAO, parasti ir jāizvairās no aktīvo dūņu izmantošanas lauksaimniecībā; - ja PAO tiek dozēts pēc otrējiem nostādinātājiem, ir nepieciešami lieli ieguldījumi, lai nodrošinātu PAO atdalīšanu; - palielina saražoto notekūdeņu dūņu apjomu par 4–10%.
--	--	--

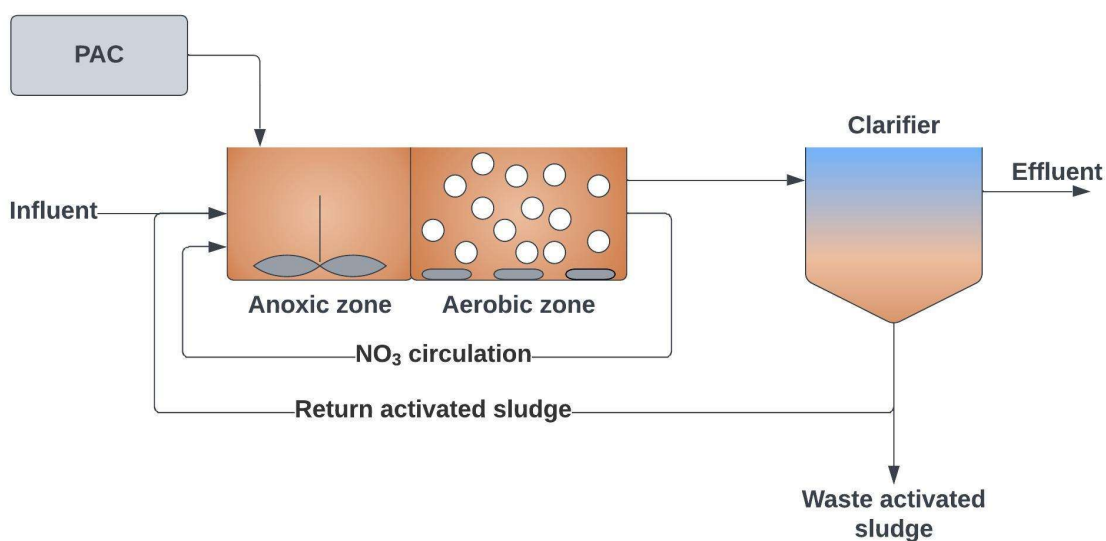
5.1. PAO apstrādes plānošana

PAO tiek plaši izmantots tā vienkāršības dēļ. Ja notekūdeņu dūņas tiek tālāk sadedzinātas, ir jārisina tikai jautājums par to, kā uzglabāt un dozēt PAO, bet dozēšana tiek veikta tieši esošajā aktīvo dūņu procesā. Tomēr, ja PAO izmanto kā pēcapstrādes līdzekli, rodas vairākas problēmas, kas jārisina, jo PAO daļiņas ir ļoti mazas, tāpēc tās ir grūti izdalīt no notekūdeņiem. Šim nolūkam pirms nostādināšanas/filtrēšanas jāpievieno koagulants, lai mazās PAO daļiņas koagulētu daļiņās, kuras var nostādināt un izfiltrēt. Bez koagulanta dažas daļiņas varētu izkļūt cauri mikrofiltriem un smilšu filtriem.

Lai gan šajās vadlīnijās ir sniegti vairāki parametri, kas ir PAO attīrīšanas sistēmas jaudas noteikšanas pamatā, jāveic arī izmēģinājuma testi, jo aktivētās ogles uzvedība ir atkarīga no konkrētajiem notekūdeņiem. Izmēģinājuma testi jāveic vismaz 3 mēnešus, lai noteiktu optimālo devu, kas kalpos par pamatu dozēšanas aprīkojuma un PAO uzglabāšanas vietas plānošanai.

PAO dozēšana esošajā aktīvo dūņu procesā, kā parādīts 7. attēlā, ir vienkāršs un lēts risinājums, taču tas ir mazāk efektīvs mikropiesārņotāju attīrīšanā nekā dozēšana pēc dūņu apstrādes. Tas ir tāpēc, ka adsorbcijas jauda tiek tērēta, lai noņemtu organiskās vielas, kas nāk ar augstāku koncentrāciju. Tomēr priekšrocība ir aktivētās ogles ekspozīcijas laiks procesā, kas ir vienāds ar dūņu vecumu, kas ļauj adsorbcijas spēju izmantot pilnībā. PAO dozēšanas rezultātā aktīvo dūņu apjoms palielinās par 4–10%. Tāpēc biomasas koncentrācija aktīvo dūņu procesā palielināsies. Tātad, turpinot darboties ar tādu pašu aktīvo dūņu koncentrāciju, faktiskais dūņu vecums būs mazāks. Tomēr līdz šim nav konstatēts, ka mazāka dūņu vecuma dēļ PAO dozēšanai būtu negatīva ietekme uz bioloģiskās attīrīšanas efektivitāti. Turklāt iepriekšējos pētījumos ir konstatēts, ka, izmantojot PAO, palielinās sadedzināto atkritumu aktivēto dūņu siltumspēja. Līdzīgs tehnoloģiskais izkārtojums ir attēlots 8. attēlā, taču šeit tiek izmantota gala filtrācija, lai atdalītu visas TSS saturošās PAO, t. i., bīstamos savienojumus.

Diemžēl nepastāv konkrēti principi, kā noteikt nepieciešamo dozu, ja PAO jāievada tieši bioreaktorā, taču līdzšinējā pieredze liecina, ka mikropiesārņotāju atdalīšanai nepieciešamās devas ir no 10 līdz 30 mg/l.



7. attēls. PAO dozēšana tieši esošajā aktivēto dūņu procesā. Mikropiesārņotājus attīra ar notekūdeņu aktīvajām dūņām.

Termini attēlā:

Aerobic zone - aerobā zona

Anoxic zone - anoksā zona

Clarifier - dzidrinātājs

Effluent - efluents, izplūde

Filtration - filtrs

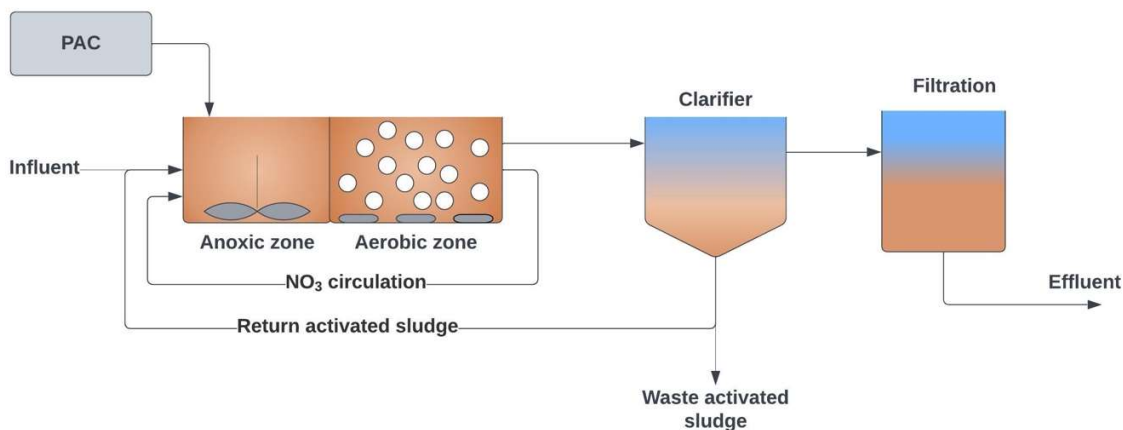
Influent - influents, ieplūde

NO₃ circulation - NO₃ cirkulācija

PAC - PAO (pulverveida aktivētā ogle)

Return activated sludge - atgrieztās aktīvās dūņas

Waste activated sludge - atstrādātās aktīvās dūņas



8. attēls. PAO dozēšana tieši esošajā aktivēto dūņu procesā. Beigu filtri noņem TSS atlikumus, kas satur arī nelielu PAO koncentrāciju, kuras ir adsorbējušas mikropiesārņotājus.

Termini attēlā:

Aerobic zone - aerobā zona

Anoxic zone - anoksā zona

Clarifier - dzidrinātājs

Effluent - efluents, izplūde

Filtration - filtrs

Influent - influents, ieplūde

NO₃ circulation - NO₃ cirkulācija

PAC - PAO (pulverveida aktivētā ogle)

Return activated sludge - atgrieztās aktivās dūņas

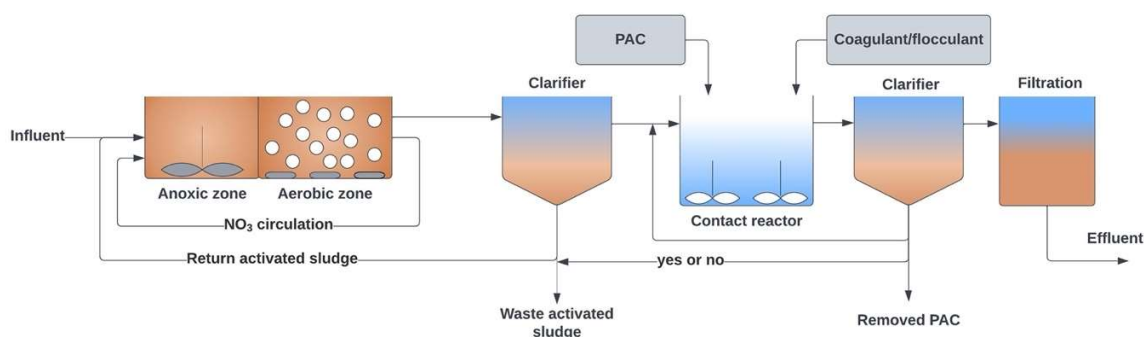
Waste activated sludge - atstrādātās aktivās dūņas

Visefektīvākā metode ir PAO dozēšana pēc esošā apstrādes procesa. Tas nodrošina, ka lielākā daļa bioloģiski noārdāmo organisko vielu jau ir noārdīta un to vielu skaits, kas konkurē ar mikropiesārņotājiem, ir minimāls. Tipiska procesa shēma ir attēlota 9. attēlā. Kontaktreaktorā tiek nodrošināts pietiekams PAO kontakta laiks, bet reaktora beigās tiek dozēts koagulants, kas ļauj no dzidrinātājiem izvadīt lielāko daļu PAO. Ja aktivās dūņas vēlāk tiek sadedzinātas, PAO var atgriezt atpakaļ attīrīšanas procesā (gan no dzidrinātājiem, gan no filtriem), kur tās vēlāk tiek izņemtas kopā ar aktivajām dūņām. Ja aktivās dūņas vēlāk tiek izmantotas, izņemtās aktivās dūņas ir jāapstrādā atsevišķi, lai samazinātu mikropiesārņotāju koncentrāciju tajās. Galīgā filtrēšana ir nepieciešama, lai atdalītu visus TSS, kas satur PAO kopā ar mikropiesārņotājiem.

Devu noteikšanai jāpiemēro šādi principi (attiecas uz 9. attēlu):

- lai panāktu > 80% mikropiesārņotāju atdalīšanu, PAO devai jābūt 10–25 mg/l jeb atkarībā no DOC koncentrācijas 1–2 mgPAC/mgDOC;

- nodrošināt minimāli 30–60 min ekspozīcijas laiku kontaktreaktorā, kā arī cirkulāciju starp dzidrinātājiem un kontaktreaktoru, jo, lai pilnībā izmantotu PAO adsorbcijas jaudu, ir nepieciešamas vairāk nekā 24 stundas;
- parametri otrējiem nostādinātājiem pēc kontaktreaktora: virsmas noslodze < 2 m/h, ekspozīcijas laiks min. 2 st.;
- pievienojot koagulantu, lai atdalītu PAO, koagulanta patēriņš ir aptuveni 0,2–0,5 mg/l attiecībā uz Al un 0,5–1 mg/l attiecībā uz Fe;
- ar smilšu filtru maksimālajam filtrēšanas ātrumam jābūt 10–12 m/h, kā arī filtrā jābūt vismaz vienam antracīta (1,2–2,5 mm) un vienam smilšu (0,65–1,3 mm) slānim.



9. attēls. PAO dozēšana pēcattīrīšanas laikā. PAO tiek dozēts kontaktreaktorā un vēlāk sasaistīts ar koagulantu.

Jaunie termini attēlā:

Contact reactor - kontaktreaktors

Coagulant/flocculant - koagulants/flokulants

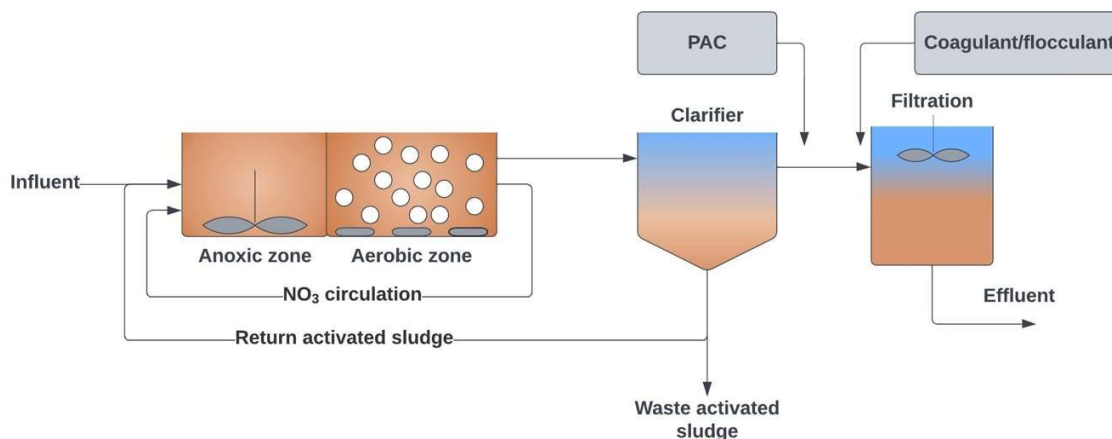
Removed PAC - noņemtais PAO (pulverveida aktivētā ogle)

10. attēlā parādīts PAO dozēšanas risinājuma veids, kurā PAO tiek dozēts pēc esošajiem otrējiem nostādinātājiem, bet procesā nav kontaktreaktora, jo tas ir apvienots ar filtru. Tā rezultātā PAO daļiņas iekļūst dziļi filtrējošā vidē (piemēram, smiltīs), veidojot tā saukto kombinēto aktīvās ogles/smilšu filtra sistēmu. Turklāt koagulants tiek dozēts kopā ar PAO, lai veidotu lielākas PAO daļiņas, pretējā gadījumā daļa PAO var izkļūt cauri filtram. Filtra augšdaļā tiek izveidots kontaktreaktors, kurā reagē koagulants + PAO, bet vienlaikus tiek adsorbēti mikropiesārņotāji.

Pamatojoties uz līdz šim gūto pieredzi, šāda veida risinājumu dozu noteikšanai būtu jāpiemēro šādi principi:

- ekspozīcijas laiks filtra augšpusē (tā sauktajā flokulācijas kamerā) 14–30 min, kopējais ekspozīcijas laiks filtrā 30–50 min;

- maksimālais filtrēšanas ātrums 14 m/st.;
- PAO deva 5–20 mg/l atkarībā no paredzamās attīrīšanas efektivitātes (vismaz 10 mg/l PAO, ja tiek gaidīta > 80% mikropiesārņotāju atdalīšana).



10. attēls. PAO dozēšana pēc otrējiem nostādinātājiem.

5.1.2. PAO uzglabāšana

PAO tiek transportēts uz NAI lielzīmēra iepakojumos vai, ja to daudzums ir lielāks, autocisternās. Lai atvieglotu dozēšanu, to uzglabā tvertnēs, kur jāņem vērā iespējamā sprādzienbīstamība, ko rada PAO putekļi. Jāņem vērā arī PAO izplešanās dažādos apstākļos transportēšanas un uzglabāšanas laikā. Dozēšanai izmanto skrūves transportierus vai sajauc ar ūdeni un sūknē maisījumu uz notekūdeņu attīrīšanas iekārtu.

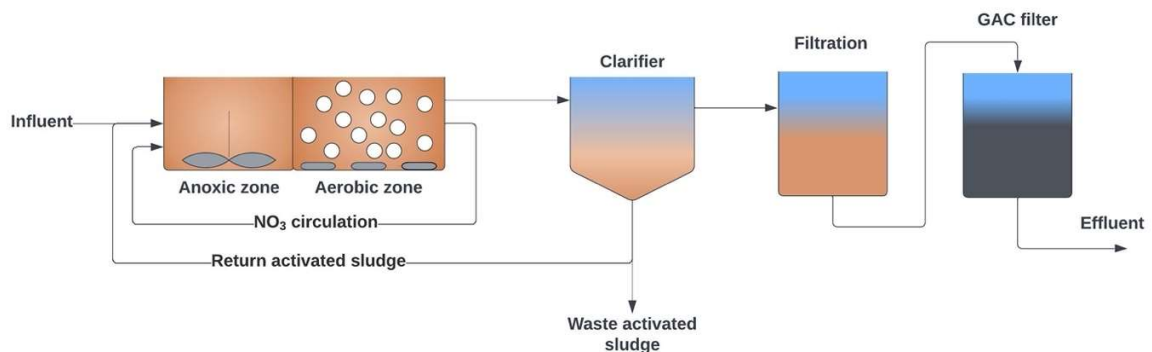
5.1.3. PAO turpmāka apstrāde

Daļiņu lieluma dēļ PAO nav iespējams reģenerēt, tāpēc mikropiesārņotājus saturošs PAO ir jāizņem no notekūdeņu attīrīšanas iekārtām un jāsadzina. Ciktāl mums ir zināms, šobrīd nav novērota mikropiesārņotāju atkārtota izdalīšanās no PAO, piemēram, atstrādātajās notekūdeņu dūņās, kas iesūknētas bioreaktoros stabilizācijai. Ja šādas sadedzināšanas iekārtas nav, ir jāanalizē, vai šīs tehnoloģijas izmantošana ir pamatota. Alternatīva ir izmantot reģionālās sadedzināšanas iekārtas, taču tas radītu augstas transporta izmaksas. Tas nozīmē, ka, salīdzinot dažādas mikropiesārņotāju attīrīšanas tehnoloģijas, ir jāiekļauj visi nepieciešamie procesi, tostarp iespējamās transporta izmaksas, sadedzināšanas iekārtas būvniecība un ekspluatācija utt.

5.2. GAO apstrādes plānošana

GAO filtrus visbiežāk izmanto notekūdeņu attīrīšanai no mikropiesārņotājiem. Tas ir tāpēc, ka atšķirībā no PAO nav nepieciešams risināt jautājumu par adsorbenta savākšanu. Galvenokārt ir pazīstami divu veidu GAO filtri: ātrie spiediena filtri un ātrie gravitācijas filtri. Spiediena filtri jau ilgu laiku tiek izmantoti kā priekšapstrāde dzeramā ūdens attīrīšanā, kā arī rūpniecībā. Tajā pašā laikā joprojām ir salīdzinoši maz piemēru, kad spiediena filtri tiktu izmantoti NAI. NAI priekšroka biežāk ir atklātajiem filtriem, jo tie spēj attīrīt augstākas TSS koncentrācijas. Turklāt adsorbcijas procesā svarīga nozīme ir ekspozīcijas laikam, bet tas gravitācijas filtros ir ilgāks.

11. attēlā ir parādīts vienkāršota tehnoloģiskā shēma GAO filtra integrēšanai, lai atdalītu mikropiesārņotājus. Vairumā gadījumu pirms adsorbcijas ieteicams izveidot papildu filtrāciju, lai notekūdeņos noņemtu/samazinātu TSS. Atsevišķos gadījumos šo procesu var apvienot vienā filtrā, kur TSS tiek atdalītas ar dažādu filtrējošo materiālu slāņiem. Šajā gadījumā īpaša uzmanība jāpievērš filtra dozēšanas noteikšanai, jo, izmantojot dažādus filtrējošos materiālus, ir ļoti grūti nodrošināt pareizu filtra skalošanu ar ūdeni un gaisu, neizskalojot vieglākos filtrējošos materiālus.



11. attēls. GAO filtra izmantošana mikropiesārņotāju noņemšanai. Filtrs pirms GAO nav obligāts un ir atkarīgs no vietējiem apstākļiem (piemēram, cik daudz TSS tiek izvadīts no otrējiem nostādinātājiem).

Jaunie termini attēlā:

GAC filter - GAO (granulu aktīvā ogle) filtrs

Tāpat kā ar PAO filtru, ir svarīgi veikt izmēģinājuma testus vismaz 3 mēnešus, lai izplānotu GAO procesu un ļautu noteikt nepieciešamo ekspozīcijas laiku, skalošanas ciklus un procesa adsorbcijas jaudu. Vislabāk to var izdarīt ar daļēji rūpniecisku izmēģinājuma testa iekārtu, kā parādīts 12. attēlā. Izmēģinājuma testi atklās visas iespējamās problēmas, kuras ir grūti atklāt teorētiskā plānošanas procesa laikā. Lai plānotu GAO filtrus, ir svarīgi analizēt arī notekūdeņu attīrīšanas iekārtu TSS aizvadīto 2–3 gadu laikā. Tas ir tāpēc, ka izmēģinājuma periods var notikt

brīdī, piemēram, kad aktivēto dūņu īpašības un nostādināšana ir laba, tāpēc dūņas netiek izvestas no procesa. Savukārt 12. attēlā parādītā testa laikā bija tikko sākusies rudenim raksturīgā dūņu īpašību sezonālā pasliktināšanās, kā rezultātā filtra darbības laiks saīsinājās gandrīz 3 reizes. Turklāt šajā testa periodā no otrējiem nostādinātājiem tika iznestas aļģes, kas izraisīja arī filtra aizsērēšanu. Līdz ar to ir ļoti svarīgi izpētīt vietējos apstākļus un, ja nepieciešams, izstrādāt risinājumus, lai aizsargātu GAO filtru, izmantojot tādus līdzekļus kā diska vai smilšu filtri.



12. attēls. Testēšanas iekārta, kas izveidota BEST (Better Efficiency for Industrial Sewage Treatment) projekta ietvaros, ko finansē INTERREG Baltijas jūras reģiona programma. Attēlā redzamā konfigurācija sastāv no smilšu filtra, kas apvienots ar GAO.

Turklāt, izmantojot GAO, jāņem vērā, ka tā lielās īpatnējās virsmas laukuma dēļ to pārklāj bioplēve, kas palielina izšķīdušo mikropolutantu biodegradāciju un nešķīstošo daļiņu adsorbciju. Šo procesu sauc par bioloģisko aktīvās ogles filtrāciju (BAO). Atsevišķos gadījumos tiek uzskatīts, ka šī bioloģiskā aktivitāte palīdz uzturēt GAO poras atvērtas, jo mikroorganismi pakāpeniski noārda uz porām uzkrātās organiskās vielas, ja vien atpakaļplūsma tiek veikta ar gaisu un ūdeni, nodrošinot pietiekamu skābekļa daudzumu aerobiem procesiem. Tomēr pārāk intensīvas bioloģiskās augšanas dēļ adsorbcijas spēja var tikt arī pilnībā zaudēta.

GAO procesu bieži kombinē ar ozonēšanu, lai atdalītu organiskās vielas, kas nav viegli noārdāmas. Tas ir svarīgi, jo ozonēšanas rezultātā var veidoties oksidācijas blakusprodukti, kas var radīt vēl lielāku bīstamību nekā sākotnējā viela. Tomēr pirms ozonēšanas sākotnējā viela var netikt uzsūkta adsorbcijas procesā, bet ozonēšanas laikā sadalīties mazākos savienojumos, kurus var izņemt, piemēram, izmantojot GAO filtru. Pirmsozonēšanai un galīgajai filtrēšanai ar GAO, lai atdalītu mikropiesārņotājus, var izmantot salīdzinoši mazu ozona devu — aptuveni 0,2 mgO₃/mgDOC, savukārt, lai veiktu tikai ozonēšanu, salīdzinājumam jāņem vērā devas no 0,3 līdz 0,9 mgO₃/mgDOC.

Lai noteiktu GAO filtru lielumu, vissvarīgākie parametri ir tukšā slāņa kontakta laiks (EBCT, min) un apstrādātā slāņa tilpums (BV, bez vienības). Lai aprēķinātu EBCT, izmanto vidējo plūsmu minūtē (Q_{av} , m³/min) un filtra šķērsriezuma laukumu (A_{filter} , m²), bet šķērsriezuma laukuma aprēķināšanai ir svarīgi ņemt vērā arī filtra augstumu h_{GAO} . BV aprēķina, par pamatu ņemot kopējo attīrīto notekūdeņu daudzumu $Q_{apstrādāti}$, kas dalīts ar filtra tilpumu (V_{GAO} , m³).

$$EBCT = \frac{h_{GAC} * A_{filter}}{Q_{av}}, min$$

$$BV = \frac{V_{treated}}{V_{GAC}}$$

Lai noteiktu GAO filtra dozēšanu, jāievēro šādi principi:

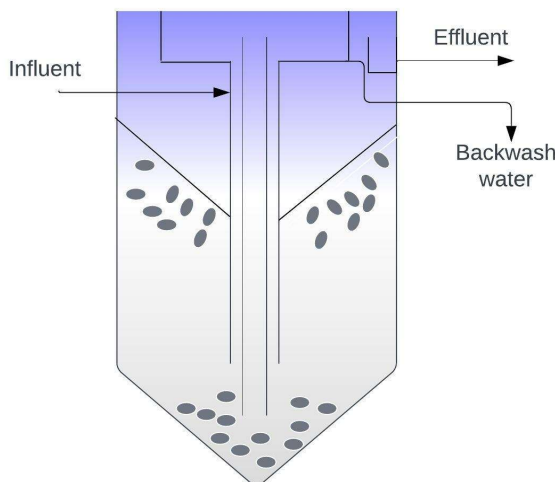
- ekspozīcijas laiks (EBCT) GAO filtrā > 20 min;
- filtrēšanas ātrums 4–7 m/st.;
- filtra slāņa augstums 1,5–3 m, kopējam filtra augstumam ir jābūt tādā, lai filtrējošais materiāls skalošanas laikā varētu izplesties par 20–30%;
- piemērotākais GAO ir atkarīgs no TSS koncentrācijas — jo augstāka ir TSS koncentrācija pie ieplūdes filtrā, jo lielākai jābūt GAO frakcijai;
- filtra sprauslu izmērs jāizvēlas tāds, lai nodrošinātu, ka tās neaizsprosto GAO.

GAO frakcijas, kas piemērotas TSS koncentrācijai pie ieplūdes filtrā:

- GAO 1,2–2,4 mm, ja TSS > 10 mg/l;
- GAO 0,8–2 mm, ja TSS 5–10 mg/l;
- GAO 0,6–2,4 mm, ja TSS < 5 mg/l.

Ja NAI jau ir uzstādīts smilšu filtrs pēc attīrīšanas, šī filtra saturu var aizstāt ar GAO. Tradicionālo smilšu filtru veido grants, smilšu un antracīta slāņi, bet daudzos gadījumos visus šos

slāņus var daļēji vai pilnībā aizstāt ar aktīvo ogli. Bet filtra skalošanas intensitāte un citi darbības parametri ir jāpielāgo, lai tie atbilstu aktīvajai oglei.



13. attēls. Vienkāršots GAO reaktors ar kustīgu slāni.

Jaunie termini attēlā:

Backwash water - skalošanas ūdens

13. attēlā parādīts vienkāršots GAO reaktors ar kustīgu slāni. Lai gan šobrīd par šo tehnoloģiju ir zināms salīdzinoši maz, tiek uzskatīts, ka tai ir potenciāls noņemt mikropiesārņotājus. Šo pašu tehnoloģiju izmanto arī ar smiltīm, lai samazinātu TSS koncentrāciju, bet atkarībā no konfigurācijas arī bioloģiskai attīrīšanai, lai atdalītu, piemēram, slāpekli un fosforu. Lai attīrītu no mikropiesārņotājiem, iepriekš samitrinātas GAO tiek dozētas ieklūstošajā straumē filtrā, piemēram, reizi dienā. Filtra filtrēšanas ātrums ir 7–15 m/st. Nepieciešamā GAO deva ir aptuveni 2 mgGAO/mgDOC. Daļu GAO no reaktora apakšas izņem reizi nedēļā. Atkarībā no vietējiem apstākļiem šo reaktoru cenšas ekspluatēt ar GAO, kura vecums ir vidēji 80–100 dienu.

5.2.1. GAO reģenerācija

Tomēr atkarībā no paredzētā GAO daudzuma filtrā tā adsorbcijas jauda kādā brīdī sasnies savu robežu, kad vairs nebūs nodrošināta pietiekama attīrīšana no mikropiesārņotājiem. Šajā brīdī aktīvā ogle ir jānomaina vai jāreģenerē. Šā pētījuma veikšanas laikā Igaunijā, Latvijā un Lietuvā netika atrasts neviens uzņēmums, kas nodarbotos ar izlietotās ogles reģenerāciju.

Vienkāršoti reģenerācijas process sastāv no šādiem posmiem:

- GAO žāvēšana līdz 400° °C temperatūrā, kad notiek desorbcija, t. i., izvadīto mikropiesārņotāju atbrīvošana;
- pirolīze aptuveni 800° °C temperatūrā, kurā savienojumi, kas nav izdalījušies desorbcijas procesā, tiek sadalīti un izvadīti no GAO virsmas ar pirolīzes gāzes palīdzību;
- GAO apstrāde ar ūdens tvaiku.

Lai gan GAO reģenerācija ir energoietilpīgs process, tā joprojām ir lētāka un pietiekami kvalitatīva, lai konkurētu ar neapstrādātu GAO, ja vien reģenerāciju var veikt uz vietas. Tomēr transporta izmaksām var būt izšķiroša nozīme, ja GAO reģenerācijai ir jānogādā uz citu valsti.

5.3. Aktivētās ogles procesa kontrole

Aktivētās ogles procesu var kontrolēt un optimizēt, izmantojot dažādus parametrus. Visbiežāk sastopamie rādītāji ir šādi:

- UV₂₅₄ tiešsaistes mērījumi, ko korelē ar DOC;
- DOC tiešsaistes mērījumi;
- duļķainības mērījumi;
- TSS mērījumi.

Lai gan mikropiesārņotāju atdalīšanas efektivitāti nevar izmērīt uzreiz tiešsaistē, DOC ir labs rādītājs. Ar laiku, kad būs savākti daži dati par faktisko mikropiesārņotāju aizvākšanu, varēs noteikt saikni starp DOC un mikropiesārņotājiem vietējos apstākļos, kas ļaus attiecīgi kontrolēt procesu. Pārmērīga duļķainība un TSS veicina filtru aizsērēšanos, tāpēc to izmanto, lai nepieciešamības gadījumā apietu aktīvās ogles filtru, ja notekūdeņos ir pārāk augsta TSS koncentrācija.

6. Ozonēšana

Ozons ir ļoti spēcīgs oksidētājs, kas jau sen tiek izmantots dzeramā ūdens attīrīšanā, lai uzlabotu ūdens īpašības. To galvenokārt izmanto tādu organisko vielu attīrīšanai, kas izraisa garšu un smaržu. Ozonam ir svarīga nozīme arī notekūdeņu attīrīšanā, galvenokārt rūpniecisko notekūdeņu priekšattīrīšanā, kur bioloģiski nenoārdāmie organiskie savienojumi tiek oksidēti, lai

kļūtu bioloģiski noārdāmi. Ozons ir zila, nestabila, indīga gāze ar asu smaržu. Ozons ir smagāks par gaisu, tāpēc tas var viegli uzkrāties darba zonās. Tomēr ozons, pateicoties vielas augstajai reaktivitātei, samērā ātri sadalās, tāpēc tas ir jāražo uz vietas.

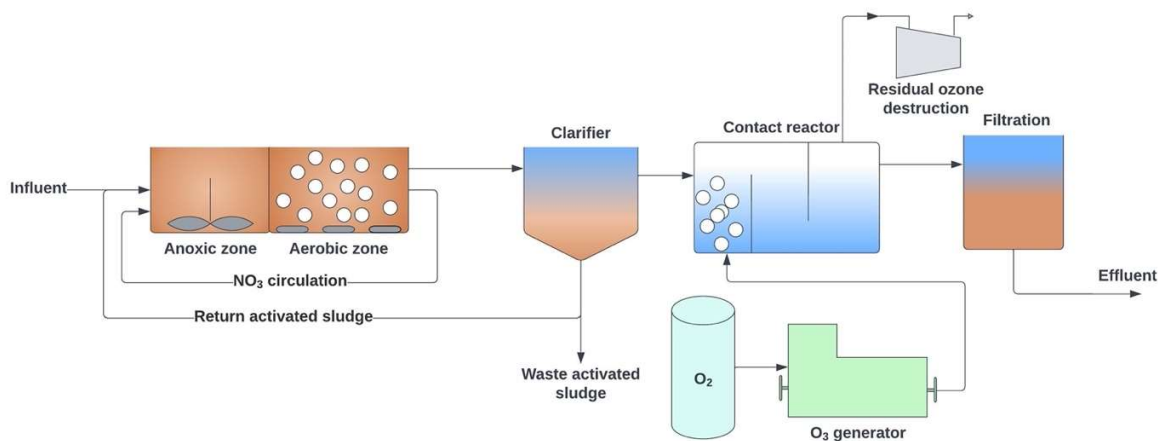
Ozonam ir svarīga nozīme papildu attīrīšanas procesā, kur to izmanto gan organisko vielu, kas nav viegli bioloģiski noārdāmas, atdalīšanai, gan FAV oksidēšanai par mazāk bīstamiem savienojumiem. Ozona patēriņu vai devu ietekmē dažādi notekūdeņos esošie piesārņotāji, piemēram:

- izšķīdušais organiskais ogleklis (DOC) — norāda izšķīdušo organisko vielu koncentrāciju, starp kurām ir arī FAV. Ozonēšanas laikā šīs organiskās vielas tiek sadalītas kopā ar FAV, tāpēc, jo augstāka DOC vērtība, jo vairāk ozona nepieciešams, lai atdalītu FAV;
- ķīmiskais skābekļa patēriņš (KSP) — norāda skābekļa daudzumu, kas patērēts organisko un neorganisko vielu oksidēšanai. Ozonēšana samazina KSP par 12–17%, bet ja pēc ozonēšanas seko bioloģiskā attīrīšana, tad pat par 20–40%;
- nitrīti (NO_2) — ozonēšanas laikā NO_2 oksidējas par NO_3 , kam tiek izmantoti aptuveni 3,43 $\text{mgO}_3/\text{mg-N}$;
- suspendētās cietās vielas (kopējās cietās vielas, TSS) — augsta TSS koncentrācija prasa lielākas ozona devas, jo augstāka TSS koncentrācija nozīmē organisko vielu satura pieaugumu;
- bromīds — bromīda un ozona reakcijas rezultātā rodas bromāti, kas ir vēl bīstamāks videi nekā FAV. Tāpēc, pirms izvēlēties ozona tehnoloģiju, ir jānosaka bromīdu koncentrācija, jo īpaši piekrastes apdzīvotajās vietās. Ozonēšanu nedrīkst izmantot, ja bromīdu koncentrācija ir lielāka par 0,15 mg/l un nepieciešamās ozona devas pārsniedz 0,7 $\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$. Ja bromīdu koncentrācija pārsniedz 0,15 mg/l , NAI izplūdes vietā jāveic pārbaudes, lai noteiktu bromātu veidošanās pakāpi un novērtētu to iespējamo ietekmi uz ar notekūdeņiem sajaukto ūdeni.

14. attēlā attēlots visizplatītākais tehnoloģiskais izkārtojums ozonēšanai, lai likvidētu mikropiesārņotājus. Visbiežāk izmantotā metode ietver ozona ražošanu no šķīdrā skābekļa (LOX). LOX tiek ievadīts ozona ģeneratorā, ražojot O_3 , kas tiek ievadīts kontaktreaktorā, kur tas sāk sadalīt organiskās vielas. Tā kā ozona pārpalikumi apdraud vidi un cilvēkus, tas ir jāsavāc un atkal jāsadala skābeklī. Iespējamās oksidācijas blakusproduktu veidošanās dēļ pēc ozonēšanas vienmēr jāveic filtrēšana. Piemēram, daudzos gadījumos smilšu filtrā veidojošā bioplēve un tajā dzīvojošie mikroorganismi spēj saistīt un sadalīt oksidācijas blakusproduktus. Visdrošākā kombinācija ir ozonēšana un aktīvās ogles filtrs.

Eksistē arī ozona ģeneratori, kas ražo O_3 no gaisa. Tomēr šajā brīdī ir jāņem vērā augstākas elektroenerģijas izmaksas. Ozona ražošanai no LOX ir nepieciešams 8–10 kWh/kg , bet ozona

ražošanai no gaisa — 12–18 kWh/kg. Turklāt gaisam nepieciešama priekšapstrāde, t. i., attīrīšana un žāvēšana. Tomēr mazākās NAI, kur uzņēmums nevēlas izmantot LOX stingro darba drošības prasību dēļ, ozona ražošana no gaisa ir labs un vienkāršs tehnoloģiskais risinājums.



14. attēls. Mikropiesārņotāju attīrīšana NAI, izmantojot ozonēšanu.

Jaunie termini attēlā:

O₃ generator - O₃ ģenerators

Residual ozone destruction - liekā ozona neitralizators

6.1. Ozonēšanas plānošana, lai attīrītu mikropiesārņotājus

Vispārīgie tehnoloģiskie jautājumi, kas jāņem vērā, izvēloties ozonēšanu, ir šādi:

- vai ozons jāražo no LOX vai gaisa;
- kā un kur dozēt ozonu;
- kādam jābūt kontaktreaktora izmēram;
- kāda ir nepieciešamā ozona neitralizatora jauda;
- kā atdalīt ozonēšanas laikā radušos pārveidošanās produktus.

Ozonēšanas laikā veidojas oksidācijas blakusprodukti, bet organiskās vielas, kas nav viegli noārdāmas, var kļūt bioloģiski viegli noārdāmas, tāpēc ozonēšanas rezultātā palielinās arī BOD (pat par vairāk nekā 100%). Tāpēc pēc ozonēšanas ir jāuzstāda bioloģiskais filtrs, piemēram,

smilšu filtrs, vai, ideālā gadījumā, aktīvās ogles filtrs, kas darbojas kā BAO (bioloģiskais aktīvās ogles filtrs).

Lai noteiktu procesa nepieciešamo jaudu, jāievēro šādi principi:

- jāveic izmēģinājuma testi, lai noteiktu vajadzīgo ozona devu; lai atdalītu mikropiesārņotājus, devas ir no 0,3 līdz 0,9 mgO₃/mgDOC;
- izvēlas ar ūdeni dzesējamu ozona ģeneratoru, kura vajadzīgā jauda ir nosakāma izmēģinājuma testos. Praksē no skābekļa ir iespējams saražot ne vairāk kā 150–190 g/m³ ozona, bet no gaisa — 30–60 g/m³ ozona;
- ozona devas kontrolei jābūt automatizētai;
- jāizvēlas glabāšanas tvertne, kas ir piemērota LOX glabāšanai, ja ir paredzēts ozonu ražot no šķidrā skābekļa. Nepieciešamais padeves biežums ir atkarīgs no uzglabāšanas tvertnes lieluma, tāpēc vispirms ir nepieciešams noskaidrot informāciju par nepieciešamo ozona ģeneratoru;
- jāplāno kontaktreaktors ar ekspozīcijas laiku 15–30 min un jāizvēlas ozona dozēšanas difuzori, ņemot vērā kontaktreaktora dziļumu. Visbiežāk tiek izmantoti keramikas difuzori. Ozonu var dozēt arī pirms kontaktreaktora, izmantojot inžektoru, kam seko statiskais maisītājs;
- jāizvēlas katalītiskais ozona neitralizators atkarībā no ozona devas un paredzētās ventilācijas;
- ozons apdraud vidi un cilvēkus, tāpēc, to lietojot, jāievēro visas spēkā esošās vides un darba drošības prasības.

Tā kā mikropiesārņotāju atdalīšana ir tieši atkarīga no ozona devas, būtiska ir automatizēta kontrole. Tā kā pagaidām nav iespējams veikt mikropiesārņotāju mērījumus tiešsaistē, tā vietā tiek izmantoti summārie parametri vai vienkāršoti pētījumos noteikti parametri un saiknes starp tiem. Viens no bieži izmantotajiem parametriem ir UVA254 adsorbciija, ko izmanto, lai novērtētu DOC koncentrāciju. Tomēr mūsdienās ir pieejami arī DOC tiešsaistes sensori, tāpēc to sasaiste ar ozonēšanu ir vēl vienkāršāka.

Ozona ģeneratora uzstādīšanas vieta jāizvēlas saskaņā ar šādiem kritērijiem:^{19, 20}

- telpas temperatūra nedrīkst pārsniegt 30 °C, bet gaisa mitrums — 60%;
- telpā jābūt pēc iespējas mazāk putekļiem;
- telpā nedrīkst atrasties citas oksidējošas vielas (piemēram, koagulanti utt.);

¹⁹ Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser, ATV M 205, 1998, ISBN 3-927729-75-2.

²⁰ Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrens- technische Aspekte und offene Fragen, DWA T2/2022, November 2022.

- būvniecībā jāizmanto ozonizturīgi materiāli;
- pirms izplūdes no notekūdeņiem jānoņem ozona atlikums, maksimāli pieļaujamā ozona koncentrācija ir 0,02 mg/m³.

Ozons ir gāze, kas apdraud cilvēku veselību, tāpēc ir ļoti svarīgi izmantot pareizas darba aizsardzības metodes. Ozona iedarbība vispirms izpaužas acu, deguna un plaušu gļotādā. Ilgāka uzturēšanās telpās, kurās ozona koncentrācija pārsniedz 0,2 mg/m³, izraisa klepošanu. No 4 mg/m³ var būt tipiskas saindēšanās pazīmes, bet telpās, kur ozona koncentrācija pārsniedz 20 mg/m³, cilvēkam var iestāties nāve. Tāpēc ir svarīgi ņemt vērā ^{13,14}:

- maksimāli pieļaujamā ozona koncentrācija telpās ir 0,2 mg/m³;
- jābūt iespējai vēdināt telpas, tajās neieejot;
- telpās, kurās var rasties ozona piesārņojums, jābūt aprīkotām ar atbilstošu signalizāciju par apdraudējumu;
- ar ozona iekārtām drīkst strādāt tikai profesionāļi, kuri apzinās to bīstamību un ir kompetenti tās lietot.

Piemēram, DWA noteikumu grāmatu T2/2022 *Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, Verfahrens-Technische aspects und Offene Fragen* var izmantot, lai plānotu ozonēšanu, kuras mērķis ir gan dezinfekcija, gan FAV attīrīšana.

6.2. FAV attīrīšana ar ozonēšanu

Ozona efektivitāte notekūdeņu attīrīšanā no FAV ir atkarīga no vairākiem faktoriem. Tā kā ozonēšana notiek pēc bioloģiskās attīrīšanas, kas ievērojami mainās dienas un nakts laikā un kopumā ir relatīvi nestabila, nav sagaidāms, ka mikropiesārņotāju atdalīšanas rādītāji būs stabili, ja ozona deva paliek nemainīga. Šiem faktoriem ir vislielākā ietekme uz mikropiesārņotāju aizvākšanu:

- izšķīdušo organisko vielu koncentrācija (DOC);
- sārmainība;
- pH vērtība;
- nitrītu koncentrācija; un

- citu ozonu patērējošu savienojumu koncentrācijas.

Augstu attīrīšanas efektivitāti var sagaidīt šādām FAV (pie pH 7): etinilestradiols, sulfametoksazols, klaritromicīns, estrons, klindamicīns, estradiols, eritromicīns, nonilfenols, roksitromicīns, trimetoprimis un diklofenaks. Vairāk nekā 90% šo FAV noārdās pie īpašām ozona devām > 0,4 mgO₃/mgDOC, jo to attīrīšana notiek tiešas reakcijas ar ozonu rezultātā.

Vidēju attīrīšanas efektivitāti var sagaidīt acesulfamam, bezafibrātam, atenololam, gabapentīnam, izoproturonam, mekopropam, metoprololam un sotalolam. Šo FAV attīrīšana notiek gan tiešā ozonēšanas rezultātā, gan arī izveidojušos OH radikāļu dēļ. Nepieciešamās specifiskās ozona devas šīm FAV ir jānosaka izmēģinājuma testos, bet tās svārstās no 0,4 līdz 1 mgO₃/mgDOC.

Ozona devu FAV un citu organisko vielu oksidācijai nosaka, ņemot vērā DOC un nitrītu koncentrāciju. Šī ir viena no iespējamām pieejām:²¹

$$D = (D_{\text{DOC}} \times C_{\text{DOC}} + 3.43 \times)$$

kur D = nepieciešamā ozona doza mgO₃/l;

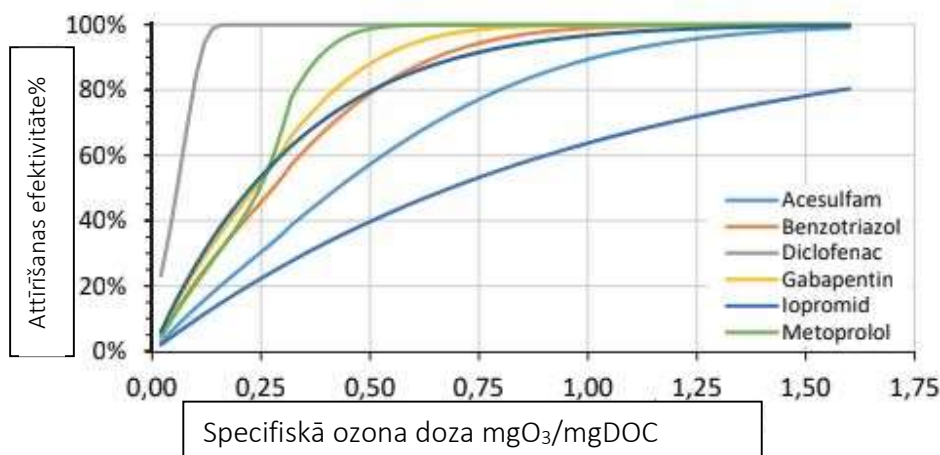
D_{DOC} = DOC specifiskā ozona doza mg/l, parasti 0,3–0,9 mgO₃/mgDOC;

C_{DOC} = DOC koncentrācija mg/l;

= nitrītu koncentrācija mg/l.

15. attēlā ir sniegtas dažas norādes par ozona devām, kas nepieciešamas, lai veiktu attīrīšanu no FAV. Kā redzams, jo lielāka ozona deva uz DOC, jo augstāka ir oksidācijas efektivitāte. Tomēr lielākas devas nozīmē arī lielākas ekspluatācijas izmaksas. Tāpēc, plānojot ozonēšanu, vienmēr jāveic izmēģinājuma testi.

²¹ Stapf, M.; Miehe, U.; Bester, K.; & Lukas, M. Guideline for advanced API removal. CWPharma project report for GoA3.4: Optimization and control of advanced treatment. December 2020.



15. attēls. Konkrētas ozona devas attīrīšanai no noteiktām FAV. (DWA rule book T2/2022 “Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen — Erfahrungen, Verfahrens-Technische aspects and Offene Fragen”).

6.3. Ozonēšanas procesa kontrole

Svarīgākie parametri, kas jākontrolē ozonēšanā, jau ir aplūkoti. Tie ietver DOC, ko var izmērīt tieši vai izmantojot UVA254, kas korelē ar DOC. Tāpat ir jāmēra ozona koncentrācija dažādos procesa posmos. Lai gan sākotnēji var šķist, ka analizatori ir ārkārtīgi dārgi, patiesībā, ņemot vērā ekspluatācijas izmaksas, pareizi optimizēts/kontrolēts process vienmēr ļaus ietaupīt izmaksas. Noteiktās vietās, piemēram, darba zonās, ozona mērījumi ir ļoti svarīgi no darba drošības viedokļa.

Svarīgākie mērījumu punkti ir šādi:

- kontaktreaktora ieplūdes plūsmas mērījumi;
- saražotā ozona daudzuma mērījumi;
- ozona koncentrācijas mērījumi kontaktreaktorā;
- atlikušā ozona mērījumi, lai pārliecinātos, ka ozona neitralizators darbojas.

Mikropiesārņotāju oksidāciju, izmantojot ozonu, ir iespējams zināmā mērā automatizēt. Šim nolūkam ir izstrādātas vairākas kontroles stratēģijas. Dažas no tām ir izceltas šeit.

A: Pastāvīgi vienāda ozona deva

+ nav dārgu analizatoru;

+ viegli lietot un uzturēt;

- nav ņemts vērā faktiskais notekūdeņu sastāvs;

- ne vienmēr garantē vislabāko iespējamo attīrīšanu no mikropiesārņotājiem, jo deva ne vienmēr atbilst vajadzībām.

B: Ozona devas kontrole, izmantojot DOC (mēra pie ieplūdes kontaktreaktorā, nosakot paredzamo DOC)

+ DOC ir salīdzinoši viegli izmērāms un korelē ar mikropiesārņotājiem;

+ optimizēts ozona patēriņš, dozējot tik daudz, cik nepieciešams attīrīšanai no DOC;

- DOC analizatori ir vienkārši, bet salīdzinoši dārgi;

- jāmēra arī citi parametri, kas ietekmē ozona devu, piemēram, nitrīti.

Tāpat vadības stratēģiju B var pielietot, izmantojot UV254, kas ir lētāks risinājums. Šajā gadījumā UV254 jāmēra no ieplūdes kontaktreaktorā un no izplūdes no gala filtriem. Lai gan izplūde no filtriem sniedz informāciju ar zināmu aizkavēšanos, tā joprojām ir pietiekama, lai kontrolētu apstrādes procesu.

Reizi nedēļā jāanalizē arī DOC specifiskā ozona deva ($\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$) un ozona ražošanas apjomi, lai noskaidrotu, vai tā saglabājas normas robežās. Mikropiesārņotāju mērījumi būtu jāveic saskaņā ar valsts ieteikumiem vai pamatojoties uz Ierosinātajiem grozījumiem Direktīvā par Komunālo notekūdeņu attīrīšanu.

7. Padziļināta oksidēšana

Attīrīšanai no mikropiesārņotājiem ir plaši izmēģināta padziļināta oksidēšana. Tomēr šī tehnoloģija joprojām tiek testēta pilotiekārtu līmenī. Padziļināta oksidēšana ir tāds oksidēšanas

process, kurā izmanto hidroksila radikāļus. Šos radikāļus var veidot, izmantojot šādus procesus un kombinācijas:

- ozonēšana kopā ar ūdeņraža peroksīdu;
- ozonēšana apvienojumā ar UV starojumu;
- ar ūdeņraža peroksīdu un UV starojumu;
- ar titāna dioksīdu un UV gaismu.

Lai gan ūdeņraža peroksīds viens pats nenodrošina pietiekamu mikropiesārņotāju oksidēšanu, tā apvienošana ar ozonēšanu palielina hidroksilradikāļu koncentrāciju, kas spēj noārdīt organiskās vielas. Pēdējā desmitgadē notekūdeņu dezinfekcijai plaši izmanto UV gaismu, taču šīs tehnoloģijas neattiecas uz mikropiesārņotājiem. Tam būtu nepieciešams daudzkārt lielāks starojums, turklāt procesā būtu jāapvieno, piemēram, ūdeņraža peroksīds, ozonēšana vai titāna dioksīds. Tomēr šādas tehnoloģisko risinājumu veidu kombinācijas netiek izmantotas pilna mēroga notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, jo UV gaismai ir liels enerģijas patēriņš un ir nepieciešami arī palīgprocesī, kas to padara par salīdzinoši sarežģītu un dārgu risinājumu.

8. Dzelzs (+6) oksīds

Fe(VI)O_4^{2-} jeb dzelzs oksīds +6 oksidācijas pakāpē ir savienojums, kas ūdenī ir relatīvi nestabils un ātri reducējas par Fe(III), t. i., pievieno trīs elektronus, tāpēc ferrāts ir interesants oksidētājs. Ļoti vienkāršojot, mikropiesārņotāju oksidēšana notiek šādi:



Dzelzs (+6) oksīds spēj oksidēt dažādas organiskās un neorganiskās vielas. Līdz šim tas galvenokārt ir izmantots laboratorijas apstākļos. Tomēr šobrīd ir zināms, ka attīrīšana no mikropiesārņotājiem ir atkarīga no:

- piesārņotāju koncentrācijas;
- pH;
- dzelzs (+6) oksīda devas;
- ekspozīcijas laika.

Dzelzs (+6) oksīdu var dozēt tieši bioreaktorā, kur tas zināmā mērā darbojas arī kā koagulants, kā arī to var izmantot kā pēcattīrīšanas iespēju. Dozējot aktīvajās dūņās, ir

nepieciešamas lielākas devas. Viena no iespējamajām tehnoloģiskajām shēmām, ko izmanto pēc otrējiem nostādinātājiem, varētu būt šāda:

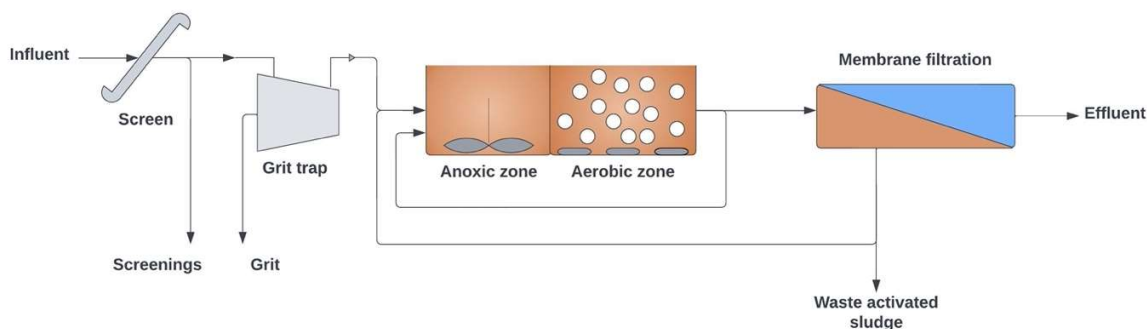
- 30–60 min ekspozīcijas laiks kontakta kamerā pie sausa laika plūsmas;
- dzelzs (+6) oksīda dozēšana;
- beigu filtrācija/dzidrinātāji (disku filtrs, smilšu filtrs).

Kā liecina pašreizējie pētījumi²², piemēram, 10 mgFe/l BSP₅ samazināja par 80 % un TOC par 35%. Saskaņā ar pašreizējām zināšanām, lai atdalītu mikropiesārņotājus, jāapsver dzelzs (+6) oksīda devas līdz 1 gFe/gDOC. Tas nodrošinās, ka tiks attīrīti > 80% no FAV. Tomēr autoriem nav zināms neviens šāds pilna mēroga apstrādes ar dzelzs (+6) oksīdu process, tāpēc trūkst precīzu datu šāda veida risinājuma izveidei un darbībai.

9. Membrānu filtrēšana

Membrānu filtrēšana jau gadu desmitiem tiek izmantota medicīnā un dzeramā ūdens attīrīšanā. Ūdens attīrīšanā membrānu filtrāciju parasti izmanto, lai atdalītu antropogēnos savienojumus, piemēram, herbicīdus un pesticīdus, kas nonākuši gruntsūdeņos vai virszemes ūdeņos. Membrānu filtrācijā tiek izmantota membrāna, kas kalpo kā fiziska barjera ar ļoti specializētām īpašībām, kas atkarībā no filtra poru lieluma nelaiž cauri lielāko daļu piesārņotāju. Visbiežāk izmantotie membrānu filtrēšanas veidi dzeramā ūdens attīrīšanā ir nanofiltrēšana un reversā osmoze. Piemēram, reverso osmozi plaši izmanto dzeramā ūdens ražošanai no jūras ūdens.

²² Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt for Umwelt BAFU, Bern 2012.



16. attēls. Membrānas bioreaktors. Aktivētās dūņas no notekūdeņiem atdala, izmantojot membrānas filtrāciju, nevis nogulsnešanos. Šajā procesā tiek atdalīta arī lielākā daļa bīstamo savienojumu.

Jaunie termini attēlā:

Membrane filtration – membrānfiltrs

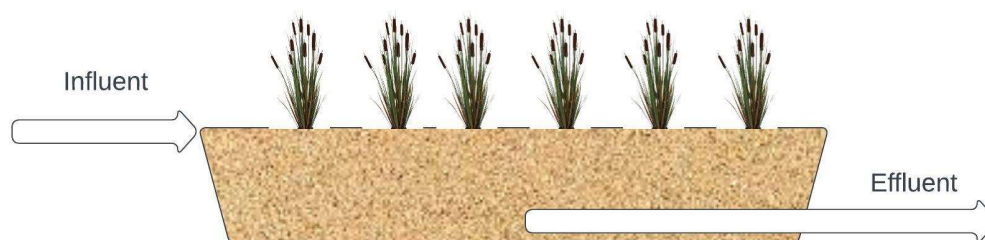
Mūsdienās membrānu filtrācija ir arvien pieaugoša tendence arī notekūdeņu attīrīšanā, kur tradicionālais aktivēto dūņu process tiek kombinēts ar membrānu filtrāciju (ultrafiltrāciju vai nanofiltrāciju). Šī procesa priekšrocība ir tā, ka zūd atkarība no aktīvo dūņu īpašībām, piemēram, nostādināšanas, tāpēc NAI var darboties ar lielāku aktīvo dūņu koncentrāciju. Līdz ar to bioreaktors var būt mazāka tilpuma. Turklāt membrānas filtri novērš daudzu bīstamu savienojumu, tostarp mikropiesārņotāju, nokļūšanu notekūdeņos, piemēram, izmantojot nanofiltrāciju. Tas atvieglo notekūdeņu pārstrādi. Tomēr jāatceras, ka membrānu filtri piesārņojumu nevis attīra, bet gan koncentrē. Tāpēc problēma ir, ko darīt ar izveidojušos koncentrātu. Tomēr mikropiesārņotāju koncentrēšana varētu nest priekšrocības, piemēram, rūpniecības uzņēmumos un slimnīcās, tādējādi samazinot problemātiskā ūdens daudzumu, lai samazinātos turpmākai attīrīšanai nepieciešamā hidrauliskā jauda.

10. Citi tehnoloģiskie risinājumi mikropiesārņotāju likvidēšanai

Mikropiesārņotāju līmeni var samazināt, izmantojot dažādus bioloģiskos procesus. Tāpēc daudzos gadījumos ozonēšanai seko, piemēram, notekūdeņu attīrīšana ar bioplēvi. Taču pat bez iepriekšējas ozonēšanas vairāki dabā balstīti attīrīšanas procesi spēj attīrīt no daļas mikropiesārņotāju. Kā šādu attīrīšanas procesu piemērus var minēt filtrāciju gruntī ar vai bez

niedrēm un dažādus citus dabā balstītus attīrīšanas procesus, piemēram, mitrājus un stabilizācijas dīķus.

Filtrācija gruntī ir īpaši izplatīti mazās attīrīšanas iekārtās, jo to uzturēšana ir salīdzinoši neliela un daudzos gadījumos to darbībai nav nepieciešama elektrība. Piemēram, filtrācija gruntī var būt grants un smilšu filtrs, kura virspusē aug bioplēve, kas apstādīta ar niedrēm vai bez tām. Šī risinājuma trūkums ir tas, ka ir nepieciešama salīdzinoši liela platība, vidēji 1–3 m²/CE jeb 5–12 m²/m³ notekūdeņu.



17. attēls. Vienkāršota shēma infiltrācijai gruntī. Notekūdeņi no bioloģiskās attīrīšanas tiek novadīti apraktā filtrā to pēcattīrīšanai.

Visizplatītākā dabiskos procesos balstītā notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģija ir izbūvēts mākslīgais mitrājs. Tas ir līdzīgi kā infiltrācijā gruntī, kur attīrīšanas efektivitāti nodrošina dažādu bioloģisko procesu mijiedarbība, ko veic mikroorganismi un augi, kas patērē un noārda piesārņojošās vielas. Lai gan lielākā daļa pētījumu ir par organisko vielu un barības vielu, piemēram, slāpekļa un fosfora, attīrīšanu, arvien vairāk pētījumu tiek veikti arī par mitrāju izmantošanu, lai samazinātu mikropiesārņotāju līmeni. Līdz šim ir publicēti vairāk nekā 50 atsevišķu gadījumu pētījumi.^{23,24}

Mākslīgo mitrāju attīrīšanas efektivitāte ir atkarīga no gadalaika, īpaši Ziemeļeiropā. Vasarā, pateicoties mikroorganismu aktivitātei, tiek panākta labāka attīrīšana no mikropiesārņotājiem, kā arī šo procesu paātrina arī saules gaisma (fotodegradācija), kas var noārdīt noteiktas vielas, kā arī sorbcija un adsorbācija. Saskaņā ar dažādiem pētījumiem vidējā attīrīšanas no mikropiesārņotājiem efektivitāte ir no 21% līdz 93%. Piemēram, ibuprofēnam un naproksēnam tika konstatēta attīrīšana pakāpe > 70%, bet karbamazepīnam — tikai < 20%. Līdz šim visaugstākā

²³ Huma Ilyas, Ilyas Masih, Eric D. van Hullebusch; Pharmaceuticals' removal by constructed wetlands: a critical evaluation and meta-analysis on performance, risk reduction, and role of physicochemical properties on removal mechanisms. *J Water Health* 1 June 2020; 18 (3): 253–291. doi: <https://doi.org/10.2166/wh.2020.213>

²⁴ Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern 2012.

atdalīšanas efektivitāte (91%) ir konstatēta attiecībā uz acetaminofēnu. Sīkāka informācija ir atrodama citētajos pētījumos.^{19,20}

11. Mikropiesārņotāju attīrīšanas izmaksas

Pašlaik ir pieejams pietiekami daudz informācijas par investīcijām un ekspluatācijas izmaksām, kas saistītas ar notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģijām no mikropiesārņotājiem. Protams, precīzas izmaksas ir atkarīgas no vietējiem apstākļiem, kādos tiek veikti izmēģinājuma testi, lai noteiktu nepieciešamos ekspluatācijas parametrus un piemērotāko tehnoloģisko risinājumu. Tomēr ir daži rādītāji, kurus var izmantot, lai novērtētu izmaksas.

Vispirms ir jāanalizē esošā situācija un jānosaka mērķi. Šeit ir minēti daži no faktoriem, kas jāņem vērā:

- vai NAI ir pietiekami daudz vietas, lai izbūvētu papildu attīrīšanas pakāpi;
- vai NAI ir vecas ēkas vai tvertnes, kuras var nodot atpakaļ ekspluatācijā;
- kā nākotnē mainīsies hidrauliskā slodze;
- esošās NAI efektivitāte — vai ir pietiekami sākt, piemēram, ar ozonēšanu vai aktīvās ogles adsorbciju, vai arī ir nepieciešams pievienot priekšattīrīšanu (piemēram, smilšu filtru);
- kā tiek stabilizētas saražotās notekūdeņu dūņas;
- vai uzņēmumam ir vai arī tas spēj apmācīt cilvēkus darbam ar salīdzinoši sarežģītām tehnoloģijām.

Tehnoloģiju izmaksu aprēķins dažādās valstīs var atšķirties, taču vidēji Eiropā jāņem vērā šādi nosacījumi:

- konstrukciju kalpošanas laiks — 30 gadu;
- automātiskās vadības sistēma un tās daļas — 10 gadu;
- iekārtas (sūkņi, sieti, padevēji utt.) — 15 gadu;
- ekspluatācijas izmaksas visā kalpošanas laikā.

Izmaksas var aprēķināt, pamatojoties uz (procentos no ieguldījuma):

ikgadējās uzturēšanas izmaksas (konstrukcijas 0,5%, automātiskās vadības sistēma un tās daļas 2,5%, iekārtas 2%);

- enerģijas izmaksas (apkure, elektrība);
- ķīmikālijas (LOX ozonēšanai, aktīvā ogle, koagulants, flokulants u. c.);
- atlikumu apstrāde (piemēram, saražoto notekūdeņu dūņu izvietošana vai pārstrāde);
- mikropiesārņotāju testēšanas izmaksas;
- personāla izmaksas, vajadzības gadījumā ārpalpojumi.

Precīzu izmaksu aplēse ir atkarīga no konkrētās vietas, turklāt izejvielu cenas mūsdienās strauji mainās. Tomēr procesus var salīdzināt, jo procentuālais sadalījums saglabājas līdzīgs. Piemēram, ozons ir visvairāk atkarīgs no elektroenerģijas cenas, bet GAO un PAO — no savas cenas.

Publicētajos pētījumos ir konstatētas šādas konkrētas izmaksas²⁵. Visi avoti apstiprina principu, ka, jo lielākas ir notekūdeņu attīrīšanas iekārtas, jo mazākas ir specifiskās izmaksas viena kubikmetra notekūdeņu attīrīšanai:

- PAI 10–30 centu/m³ jeb 2–14 EUR uz 1 CE gadā;
- GAO 10–50 centi/m³ jeb 2–14 EUR/gadā;
- O₃ 5–20 centi/m³ jeb 2–16 EUR/CE/gadā;
- membrānas filtrācija 0,5–2 EUR/m³ + GAO 10–50 centi/m³ uz koncentrātu.

Kā redzams šajos skaitļos, visu pašlaik izmantoto tehnoloģiju īpatnējās izmaksas ir aptuveni vienādā līmenī. Taču, piemēram, ozonēšana noteikti ir vairāk atkarīga no elektroenerģijas cenām nekā aktīvās ogles adsorbēcija. Turklāt ozona tehnoloģijas uzturēšana ir sarežģītāka un dārgāka, ja NAI personālam trūkst nepieciešamās kompetences. Turklāt dažos gadījumos var būt nepieciešams no ozonētajiem notekūdeņiem atdalīt oksidācijas blakusproduktus, izmantojot aktivēto ogli, un tādā gadījumā ozona izmaksas samazinās, bet palielinās, piemēram, GAO procesa un tā ekspluatācijas izmaksas. Membrānas filtrācijas rezultātā veidojas koncentrāts, kam nepieciešama tālāka attīrīšana, tāpēc šī tehnoloģija nav piemērota komunālo notekūdeņu attīrīšanas iekārtām, bet tai var būt zināms potenciāls, piemēram, slimnīcu notekūdeņu koncentrēšanai pirms to tālākas attīrīšanas.

²⁵ Galvenokārt Vācijā un Šveicē esošas attīrīšanas iekārtas.

12.FAV notekūdeņu dūņās

Pēdējos gados galvenā uzmanība ir pievērsta FAV notekūdeņos, un, lai gan zinātnieki ir iesaistījušies dūņu izpētē, nav izvirzīti nozīmīgi mērķi. Turklāt dažādās valstīs atšķiras arī dūņu apsaimniekošanas veids. Vietās, kur ir notiek plaša rūpniecība, dūņas tiek sadedzinātas, kas attīrīšanai no mikropiesārņotājiem ļauj izmantot visas iepriekš minētās tehnoloģijas. Tomēr, ja notekūdeņu dūņas paredzēts izmantot, jo īpaši tajās esošās barības vielas, piemēram, slāpekli un fosforu, tad ir jāturpina izpētīt iespējas, kā samazināt pārāk augstu mikropiesārņotāju koncentrāciju.

Var pieņemt, ka visbūtiskāko mikropiesārņotāju koncentrācijas palielināšanos atkritumu aktivētajās dūņās izraisa PAO dozēšana, ievadot to tieši aktivētajās dūņās vai arī iesūknējot daļu no PAO kontaktreaktorā uz bioreaktoru. Šajā gadījumā izmantotās jeb saražotās dūņas ir sadedzināmas. Ja tiek izmantots GAO filtrs, mikropiesārņotāju koncentrācija notekūdeņu dūņās jeb aktīvajās dūņās, visticamāk, būs zemāka, taču daļa to slodzes tiks atgriezta no filtra skalošanas ūdenī. Vismāko mikropiesārņotāju slodzi atstrādātajās notekūdeņu dūņās var sasniegt, izmantojot ozonēšanu apvienojumā ar GAO filtru. Lai gan rūpnieciskajās NAI dažkārt tiek veikta pirmsozonēšana, t. i., ozonēšana pirms bioloģiskās attīrīšanas, kas arī noārda daļu FAV, tas nav ieteicams, jo var veidoties vēl bīstamāki oksidācijas blakusprodukti.

Labākais veids, kā samazināt mikropiesārņotāju koncentrāciju saražotajās notekūdeņu dūņās, ir samazināt videi bīstamo mikropiesārņotāju izmantošanu (aizstājot tos ar mazāk bīstamiem) un veikt apstrādi konkrētos piesārņojuma avotos, piemēram, slimnīcās. Lai gan liela ietekme ir arī bezrecepšu zālēm, ko cilvēki lieto mājās, ievērojama ir arī slimnīcu un aprūpes iestāžu radītā piesārņojuma slodze.

Vairākos projektos ir pētīta iespējamā ietekme, ko rada FAV nokļūšana vidē. Lai gan lielākā daļa atzīst, ka mikropiesārņotāji, kas nonāk zemā koncentrācijā, nav tieši bīstami, ir norādīts, ka to ilgtermiņa ietekmi ir grūti prognozēt. Piemēram, augsnes paraugos, kas ņemti Nīderlandē, gēna, kas nosaka augsnes baktēriju rezistenci pret tetraciklīnu, sastopamība bija palielinājusies gandrīz 15 reizes, bet tas ir saistīts ar mēslošanai izmantotajiem kūtsmēsliem, kas iegūti no dzīvniekiem, kuriem tika ievadīti attiecīgie preparāti. Mūsdienās ir arī zināms, ka FAV var uzkrāties augos, un, lai gan FAV galvenokārt koncentrējas saknēs, tās tomēr var nonākt dzīvnieku un cilvēku uzturā.²⁶

²⁶ Mini-review: Pharmaceuticals in sewage sludge and their degradation during composting – recent studies in Estonia. Nei, L.; Haiba, E.; Lillenberg, M. *Agraarteadus* 2020. <http://doi.org/10.15159/jas.20.02>

Pašlaik notekūdeņu dūņu apstrādes tehnoloģijas galvenokārt ir kompostēšana un anaerobā stabilizācija. Sadedzināšana šeit nav sīkāk aplūkota, jo FAV klātbūtnei šajā procesā vairs nav nozīmes. Ege Haiba (Egge Haiba) savā doktorantūras pētījumā izpētīja dažādas kompostēšanas tehnoloģijas²⁷ un atklāja, ka, kompostējot var samazināt daudz FAV daudzumu. Kompostēšanas procesa optimizācija ietekmē arī attīrīšanas efektivitāti (piemēram, izmantotās piedevas, temperatūra utt.). Viņas pētījumi tika veikti, izmantojot izmēģinājuma testus, kuros analizēja FAV koncentrāciju samazināšanos kontrolētos apstākļos, 30 dienas kompostējot stirpu kompostā, kā arī novērtēja tos pašus procesus Tallinas un Tartu NAI. Kompostēšanas laikā mitruma līmenis tika uzturēts 60–70%, un kā piedevas tika izmantotas zāģu skaidas, salmi un kūdra. Vidējā temperatūra komposta vālā bija 23–26 °C. Attīrīšanas efektivitāte parādīja, ka, piemēram, zāģu skaidas paātrina kompostēšanas procesu, tostarp FAV attīrīšanu. Precīzs nepieciešamā kompostēšanas perioda ilgums ir atkarīgs no vietējiem apstākļiem, bet tas svārstās no 1 līdz 12 mēnešiem.

Viņas pētījumā izdevās samazināt šādu FAV koncentrāciju:

- diklofenaks > 90%;
- triklozāns > 60%;
- sulfametoksazols > 80%;
- sulfadimetoksīns > 75%
- norfloksacīns > 80%;
- ciprofloksacīns > 90%;
- ofloksacīns > 95%.

Sagaidāms, ka arī anaerobās stabilizācijas rezultātā samazināsies dažas FAV, lai gan, tāpat kā aktivēto dūņu process, tas ir drīzāk blakus process. Mikroorganismi galvenokārt noārda viegli noārdāmās organiskās vielas, kuru koncentrācija ir ievērojami augstāka salīdzinājumā ar mikropiesārņotāju koncentrāciju. Tādējādi FAV zināmā mērā tiek attīrītas kopā ar viegli noārdāmām organiskajām vielām. Attīrīšanas efektivitāte ir ļoti atšķirīga. Katrīna Asplunda (Katrīna Asplund) maģistra darbā „Farmaceitisko savienojumu attīrīšana ar notekūdeņu dūņu anaerobo fermentāciju” (*Removal of pharmaceutical compounds by anaerobic digestion of sewage sludge*), kas izstrādāts 2022. gadā Novia Lietišķo zinātņu universitātē (Novia University of Applied Sciences), tika iegūti šādi rezultāti:

- karbamazepīns 52–66%;

²⁷ Egge Haiba, Doctor's Degree, 2017, (sup) Lembit Nei; Merike Lillenberg, Optimization of sewage sludge composting: problems and solutions, Tallinn University of Technology School of Engineering, Tartu College.

- diklofenaks 26–45%.

Tajā pašā darbā norādīti citu pētījumu rezultāti, kuros ir konstatēts, ka abu savienojumu attīrīšanas efektivitāte pārsniedz 70%. Tā kā pēc anaerobās stabilizācijas bieži vien seko pēckompostēšana, galīgās mikropiesārņotāju koncentrācijas ir zemākas.

Apkopojot dažādus zinātniskos darbus, var uzskatīt, ka anaerobās stabilizācijas laikā tiek attīrīti vairāk nekā 70% mikropiesārņotāju. Tas, vai mikropiesārņojums tiek bioloģiski noārdīts, transformēts vai sorbēts dūņās/biomasā, ir atkarīgs no piesārņotāja un zināmā mērā arī no procesa apstākļiem.

13. Ieteikumu kopsavilkums par mikropiesārņotāju attīrīšanu Latvijā un Lietuvā

Mūsdienās ir zināms, ka farmaceitisko preparātu atliekas ir problemātiski mikropiesārņotāji, kam jāpievērš pastiprināta uzmanība. Situācija, tostarp to potenciālais risks videi un cilvēkam, dažādās valstīs atšķiras. Tomēr ES līmenī ir panākta vispārēja vienošanās, ka nākotnē galvenā uzmanība ir jāpievērš 12 farmaceitisko vielu atliekām:

1. *amisulprīdam;*
2. *karbamazepīnam;*
3. *citalopramam;*
4. *klaritromicīnam;*
5. *diklofenakam;*
6. *hidrohlortiazīdam;*
7. *metoprololam;*
8. *venlafaksīnam;*
9. *benzotriazolam;*
10. *kandesartānam;*
11. *irbesartānam;*
12. *4-metilbenzotriazola un 6-metilbenzotriazola maisījums (CAS Nr. 136-85-6).*

Turklāt ir panākta vienošanās, ka vismaz sešām vielām no minētā saraksta attīrīšanas efektivitātei ir jābūt vismaz 80%. Tomēr, jau iepriekšējās nodaļās ir minēts, ka nav iespējams attīrīt specifiski tikai konkrētu FAV, bet tehnoloģijas attīrīšanai no visām šīm vielām ir salīdzinoši līdzīgas attīrīšanai no citiem bīstamajiem savienojumiem. Tas nozīmē, ka, izvēloties FAV attīrīšanas tehnoloģiju, ir jāņem vērā konkrētās NAI vajadzības un iespējamie FAV riski, kas pārsniedz PNEC vērtības. Vai ir nepieciešama papildu attīrīšana no barības vielām (slāpekļa, fosfora), smagajiem metāliem u. c., ievērojot 6. attēlā redzamo procesu. Aplūkojot sīkāk MEDWwater projektā identificētos problemātiskos FAV, piemēram, ibuprofēnu, diklofenaku, azitromicīnu un amoksicilīnu, var secināt, ka no lielākās daļas šiem FAV iespējams attīrīt gan ar ozonēšanu, gan ar aktīvās ogles adsorbciju, bet vispiemērotākā ir adsorbcija. Tomēr, kā jau vairākkārt norādīts, visas minētās tehnoloģijas darbojas atšķirīgi atkarībā no konkrētajiem notekūdeņiem, tāpēc visprecīzāko aplēsi var veikt izmēģinājuma testos, kurus, runājot par ozonēšanu un adsorbciju, vispirms var veikt laboratorijas apstākļos.

Lai gan daudzām Eiropas valstīm jau ir plaša pieredze FAV atdalīšanā notekūdeņu attīrīšanas iekārtās, jāņem vērā, ka šos rezultātus nevar tieši pārnest uz Baltijas valstīm. Vislīdzīgākie apstākļi varētu būt Zviedrijā. Līdz ar to katrai valstij ir svarīgi attīstīt savu pieredzi un iemaņas. Šim nolūkam vislabāk

piemēroti ir daļēji rūpnieciski izmēģinājuma procesi. Tas ļaus apgūt, kā ekspluatēt, uzturēt un identificēt iespējamās problēmas, piemēram, vietējo klimatisko apstākļu dēļ. Tas arī atklās iespējamās problēmas. Izmēģinājumi paaugstinās personāla kompetenci un sniegs vērtīgu ieguldījumu turpmāko pilna mēroga attīrīšanas procesu plānošanā, procesa operatoru apmācībā u. tml.

Priekšlikumos ES Direktīvas par Komunālo notekūdeņu attīrīšanas grozījumiem paredzēts, ka mikropiesārņotāju attīrīšanas tehnoloģija vispirms jāizmanto notekūdeņu attīrīšanas iekārtām ar > 100 000 CE, tāpēc tām pirmajām jāveic priekšizpēte, piemēram, saskaņā ar CWPharma *Vadlīnijām par padziļinātu attīrīšanu no FAV*. Minētajās vadlīnijās galvenā uzmanība pievērsta farmaceitisko preparātu atliekām, tāpēc ir svarīgi iekļaut arī mikropiesārņotājus kopumā un analizēt visas citas iespējamās vajadzības, piemēram, slāpekļa un fosfora papildu atdalīšanu, kuru robežvērtības arī tiks pārskatītas iepriekš minētajā direktīvā. Pēc tam ir jāizpēta un jāplāno mikropiesārņotāju attīrīšana NAI ar > 10 000 CE.

Bibliogrāfija

Aktivkohleinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung, Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte, DWA T1/2019, Mai 2019.

Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser, ATV M 205, 1998, ISBN 3-927729-75-2.

Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva par komunālo notekūdeņu attīrīšanu (pārstrādāta redakcija). Brisele, 26.10.2022., COM(2022) 541 beigu 1.–8. PIELIKUMS.

Egge Haiba, Doctor's Degree, 2017, (sup) Lembit Nei; Merike Lillenberg, Optimization of sewage sludge composting: problems and solutions, Tallinn University of Technology School of Engineering, Tartu College.

Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrenstechnische Aspekte und offene Fragen, DWA T2/2022, November 2022.

Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrenstechnische Aspekte und offene Fragen, DWA T2/2022, November 2022.

Huma Ilyas, Ilyas Masih, Eric D. van Hullebusch; Pharmaceuticals' removal by constructed wetlands: a critical evaluation and meta-analysis on performance, risk reduction, and role of physicochemical properties on removal mechanisms. *J Water Health* 1 June 2020; 18 (3): 253–291. doi: <https://doi.org/10.2166/wh.2020.213>

Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt for Umwelt BAFU, Bern 2012.

Mini-review: Pharmaceuticals in sewage sludge and their degradation during composting – recent studies in Estonia. Nei, L.; Haiba, E.; Lillenberg, M. *Agraarteadus* 2020. <http://doi.org/10.15159/jas.20.02>

Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen, DWA T3/2015, April 2015.

Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen, DWA T3/2015, April 2015.

Spurenstoffe im Abwasser, eine Handlungsempfehlung for Kommunen, Kompetenzzentrums Spurenstoffe, Oktober 2020.

Stapf, M., Miehe, U., Knoche, F., Lukas, M., Bartz, J., Brauer, F., Gutsche, M., Kullwatz, J., Petkow, C., Schneider, M., Winckelmann, D., Bogusz, A., Tomczyk, B., Trzcińska, M., Dworak, A., Chojniak-Gronek, J., Szumska, M., Zieliński, M., Walkowiak, R., Putna-Nimane, I., Liepina-Leimane, I., Dzintare, L., Barda, I., Bester, K., Kharel, S., Sehlén, R., Nilsson J., Larsen, S. B. (2020). Impact of ozonation and post-treatment on ecotoxicological endpoints, water quality, API and transformation products. CWPharma project report for GoA3.3: Comparison of post-treatment options.

Stapf, M.; Miehe, U.; Bester, K.; & Lukas, M. Guideline for advanced API removal. CWPharma project report for GoA3.4: Optimization and control of advanced treatment. Optimization and control of advanced treatment. 2020. gada decembris.

Takashi Azuma, Natsumi Arima, Ai Tsukada, Satoru Hiram, Rie Matsuoka, Ryogo Moriwake, Hirotaka Ishiuchi, Tomomi Inoyama, Yusuke Teranishi, Misato Yamaoka, Yoshiki Mino, Tetsuya Hayashi, Yoshikazu Fujita, Mikio Masada, Detection of pharmaceuticals and phytochemicals together with their metabolites in hospital effluents in Japan, and their contribution to sewage treatment plant influents, *Science of The Total Environment*, Volumes 548–549, 2016, Pages 189-197, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.157>.

Ulvi, A., Aydın, S. & Aydın, M.E. Fate of selected pharmaceuticals in hospital and municipal wastewater effluent: occurrence, removal, and environmental risk assessment. *Environ Sci Pollut Res* 29, 75609–75625 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21131-y>

Pielikums

1. pielikums

Ieteicamās FAV turpmākam monitoringam

FAV nosaukums	CAS Nr.	Izmantošana	Pamatojums							Virszemes ūdens	Notekūdeņi	Dūņas
17- α -etinilestradiols (EE2)	57-63-6	estrogēnie hormoni								+		
17- β -estradiols (E2)	50-28-2	estrogēnie hormoni								+		
4-metilbenzotriazols un 6-metilbenzotriazols	29878-31-7 un 136-85-6	antibakteriālas, pretsēnīšu, pretvīrusu, pretiekaisuma, antihipertensīvas, pretsāpju īpašības; korozijas inhibitori									+	
Amilsulprīds	71675-85-9	pretvemšanas un antipsihotiskie medikamenti									+	
Amoksicilīns	26787-78-0	antibiotikas								+	+	+
Azitromicīns	CAS_83905-01-5	antibiotikas								+	+	
Benzotriazols	95-14-7	antibakteriālas, pretsēnīšu, pretvīrusu, pretiekaisuma, antihipertensīvas, pretsāpju īpašības; korozijas inhibitori									+	
Kandesartāns	139481-59-7	angiotenzīna receptoru blokators									+	
Karbamazepīns	298-46-4	pretkrampju vai pretepilepsijas zāles								+	+	
Ciprofloksacīns	85721-33-1	antibiotikas								+	+	
Citaloprams	59729-33-8	antidepresants									+	
Klaritromicīns	81103-11-9	antibiotikas								+	+	
Klindamicīns	18323-44-9	antibiotikas								+		
Klotrimazols	23593-75-1	pretsēnīšu zāles								+		
Diklofenaks	15307-86-5	nesteroīdie pretiekaisuma līdzekļi								+	+	+
Eritromicīns	CAS_114-07-8	antibiotikas								+		
Estrons (E1)	53-16-7	estrogēnie hormoni								+		
Flukonazols	86386-73-4	pretsēnīšu zāles								+		

FAV nosaukums	CAS Nr.	Izmantošana	Pamatojums							Virszemes ūdens	Notekūdeņi	Dūņas
Diciāndiamīds	141-83-3	metformīna pārveidošanās produkts								+		
Hidrohlortiazīds	58-93-5	diurētiskie medikamenti									+	
Ibuprofēns	15687-27-1	nesteroīdie pretiekaisuma līdzekļi								+	+	+
Irbesartāns	138402-11-6	angiotenzīna II receptoru blokators									+	
Metformīns	657-24-9	2. tipa diabēta ārstēšanas līdzeklis								+		
Metoprolols	37350-58-6	selektīvs β ₁ receptoru blokators									+	
Mikonazols	22916-47-8	pretsēnīšu medikamenti								+		
O-desmetil-venlafaksīns	93413-62-8	venlafaksīna cilvēka metabolīts								+		
Ofloksacīns	82419-36-1	antibiotikas								+		
Primidons	125-33-7	pretepilepsijas līdzeklis								+		
Sulfametoksazols	723-46-6	antibiotikas								+		
Trimetoprimis	738-70-5	antibiotikas								+		
Venlafaksīns	93413-69-5	antidepresants								+	+	

Pamatojuma skaidrojumi

	Monitoringa saraksta prasības; monitoringa staciju skaits, monitoringa vietas: LV (3), LT (4)
	HELCOM indikators
	UWWTD atjaunināšanas plāni
	2013/39/ES direktīvas nākotnes (2022) atjaunināšanas plāni
	MEDWwater rezultāti: PNEC pārsniegumi notekūdeņos/virszemes ūdeņos
	MEDWwater rezultāti: pārsniegts pieļaujama sajaukšanās zonu garums
	MEDWwater rezultāti: PNEC pārsniegumi augsnē
	ES Parlamenta un Padomes Direktīva, ar kuru groza Direktīvu 2000/60/EK, ar ko izveido sistēmu Kopienas rīcībai ūdens resursu politikas jomā, Direktīvu 2006/118/EK par gruntsūdeņu aizsardzību pret piesārņojumu un pasliktināšanos un Direktīvu 2008/105/EK par vides kvalitātes standartiem ūdens resursu politikas jomā

Monitoringa matricas skaidrojumi

+	jau spēkā esošo normatīvo aktu prasības
+	ierosinātās ES līmeņa normatīvo aktu prasības, ko plānots drīzumā apstiprināt
+	ierosinātās prasības ES līmeņa normatīvajos aktos, ko plānots drīzumā apstiprināt (ierosināts, pamatojoties uz MEDWwater projekta rezultātiem, kā vienu no 6 vielām)
+	ierosinātās ES līmeņa normatīvo aktu prasības, ko plānots drīzumā apstiprināt (citas iespējams vielas)
+	ieteicams — pēc izvēles izpētes monitoringam — skrīnings notekūdeņos, augšpus un lejpus notekūdeņu izplūdei