

FCG.

Finnish
Consulting
Group



Haitta-aineiden poiston toteuttavuus ja vaikutukset suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla

RAPORTTI

Vesihuoltolaitosten kehittämisasiirasto, Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy, Kouvolan Vesi Oy, Oulun Vesi, Riihimäen Vesi, Seinäjoen Vesi, Turun seudun puhdistamo Oy

Katriina Rajala, Henri Haimi, Jussi Lindholm

30.11.2023

P48029

Sisällys

Haitta-aineiden poiston toteuttavuus ja vaikutukset suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla	5
1 Tutkimuksen tausta ja motivaatio	5
2 Yhdyskuntajätevesidirektiivin päivitys.....	6
2.1 Haitta-aineet.....	6
2.2 Muut yhdisteet	7
3 Kirjallisuuskatsaus.....	9
3.1 Haitta-aineiden poistomenetelmät.....	9
3.1.1 Otsonointi	10
3.1.2 Aktiivihiili.....	11
3.1.3 Muut haitta-aineiden poistoon soveltuvat menetelmät	13
3.1.4 Prosessin valintaan vaikuttavat asiat	14
3.2 Suomessa tehdyt haitta-ainetutkimukset jätevesistä ja ympäristöstä	18
3.2.1 Jätevedet.....	18
3.2.2 Vesistö.....	21
3.3 Haitta-aineiden poiston kustannustieto ja kustannusarviot kirjallisuudessa	22
4 Hankkeeseen osallistuneet jätevedenpuhdistamot	24
5 Haitta-aineidenpoistoa koskeva kysely	26
6 Näytteenotto ja analyysit	29
6.1 Analysoidut yhdisteet ja näytteenotto.....	29
6.1.1 Vedenlaatu	29
6.1.2 Haitta-ainenäytteet.....	29
6.2 Mittaustulokset	31
6.2.1 Vedenlaatu	31
6.2.2 Haitta-aineet	32
6.2.2.1 Pitoisuudet.....	32
6.2.2.2 Poistotehot	35
7 Prosessi- ja laitossuunnittelu	38
7.1 Prosessimitoituksen periaatteet	38
7.1.1 Otsonointi	38

7.1.2	Aktiivihiilisuodatus	39
7.2	Rakennustekniset yksityiskohdat	39
7.3	Vesienjohtaminen	40
7.4	Prosessivaihtoehtojen toteutusperiaatteet	40
8	Uusien prosessiyksiköiden vaikutukset	43
8.1	Energia.....	43
8.2	Kustannukset.....	47
8.2.1	Investointikustannukset.....	47
8.2.2	Käyttökustannukset	48
8.3	Hiilijalanjälki	51
8.3.1	Laskentarajaus ja päästökertoimet.....	51
8.3.2	Laskennan tulokset	52
9	Johtopäätökset ja suositukset	58
	Lähteet	61

Liitteet

Liite 1: Direktiiviehdotuksessa listatut haitta-aineet

Liite 2: Jätevedenpuhdistamot, joilla on käytössä tai jonne on suunnitteilla koko mittakaavan haitta-aineidenpoistoprosessi

Liite 3: PFAS-yhdisteistä

Liite 4: Lähtötietokyselyn kysymykset ja tulokset

Liite 5: Näytteenottopäiväkirjat haitta-ainenäytteenotosta

Liite 6: Kiintoainepitoisuuksien vaihtelua hankkeen puhdistamoilla

FCG Finnish Consulting Group Oy ("FCG") on laatinut tämän raportin FCG:n asiakkaan ("Asiakas") toimeksianton ja ohjeiden mukaisesti. Tämä raportti on laadittu FCG:n ja Asiakkaan välisen sopimuksen ehtojen mukaisesti. FCG ei ole vastuussa tästä raportista tai sen käytöstä suhteessa mihinkään muuhun tahoon kuin Asiakkaaseen.

Tämä raportti voi perustua kokonaan tai osaksi kolmansien osapuolten FCG:lle antamiin tietoihin tai julkisiin lähteisiin ja näin ollen tietoihin, joihin FCG:llä ei ole ollut vaikutusmahdollisuuksia. FCG toteaa nimenomaisesti, ettei sillä ole vastuuta sille annettujen virheellisten tai puutteellisten tietojen perusteella.

Kaikki oikeudet (mukaan lukien tekijänoikeudet) tähän raporttiin kuuluvat FCG:lle, tai Asiakkaalle, mikäli niin on sovittu FCG:n ja Asiakkaan välillä. Tätä raporttia tai sen osaa ei saa muokata tai käyttää uudelleen toiseen tarkoitukseen ilman FCG:n kirjallista lupaa.

Lyhenteet ja käsitteet

AVL Asukasvastineluku

BAF Biologically active filter, biologisesti aktiivinen suodatin

BOD Biochemical oxygen demand, biologinen hapenkulutus

BV Bed volumes, käsitellyt pettilavuudet

COD Chemical oxygen demand, kemiallinen hapentarve

DOC Dissolved organic carbon, liuennut orgaaninen hiili

EBCT empty bed contact time, tyhjän pedin kontaktiaika

GAC Granular activated carbon, rakeinen aktiivihiihi

HAVA Haitalliset ja vaaralliset aineet

MBR Membrane bioreactor, kalvobioreaktori

MBBR Moving bed biofilm reactor; Kantoaineprosessi, jossa reaktorissa vapaasti liikkuvien kantoainekappaleiden pinnalla kasvaa mikrobeja biofilmissä

PAC Powdered activated carbon, jauhemainen aktiivihiihi

PFAS Perfluoroalkylic substances, per- ja polyfluoratut alkylyyhdisteet

PFOA Perfluorioktaanihappo

PFOS Perfluorioktaanisulfonihappo

TOC Total organic carbon, orgaanisen hiilen kokonaismäärä

Haitta-aineiden poiston toteuttavuus ja vaikutukset suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla

1 Tutkimuksen tausta ja motivaatio

Euroopan komissio julkaisi lokakuussa 2022 ehdotuksen uudistetusta yhdyskuntajätevesidirektiivistä (2022/0345). Yhtenä uusista asioista direktiiviehdotuksessa on mikroepäpuhtauksien eli haitta-aineiden poistovelvoite jätevedenpuhdistamoilla. Haitta-aineilla tarkoitetaan tässä yhteydessä jätevedessä pienissä pitoisuuksissa olevia liuenneita orgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi lääkeaineita tai hyönteismyrkkyjä (Pistocchi ym., 2022).

Toistaiseksi jätevedenpuhdistamoilla seurataan jätevedestä haitallisia ja vaarallisia aineita (ns. HAVA-aineet) Valtioneuvoston asetuksen 1022/2006 (Valtioneuvoston asetus vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista) mukaisesti. Tuossa asetuksessa on päästökieltoja, päästöraja-arvoja ja ympäristölaatu normeja useille yhdisteille, mutta ei yhdellekään direktiiviehdotuksen yhdisteistä.

Ennen varsinaisen uudistetun direktiivin julkaisua jäsenvaltiot neuvottelevat direktiivin sisällöstä, ja valmiiseen direktiiviin saattaa tulla joiltain osin lievennyksiä direktiiviehdotukseen nähden. Valmis direktiivi julkaistaan todennäköisesti vuoden 2024 aikana.

Direktiiviehdotuksen sisältö vastaa haitta-aineiden osalta Sveitsin vastaavaa lainsäädäntöä. Sveitsissä lainsäädäntöön on valittu sellaiset merkkiaineet (samat kuin direktiiviehdotuksessa), joita seuraamalla on mahdollista todeta haitta-aineidenpoistoprosessin toimivan halutusti. Sveitsissä lainsäädäntö haitta-aineiden poistamiseksi jätevedestä on ollut voimassa vuodesta 2016 lähtien. (UVEK, 2016). Haitta-aineiden poistamiseksi on lainsäädäntö lisäksi ainakin Saksan Baden-Württembergin ja Nordrhein-Westfalenin osavaltioissa (micropoll.ch; de Boer ym., 2022).

Tässä raportissa selvitetään haitta-aineiden poiston toteutettavuutta ja vaikutuksia suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Selvityksessä on käytetty kuutta keskikoista tai suurta puhdistamoita tapaustutkimuskohteina. Raportin kappaleessa 2 kuvataan tiivistetysti yhdyskuntajätevesidirektiivin päivitysesityksen sisältö. Haitta-aineiden poistoon keskittyvä kirjallisuuskatsaus on koottu kappaleeseen 3. Seuraavaksi kappaleessa 4 kuvataan selvityksen tapaustutkimuskohteina olevat jätevedenpuhdistamot. Kappale 5 koskee kohdepuhdistamoille tehtyä haitta-aineidenpoistoa koskevaa kyselyä. Selvityksessä toteutetut haitta-aineanalyysit ja muu kerätty vedenlaatutieto on koottu kappaleeseen 6. Hankkeessa tehtyjen prosessi- ja laitossuunnitteluiden periaatteet kuvataan kappaleessa 7 ja uusien prosessiyksiköiden vaikutuksia on arvioitu kappaleessa 8. Lopuksi kappaleessa 9 esitetään selvityksen johtopäätökset ja annetaan suosituksia.

2 Yhdyskuntajätevesidirektiivin päivitys

2.1 Haitta-aineet

Euroopan komission direktiiviehdotuksessa 2022/0345 mainittu haitta-aineiden poistovelvoite koskee yli 100 000 asukasvastineluvun (AVL) puhdistamoita vuoteen 2035 mennessä, ja viisi vuotta myöhemmin myös yli 10 000 AVL puhdistamoita ”haavoittumiselle alttiilla alueilla”. Haavoittumiselle alttiilla alueilla tarkoitetaan alueita, joilla haitta-aineista aiheutuu riski ympäristölle tai ihmisten terveydelle. Jäsenvaltiot määrittelevät haavoittumiselle alttiit alueet itse direktiiviesityksen artiklan 8 perusteiden mukaisesti (EU, 2022/0345).

Tämän hankkeen aikana EU:n parlamentti julkaisi direktiiviehdotuksesta muutosehdotuksen loka-kuussa 2023 (EU, 2023). Sen vaatimuksia on verrattu tässä raportissa sekä direktiiviehdotukseen että nykyiseen direktiiviin.

Ehdotuksessa listataan 12 yhdistettä, haitta-ainetta, joista vähintään kuutta tulee mitata (EU, 2022/0345). Yhdisteet on jaettu erittäin helposti käsiteltäviin aineisiin ja helposti poistettaviin aineisiin, joista tulee valita puhdistamokohtaisesti seurattavaksi vähintään neljä erittäin helposti käsiteltävää ainetta ja vähintään kaksi helposti poistettavaa ainetta. Yhdisteet ovat amisulpridi, karbamatsopiini, sitalopraami, klaritromysiini, diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, metoprololi, venlafaksiini, bentsotriatsoli, kandesartan, irbesartan, 4/6-metyylibentsotriatsoli (liite 1). (EU, 2022/0345). Nämä ovat samat yhdisteet kuin Sveitsin lainsäädännössä, myös yhdisteiden jako ryhmiin on sama (UVEK, 2016). Direktiivin muutosehdotuksessa on lisätty kolmas yhdisteryhmä: korkean riskin yhdisteet, joihin kuuluvat telmisartan, bisfenol A, beta-estradiol ja perfluorioktaanisulfonihappo (PFOS). Muutosehdotuksen mukaan kaikkia näitä neljää yhdistettä tulee mitata puhdistamokohtaisesti valittujen vähintään kuuden yhdisteen lisäksi. (EU, 2023).

Sveitsissä valittiin lainsäädäntöön sellaiset merkkiaineet, joita seuraamalla nähdään prosessin toimivan halutusti (micropoll.ch; VVY, 2016). Ennen merkkiaineiden valintaa tehtiin tutkimuksia, joissa tutkittiin aktiivihiihi- ja otsonointikäsittelyn vaikutusta hyvin laajaan listaan erilaisia yhdisteitä. Tutkimuksissa todettiin näiden tekniikoiden poistavan tehokkaasti hyvin monenlaisia yhdisteitä, ja voitiin siten valita listasta yhdisteet, joiden poistuessa voidaan luottaa myös muiden yhdisteiden poistuvan. Esimerkiksi Bourgin ym. (2018) raportoivat täydessä mittakaavassa otsonikäsittelyn sisältävän jätevedenpuhdistusprosessin poistavan koko prosessissa keskimäärin yli 79 % 550:ä yhdisteestä, kun samanaikaisesti indikaattoriyhdisteiden poisto on yli 80 %. Sekä aktiivihiihikäsittelyn että otsonoinnin tiedetään olevan tehokkaita haitta-aineiden poistossa sekä niiden ekotoksikologisten vaikutusten vähentämisessä (Kienle ym., 2022).

Direktiiviehdotuksessa on vaatimuksena 80 % poisto seurattavaksi valituille haitta-aineille, mutta ehdotus ei määrittele haitta-aineille enimmäispitoisuutta käsitellyssä jätevedessä.

Direktiiviehdotuksen mukaan haitta-aineiden analysoimiseksi otettavat aikaperustaiset näytteet tulee ottaa 48 tunnin kokoomanäytteinä jätevedenpuhdistamolle tulevasta ja sieltä lähtevästä jätevedestä. Näytteitä otetaan taulukossa 1 mainittu määrä. (EU, 2022/0345; EU, 2023).

Muutosehdotuksessa on lievennetty haitta-aineidenpoistovelvoitetta siten, että 80 % poisto tulee saavuttaa vain kuivan sään virtaamalla (EU, 2023).

Taulukko 1. *Haitta-aineanalyysiä varten otettavien näytteiden määrä erikokoisilla jätevedenpuhdistamoilla.*

Jätevedenpuhdistamon koko, AVL	Näytemäärä haitta-aineanalyysiin	
	Direktiiviehdotus (EU, 2022/0345)	Muutosehdotus (EU, 2023)
1 000–9 999*	-	-
10 000–49 999	1 näyte / kuukausi	1 näyte / 2 kuukautta
50 000–99 999	2 näytettä / viikko	1 näyte / 2 kuukautta
100 000 >	2 näytettä / viikko	1 näyte / kuukausi

*Muutosehdotuksessa tämä on 750–9 999.

Direktiiviehdotuksessa esitetty poistovaatimus ja näytteenottoaika on Sveitsin lainsäädäntöä vastaava. Enimmäispitoisuutta yhdisteille ei ole määritelty myöskään Sveitsin haitta-ainelainsäädännössä. Sveitsissä näytteet tulee ottaa 48 tunnin kokoomanäytteinä puhdistamolta lähtevästä jätevedestä ja tulevan veden sijaan esiselkeytetystä jätevedestä (micropoll.ch). Direktiiviehdotuksessa puhutaan tulevasta jätevedestä, mutta mainitaan että muitakin menetelmiä voi käyttää, jos voidaan osoittaa niillä saatavan samanlaiset tulokset (EU, 2022/0345: liite 1 D).

2.2 Muut yhdisteet

Direktiiviehdotuksessa on myös muutoksia typen, fosforin ja kiintoaineen poistovaatimuksiin sekä näiden muuttujien raja-arvoihin verrattuna nykyiseen direktiiviin 91/271/ETY. Lisäksi direktiiviehdotuksessa ehdotetaan energianeutraalisuustavoitetta, mikromuovien seurantaa ja nykyisestä tiheyttä tarkkailuvelvoitetta. Direktiiviehdotuksen ja muutosehdotuksen vaatimukset on listattu taulukossa 2.

30.11.2023

HH

Taulukko 2. Direktiiviehdotuksen vaatimukset verrattuna direktiivin muutosehdotuksen sekä nykyisen direktiivin vaatimuksiin.

	Direktiiviehdotus vuodelle 2040 (EU, 2022/0345)	Direktiivin muutosehdotus vuodelle 2040 (EU, 2023)	Nykyinen direktiivi (91/271/ETY ¹)
BOD ₅	Raja-arvo 25 mg/l O ₂ 70–90 % poisto ² ilman nitrifikaatiota	samat vaatimukset kuin direktiiviehdotuksessa	Raja-arvo 25 mg/l O ₂ 70–90 % poisto ² ilman nitrifointia
COD _{Cr} ³	Raja-arvo 125 mg/l O ₂ 75 % poisto	samat vaatimukset kuin direktiiviehdotuksessa	Raja-arvo 125 mg/l O ₂ 75 % poisto
TOC ³	Raja-arvo 37 mg/l 75 % poisto	samat vaatimukset kuin direktiiviehdotuksessa	-
Typpi	- 85 % poisto, ei reunaehtoja, joilla poistovelvoitteen voisi välttää - Raja-arvo 6 mg/l - AVL > 100 000 ⁸ + AVL >10 000 ⁴	- 80 % poisto ⁶ , vuosikeskiarvo, reunaehdot: 12 °C ⁷ ja pidättyminen valuma-alueella - Raja-arvo 8 mg/l ⁶ - AVL > 100 000 vuonna 2038 + AVL > 10 000 vuonna 2043 ⁴	- 70–80 % poisto, reunaehtojen (12 °C, pidättyminen valuma-alueella) toteutuessa typenpoistovelvoite ei ole voimassa. - Raja-arvo 15 mg/l (AVL 10 000 –100 000) 10 mg/l (AVL > 100 000)
Fosfori	- 90 % poisto - Raja-arvo 0,5 mg/l - AVL > 100 000 + AVL > 10 000 ⁴)	- 93 % poisto ⁶ - Raja-arvo 0,2 mg/l ⁶ - AVL > 100 000 vuonna 2038 + AVL > 10 000 vuonna 2043 ⁴)	- 80 % poisto - Raja-arvo 2 mg/l (AVL 10 000 –100 000) 1 mg/l (AVL > 100 000)
Kiintoaine	- 90 % poisto - Raja-arvo 35 mg/l ⁵ - AVL > 2 000 AVL alkaen direktiivin voimaan tulosta; AVL 2 000–10 000 rannikolla, vuonna 2027; AVL 1 000–2 000, vuonna 2030	- 90 % poisto - Raja-arvo 35 mg/l ⁵ - AVL > 2 000 AVL alkaen direktiivin voimaan tulosta; AVL 2 000–10 000 rannikolla, vuonna 2027; AVL 750–2 000, vuonna 2032	- Poisto 70 % (AVL 2 000–10 000) 90 % (AVL >10 000) - Raja-arvo: 60 mg/l (AVL 2 000–10 000) 35 mg/l (AVL >10 000)
Energia-neutraalius	50 % energianeutraalius yhteensä koko Suomessa 2030 mennessä (AVL > 10 000)	samat vaatimukset kuin direktiiviehdotuksessa	-
Mikromuovit	Laitoksissa tulevasta ja lähtevästä jätevedestä sekä lietteestä (AVL > 10 000)	samat vaatimukset kuin direktiiviehdotuksessa	-
Haitta-aineet	80 % poisto (AVL > 100 000 ⁸ + riskialueet, joiden AVL 10 000–100 000)	80 % poisto (AVL > 150 000 ⁹ + riskialueet, joiden AVL > 35 000)	-

¹Muunnettuna seuraavilla: 98/15/EY, 1882/2003, 1137/2008, 2013/64/EU.

²40 % tietyissä tapauksissa, jotka on mainittu 4 artiklan 2 kohdassa.

³Mitattava joko COD tai orgaanisen hiilen kokonaismäärä.

⁴Rehevöitymiselle alttiilla alueilla, jotka on määritelty 7 artiklan 2 kohdan mukaisesti.

⁵Vaatimus on valinnainen ja voimassa jo 2030.

⁶Voidaan mitata molekyyliabsorptiospektroskopian sijaan digitaalisella onlinesensorilla. Vaatimuksena tietyillä puhdistamoilla sekä typpi että fosfori.

⁷Lähtevän veden lämpötilan ollessa alle 12°C päivän typenpoistoa ei huomioida laskennassa.

⁸Vaatimus on voimassa jo vuonna 2035.

⁹Vaatimus on voimassa 10 vuotta direktiivin voimaantulon jälkeen.

3 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on koota tietoa suomeksi viime vuosina tehdyistä jätevesien haitta-aineita koskevista selvityksistä. Katsauksessa keskitytään tutkimuksiin täyden mittakaavan laitoksista, ja tuloksiin, jotka koskevat direktiiviehdotuksessa mainittuja yhdisteitä. Katsauksen ulkopuolelle on jätetty pilotti- ja laboratoriomittakaavan tutkimukset sekä tutkimukset, joissa on tutkittu direktiiviehdotuksen haitta-ainelistan ulkopuolisia yhdisteitä. Katsauksen tavoitteena on auttaa arvioimaan mitkä haitta-aineiden poistotekniikat ovat valmiusasteeltaan riittävän pitkällä täyden mittakaavan sovelluksia varten, haitta-aineiden poiston toteutettavuutta näillä tekniikoilla sekä haitta-aineiden poiston vaikutuksia suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Vaikka täyden mittakaavan vertailukohtia on Euroopassa jo jonkin verran, ei vertailututkimuksia ole kovin paljoa (Rizzo ym., 2019). Siksi sopivimman ja kustannustehokkaimman tekniikan valinta vaatii lisätutkimusta.

3.1 Haitta-aineiden poistomenetelmät

Otsonointi ja aktiivihiili ovat toimiviksi havaittuja ja täydessä mittakaavassa käytettyjä menetelmiä haitta-aineiden poistoon. Jätevedenpuhdistamot (40 kpl), joilla tiedetään olevan käytössä haitta-aineidenpoistoprosessi, tai jonne sellainen suunnitteilla (42 kpl), on listattu liitteessä 2. Sveitsissä ja Saksassa on runsaasti täyden mittakaavan esimerkkejä näistä prosesseista (CWPharma, 2020; micropoll.ch). Esimerkkejä löytyy myös Kanadasta (Kienle ym., 2022), Ruotsista Linköpingistä (Kharel ym., 2020) ja Tanskasta Kalundborgista (CWPharma, 2020). Joillain jätevedenpuhdistamoilla on käytössä jopa yhdistelmäkasittely otsonointi + aktiivihiili. (Kienle ym., 2022; CWPharma, 2020). CWPharma-projektin loppuraportissa on listattu jätevedenpuhdistamoja, joilla on käytössä tai jonne suunnitellaan tai ollaan rakentamassa otsonointia tai aktiivihiilikäsittelyä. Yhteensä loppuraportissa listataan otsonoinnin olevan käytössä 12 jätevedenpuhdistamolla (ja 15 suunnitteilla tai rakenteilla), ja rakeisen aktiivihiilikäsittelyn (granular activated carbon, GAC) olevan käytössä 6 jätevedenpuhdistamolla (ja 14 suunnitteilla tai rakenteilla) sekä jauhemaisen aktiivihiilikäsittelyn (powdered activated carbon, PAC) olevan käytössä 20 jätevedenpuhdistamolla (ja 12 suunnitteilla tai rakenteilla). Lisäksi kahdella jätevedenpuhdistamolla on käytössä sekä otsonointi että aktiivihiilikäsittely ja yhdelle suunnitteilla tai rakenteilla. Yhdelle jätevedenpuhdistamolla on lisäksi suunnitteilla tai rakenteilla sekä PAC- että GAC-käsittelyt.

Kappale 3.1.1 käsittelee otsonointitekniikoita, kappale 3.1.2 aktiivihiilitekniikoita ja kappale 3.1.3 muita tekniikoita haitta-aineidenpoistoon jätevesistä. Esimerkiksi joillain kalvosuodatustekniikoilla voidaan poistaa haitta-aineita tehokkaasti, mutta niitä käytetään korkeiden kustannusten vuoksi harvemmin (Pistocchi ym., 2022). Prosessivalinta on tehtävä tapauskohtaisesti, ks. kappale 3.1.4.

3.1.1 Otsonointi

Otsonoinnissa hapetetaan haitta-aineita ja muuta liuennutta orgaanista ainesta veteen annosteltavan otsonin avulla. Otsoni muodostaa veden kanssa reagoidessaan hydroksyyliiradikaaleja, jotka reagoivat hapettaen haitta-aineita ja muuta liuennutta orgaanista ainesta. Poistettavat yhdisteet reagoivat osittain myös suoraan otsonin kanssa.

Otsonointiprosessi sijoittuu tyypillisesti jätevedenpuhdistusprosessin loppuun jälkiselkeytyksen tai kiintoainetta poistavan jälkikäsittelyn jälkeen. Otsonointiprosessi koostuu otsonigeneraattorista, otsonin syötöstä, otsonin kontaktialtaasta ja jälkikäsittelystä. Lisäksi otsonijäämät tulee muuntaa hapeksi otsonin hajottajalla (an offgas-treatment). Otsoni valmistetaan paikan päällä tyypillisesti nestemäisestä hapesta, joka tehdään muualla ja kuljetetaan jätevedenpuhdistamolle. Joissain tapauksissa otsoni valmistetaan myös suoraan ilmasta. (CWPharma, 2020)

Otsoniannoksesta suurin osa kuluu jäteveden sisältämän liuenneen orgaanisen hiilen (dissolved organic carbon (DOC)) hapetukseen eikä reaktioihin spesifisesti haitta-aineiden kanssa. Siksi haitta-aineiden poistoon tarvittavia otsoniannoksia vertailtaessa kannatta suhteuttaa otsoniannos käsiteltävän veden DOC-pitoisuuteen eli vertailla spesifistä otsoniannosta (Kharel ym., 2020, CWPharma, 2020). Tyypillinen spesifinen otsoniannos haitta-aineiden poistossa jätevedestä vaihtelee tyypillisesti välillä 0,3–0,9 mgO₃/mgDOC (CWPharma, 2020). Miehe ym. raportoivat annoksen olevan kostealla säällä 0,5 ja kuivalla säällä 0,7 mg/l, suurimmaksi käytetyksi pitoisuudeksi he raportoivat 1,2 mg/l/mgDOC (Miehe ym., 2017). Annoksen määrittelyssä tulee lisäksi huomioida, että otsonia kuluu nitriitin hapettamiseen nitraatiksi: 3,43 mgO₃/mg-N (CWPharma, 2020). Korkeat kiintoainepitoisuudet saattavat myös nostaa tarvittavaa otsoniannosta, mutta yleensä veden esikäsittely ei ole tarpeen ennen otsonointia (CWPharma, 2020).

Tyypillinen kontaktaika reaktorissa on 15–30 minuuttia (CWPharma, 2020). Kontaktialtaan tulisi olla vähintään viisi metriä syvä, jotta varmistetaan otsonin tehokas liukeneminen veteen (Miehe ym., 2017).

Kohonneet bromidipitoisuudet (> 0,15 mg/l) voivat aiheuttaa bromaatin muodostumisen riskin riittävän suurilla otsoniannoksilla (CWPharma, 2020). Kuitenkin esimerkiksi meren rannalla sijaitsevassa Kalundborgin jätevedenpuhdistamolla Tanskassa otsonoinnin on todettu vähentävän ekotoksisuutta korkeasta bromidipitoisuudesta (1,7–2,7 mg/l) ja korkeasta spesifisestä otsoniannoksesta (0,8 mgO₃/mgDOC) huolimatta (CWPharma, 2020b). Bromidia voi päätyä jätevedenpuhdistamoille esimerkiksi kunnallisen jätteen polttolaitoksista, meriveden päätyessä viemäristöön, ja kemian teollisuudesta. Bromaatti voidaan pelkistää takaisin bromidiksi anoksisissa olosuhteissa esimerkiksi denitrifikaatiossa (CWPharma, 2020).

Otsonoinnissa voi muodostua haitallisia sivutuotteita ja muunnosyhdisteitä (by products, transformation products), jotka saadaan poistettua jälkikäsittelyllä (Baresel ym., 2019; Kienle ym., 2022). Siksi Sveitsissä vaaditaan otsonoinnin jälkeen jälkikäsittely, esimerkiksi hiekkasuodatus tai

kantoaine prosessi, jossa reaktorissa liikkuvien kantoaineiden pinnalla on biofilmi (Moving bed biofilm reactor, MBBR). Jälkikäsittely hajottaa näitä yhdisteitä biologisesti, ja pienentää käsitellyn veden toksisuutta (Kienle ym., 2022).

Esimerkiksi Ruotsissa Linköpingin jätevedenpuhdistamon prosessissa otsonoinnin jälkeen on MBBR (Kharel ym., 2020). Linköpingissä ei ole lainsäädännöllistä velvoitetta haitta-aineiden poistoon. Kun koko mittakaavan otsonointia suunniteltiin, tehtiin pilot-mittakaavan kokeita (Baresel ym., 2016).

3.1.2 Aktiivihiihi

Haitta-aineiden poisto jätevedestä aktiivihiihikäsittelyn avulla perustuu haitta-aineiden adsorptioon aktiivihiihen pinnalle, ja lopulta haitta-aineiden hävittämiseen aktiivihiihen regeneroinnin aikana (Baresel ym., 2017c). Aktiivihiihi on joko jauhemaista (PAC) tai rakeista (GAC).

Jauhemaista aktiivihiihtä voidaan annostella joko suoraan aktiivilieteprosessiin, juuri ennen suodattusta, tai erillisessä kontaktialtaassa eli niin kutsutussa Ulmerin prosessissa (CWPharma, 2020). Aktiivihiihen koko adsorptiokapasiteetti saadaan hyödynnettyä vain riittävän pitkällä yli 24 tuntisella kontaktiajalla, joka saavutetaan kierrättämällä aktiivihiihtä sisältävää lietettä prosessissa. Kaikissa prosessijärjestelyvaihtoehdoissa jauhemainen aktiivihiihi ja siihen adsorboituneet haitta-aineet päätyvät ylijäämälietteen poiston vuoksi kuivattuun lietteeseen, mikä edellyttää lietteen polttamista tai voi ainakin rajoittaa lietteen käyttöä (CWPharma, 2020; VVY, 2016). Suomessa lietteet kuitenkin pääosin mädätetään tai kompostoidaan ja hyödynnetään maataloudessa tai viherrakentamisessa, mutta lietettä poltetaan myös yhdessä erillispolttolaitoksessa Rovaniemellä (VVY, 2021b). Lisäksi Suomessa poltetaan lietteitä muutamissa polttolaitoksissa muiden polttoaineiden, jätteiden ja lietejakeiden kanssa (VVY, 2019). Koska lietteen seassa oleva aktiivihiihi ja sen absorboimat haitta-aineet rajoittavat lietteen käyttöä, käsitellään tässä kappaleessa tarkemmin vain GAC-käsittelyä. Suomessa jauhemaista aktiivihiihtä on tutkittu ainakin osana EPIC-hanketta laboratorio- ja pilot-mittakaavassa (Mänttari, 2020), Helsingin Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla CWPharma-hankkeessa pilot-mittakaavassa (HSY, 2021a, 2021b, 2021c) ja Vihdin Nummelan puhdistamolla pilot-mittakaavassa (Vieno, 2016).

Suodatus rakeisella aktiivihiihilellä eli GAC:lla on teknisesti hyvin samankaltainen kuin hiekkasuodatus (Böhler ym., 2020). GAC-suodatin sijoittuu jätevedenpuhdistusprosessissa prosessin loppuun jälkiselkeytyksen (CWPharma, 2020) tai esimerkiksi MBR:n jälkeen (Benstoem ym., 2017). Suodattimia on tyypillisesti muutama rinnakkain, jotta huolto ja suodatinmateriaalin vaihto tai muuttuvat virtaamaolosuhteet aiheuttaisivat mahdollisimman vähän häiriötä. Korkeilla kiintoainepitoisuuksilla voi olla hyödyllistä esikäsitellä vesi esimerkiksi suodattamalla se hiekkasuodatuksen läpi ennen veden johtamista GAC-suodattimelle (CWPharma, 2020; MORPHEUS, 2017–2019). Kiintoainetta voidaan poistaa myös esimerkiksi flotaatiolla. GACia suositellaan käytettävän vedelle, jonka kiintoainepitoisuus on alle 10–20 mg/l. GACia voidaan tyypillisen suodatintyyppin sijaan käyttää myös moving bed-

reaktorissa, mutta tästä ei ole niin paljoa kokemusta kuin tyypillisestä GAC-suodatuksesta. Sveitsiin on suunnitteilla useita moving bed GAC-laitoksia (CWPharma, 2020; MORPHEUS, 2017–2019).

GAC-suodattimen suunnittelun ja käytön tärkeimmät muuttujat ovat tyhjän pedin kontaktiaika (empty bed contact time, EBCT) ja käsiteltyt petitilavuudet (bed volumes, BV). EBCT kuvastaa aikaa, jonka aikana tietty veden virtaama Q (m^3/min) kulkee GAC-suodattimen läpi (kaava 1). BV taas kuvastaa käsitellyn vesimäärän suhdetta GAC-materiaalin tilavuuteen nähden (kaava 2). (CWPharma, 2020)

$$EBCT = \frac{h_{GAC} A_{suodatin}}{Q} = \frac{V_{GAC}}{Q} \quad (1)$$

$$BV = \frac{V_{käsitelty}}{V_{GAC}} \quad (2)$$

, missä

$EBCT$ = tyhjän pedin kontaktiaika, min

Q = GAC – suodattimen läpi kulkevan veden määrä, m^3/min

h_{GAC} = GAC – suodatinpedin korkeus, m

$A_{suodatin}$ = GAC – suodattimen pinta – ala, m^2

BV = käsiteltyjen petitilavuuksien lukumäärä

$V_{käsitelty}$ = GAC – suodattimella käsitelty vesimäärä, m^3

V_{GAC} = GAC – suodatinpedin tilavuus, m^3

EBTC tulisi olla vähintään 20 minuuttia myös suurten virtaamien aikana eli sateisena aikana ja lumien sulaessa sekä silloin, kun yhtä GAC-suodatinta huolletaan (Böhler ym., 2020).

GAC-suodatinmateriaali pitää Sveitsin kokemusten perusteella vaihtaa, kun sillä on käsitelty vettä 20 000–30 000 petitilavuutta (BV) vastaava määrä. Siihen asti sen avulla voidaan poistaa koko jätevedenpuhdistamon prosessissa 80 % indikaattoriyhdisteistä (Böhler ym., 2020; CWPharma, 2020). MORPHEUS-projektissa ehdotetaan hiilen vaihtoväliksi paljon tiheämpää: vain 7 000–15 000 petitilavuutta (MORPHEUS, 2017–2019).

Uudelleen aktivoidun ja täysin uuden GACin poistoteho ja vaihtoväli ovat suunnilleen samat, mutta uudelleen aktivoitu GAC on halvempaa ja sen hiilijalanjälki on pienempi kuin täysin uuden GACin

(Böhler ym., 2020; Benstoem ym., 2017; CWPharma, 2020). Eri materiaaleista valmistetun aktiivihielten ympäristövaikutuksia on tutkittu myös Suomessa (Vilén, 2021).

Rakeisen aktiivihielen on ajateltu toimivan biologisena suodattimena (biologically active filter, BAF), jos käsiteltävän veden viipymäaika on yli 10 minuuttia (Baresel ym., 2017b). Tämä kannattaa huomioida GAC-laatua valitessa, ja harkita laboratoriomittakaavassa tehtävien kolumnitestien lisäksi myös pilottimittakaavan tutkimuksia, joilla voidaan arvioida haitta-aineiden poistotehon lisäksi biologisen prosessin vaikutusta tulokseen ja suodattimen ajosekvensseihin (CWPharma, 2020). Myös esimerkiksi Benstoem ym. (2017) suosittelevat pilottitestien tekemistä luotettavan prosessisuunnitelman tueksi.

GAC-suodatinta voidaan pestä vesi-ilma-seoksella tai vain vedellä ja tarvittaessa lisäksi ilmalla. Pesuvesi johdetaan takaisin jätevedenkäsittelyprosessiin esimerkiksi ilmastuksen alkuun. Pesuveden määrä on noin 5–15 % suodattimelle tulevan veden määrästä. Hiekkasuodatin voidaan muuttaa aktiivihielisuodattimeksi vaihtamalla suodatinmateriaali ja säätämällä pesuohjelman sekvenssejä (MORPHEUS, 2017–2019; Benstoem ym., 2017).

Aktiivihielen regenerointia tehdään ainakin pohjois-Italiassa (micropoll.ch) sekä hankkeessa mukana olevien puhdistamojen tietojen mukaan myös Saksassa ja Belgiassa.

3.1.3 Muut haitta-aineiden poistoon soveltuvat menetelmät

Otsonoinnin ja aktiivihielikäsittelyn (GAC tai PAC) lisäksi myös muita prosesseja haitta-aineiden poistoon on tutkittu, mutta niillä on direktiiviesityksen edellyttämästä käsittelytehosta niukasti täyden mittakaavan referenssejä tai menetelmien sovellukseen liittyä haasteita puhdistamo-olosuhteissa (VVY, 2016).

Käänteisosmoosin tiedetään poistavan tehokkaasti haitta-aineita, mutta sitä ei ole tiedettävästi käytössä jätevedenpuhdistamoilla haitta-aineidenpoistotarkoituksessa. Käänteisosmoosin haasteina on mm. veden mahdollinen esikäsittelytarve sekä muodostuneen konsentraatin (määrä tyypillisesti noin 10–25 % käsitellyn veden määrästä) jatkokäsittely tai loppusijoitus. Käänteisosmoosia käytetään maailmalla nykyisin mm. suolan erottamisen merivedestä ja käsittelyn jäteveden viimeistelyyn uusiokäyttöä varten. Käänteisosmoosia on tutkittu LUT-yliopistossa tehdyssä väitöstutkimuksessa (Arola, 2020).

Haitta-aineita voidaan poistaa tehokkaasti myös edistyneillä hapetusprosesseilla (advanced oxidation process, AOP) kuten yhdistetyllä UV-valon ja hapetuskemikaalin käsittelyllä tai Fenton-prosessilla. Näistä prosesseista ei kuitenkaan ole tiedossa täyden mittakaavan sovelluksia kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla haitta-aineidenpoistotarkoituksessa. (VVY, 2016).

Lisäksi mainitaan muutamia haitta-aineidenpoistoltaan otsonia ja aktiivihieltä vastaavia tekniikoita, joiden kypsyttä kuvataan alhaiseksi: ferraatti, sähkökemiallinen hapetus, maaperäimeytys,

entsyymitoimintaan perustuva suodatus (VVY, 2016). Sähkökemiallisista hapetusprosesseista on tutkittu Suomessa ainakin koronapurkausmenetelmää ja elektrodialyysimenetelmää, joita tutkittiin laboratorio- ja pilot-mittakaavassa jo aiemmin mainitussa LUT-yliopiston väitöskirjassa (Arola, 2020). Koronapurkausmenetelmää on tutkittu myös EPIC-hankkeessa, jossa tutkittiin haitta-aineiden poistoa laboratorio- ja pilottimittakaavassa sairaalajätevedestä (Mänttari ym., 2019).

Otsonia ja aktiivihiiltä heikommin haitta-aineita poistaviksi tekniikoiksi listataan seuraavat: pitkän lieteiän aktiivilieteprosessi yhdistettynä tertiäärikäsittelyyn; kalvobioreaktori (MBR); jälkilammikointi ja pintavalutuskentät; nanosuodatus; UV-valo (VVY, 2016). Haitta-aineiden poistoa MBR-prosessissa on tutkittu Suomessa Oulun jätevedenpuhdistamolla (Leiviskä & Risteelä, 2022) ja LUT-yliopistossa (Arola, 2020). MBR-prosessissa on tyypillisesti käytössä mikro- tai ultrasuodatuskalvot. UV-valosta mainittakoon, että sen tiedetään poistavan joitakin haitta-aineita, mutta tarvittava annos on moninkertainen verrattuna desinfiointitarkoituksessa käytettyihin UV-sovelluksiin (VVY, 2016). Haitta-aineiden poistumista MBR-prosessissa on tutkittu laboratorio- ja pilot-mittakaavassa jo aiemmin mainitussa LUT-yliopiston väitöskirjassa (Arola, 2020), pilot-mittakaavassa Vihdin Nummelan jätevedenpuhdistamolla (Vieno, 2016) sekä pilot-mittakaavassa Tukholman Hammarby Sjöstadsverkin tutkimusasemalla (Närhi ym., 2021). Ultra- ja nanosuodatusta on tutkittu myös jo mainitussa EPIC-hankkeessa (Mänttari ym., 2019).

3.1.4 Prosessin valintaan vaikuttavat asiat

Prosessin valinta on monimutkainen tehtävä, jossa tulee huomioida useita näkökulmia ja puhdistamokohtaisia lähtötietoja (Pistocchi ym., 2022; Baresel ym., 2019). Sopivimman ja kustannustehokaimman haitta-aineidenpoistotekniikan valinta on vaikeaa myös sen vuoksi, että vertailututkimuksia on vähän (Rizzo ym., 2019). Jos tavoitteena on poistaa mahdollisimman laajasti erilaisia haitta-aineita, kannattaa yhdistellä eri tekniikoita (Baresel ym., 2019). Baresel ym. (2019) kehottavat myös huomioimaan prosessin tehostuspotentiaalın prosessia valitessa. He tarkoittavat tällä kustannusten ja ympäristövaikutusten pienentämistä esimerkiksi annostusta optimoimalla, valmistamalla aktiivihiiltä jätejakeista, tai kehittämällä kalvosuodatustekniikoita (Baresel ym., 2019).

Puhdistamokohtaiset ominaisuudet ja tulevan veden laatu vaikuttavat prosessivalintaan, sillä tavallisimpien haitta-aineiden poistoon käytettyjen prosessien kustannukset, energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat lähellä toisiaan (Pistocchi ym., 2022; Wunderlin ym., 2017; Kienle ym., 2022). Sekä otsonointi että GAC poistavat tehokkaasti haitta-aineita ja niiden ekotoksikologista vaikutusta (Kienle ym., 2022). Prosessien välillä on kuitenkin eroja. Esimerkiksi Baresel ym. (2017c) ovat vertailleet eri prosesseja useasta näkökulmasta: puhdistusteho, kustannukset ja ympäristövaikutus. Aktiivihiilikäsittelyn (GAC tai PAC) on raportoitu poistavaan jätevedestä tyypeä, fosforia ja CODia sekä BODia otsonointia tehokkaammin (Baresel ym., 2017a, Baresel ym., 2017b). GACin on raportoitu olevan myös tehokkaampi per- ja polyfluorattujen alkyyl-yhdisteiden eli PFAS-yhdisteiden poistossa (Baresel ym., 2019; Baresel ym., 2017b). Baresel ym. (2019) kuvaavat otsonin poistavan

PFAS-yhdisteitä jonkin verran ja GAC-käsittelyn poistavan niitä erittäin hyvin. Direktiivin muutosehdotuksessa (EU, 2023) listattiin mitattaviksi haitta-aineiksi myös PFOS, joka kuuluu PFAS-yhdisteisiin. PFAS-yhdisteistä on lisätietoa liitteessä 3. Otsonoinnin taas on raportoitu olevan käyttö- ja kokonaiskustannuksiltaan GAC-käsittelyä halvempi ja poistavan esimerkiksi jätevesien estrogeenista vaikutusta tehokkaammin kuin rakeisen aktiivihiehen (Baresel ym., 2017b, Baresel ym., 2019).

Sveitsissä laki edellyttää jäteveden laadun sopivuuden tutkimista otsonointia varten (Kienle ym., 2022). Veden laadun sopivuus otsonointia varten täytyy tutkia määritellyllä tavalla (Wunderlin ym., 2017). Otsonoinnin jälkeen tarvitaan biologinen jälkikäsittely (Baresel ym., 2019; Kienle ym., 2022). Siksi esimerkiksi jo olemassa oleva jälkikäsittelyksi sopiva jälkisuodatus voi vaikuttaa prosessivalintaan.

Erityisesti Suomessa prosessin valintaan voivat vaikuttaa lisäksi sijainti luolassa, jolloin täytyy arvioida, onko puhtaan hapen käyttö turvallista (VVY, 2016). Otsonia voidaan toki valmistaa myös suoraan ilmasta, jolloin prosessi vaatii enemmän energiaa, mutta tällöin ei tarvitse valmistaa ja kuljettaa nestemäistä happea (Pistocchi ym., 2022). GAC-prosessin suhteen ei ole VVY:n raportin mukaan tiedossa erityishaasteita Suomen olosuhteissa (VVY, 2016).

EU:n rahoittamassa CWPharma-hankkeessa tehtiin ohjeistus haitta-aineiden poistamiseksi jätevedestä (CWPharma, 2020). Tuossa ohjeistuksessa kehoitetaan etenemään neljässä vaiheessa:

1) Jätevedenpuhdistamon arviointi

- a. Haitta-aineiden poistotekniikan tavoitteen määrittely
- b. Veden laatuselvitys. Käsiteltävän veden DOC-, nitriitti-, bromidi- ja kiintoainepitoisuus (TSS).
- c. Mahdollisten rajoitusten tunnistaminen. Esimerkiksi Suomen kohdalla lietteen tyyppillinen jatkokäsittely ja -käyttö estävät jauhemaisen aktiivihiehen hyödyntämisen haitta-aineiden poistossa. Bromiatin muodostuminen otsonoinnin aikana voi olla riski korkeilla bromidipitoisuuksilla, ja nitriitti taas voi kasvattaa tarvittavaa otsoniannosta. Koholla oleva DOC-pitoisuus voi niin ikään kasvattaa tarvittavaa otsoni- tai aktiivihiehiannosta. Korkean kiintoainepitoisuuden vuoksi GAC-suodattimia voidaan joutua huuhtelemaan useammin.

2) Toteutettavuustutkimus. Erilaisten haitta-aineiden poistotekniikoiden käytännön toteutettavuus ja kustannukset.

- a. Puhdistustavoite, ja vaikutukset vastaanottavaan vesistöön, uimavesiin sekä juomaveteen.

30.11.2023

HH

- b. Jätevedenpuhdistamon tilanne: liittäjät, kuormitus, nykyisen prosessin kuvaus, virtaamat, oleellisten vedenlaatumuuttujien pitoisuudet
- c. Haitta-aineiden pitoisuuden selvittäminen. Suositellaan ottamaan vähintään kolme näytettä lähtevästä jätevedestä kuivien olosuhteiden aikana. Lisäksi voidaan tutkia esimerkiksi biologiseen vaiheeseen tulevaa jätevettä.
- d. Kuvaus vaihtoehdoista haitta-aineidenpoistotekniikoiksi. Vertailu olemassa oleviin jätevedenpuhdistamoihin mieluiten samasta maasta tai samalta alueelta.
- e. Esisuunnitelma haitta-aineidenpoistotekniikan sijoittamiseksi puhdistamon nykyiseen prosessiin. Olemassa olevien rakenteiden potentiaalin ja tilantarpeen arviointi. Vesienjohtamisen suunnittelu: mitä tehdään isojen virtaamien aikana, ohitetaanko haitta-aineiden poistovaihe vai hyväksytäänkö alentunut poisto. Anosten suunnittelu (PAC, O₃), GAC:in vaihtoväli. Huomioi haitta-aineidenpoistotekniikoiden rajoitukset ja lisähyödyt.
- f. Investointi- ja käyttökustannusten arviointi
- g. Kokonaisarvio ja prosessin valinta. Prosessin valinnassa kannattaa huomioida kustannusten lisäksi myös muita asioita kuten tekniikan toimivuus, tilavaatimukset, hiilijalanjälki, huoltotarve, henkilökunnan koulutustarve, prosessin käyttövarmuus ja ekotoksikologiset arviot.

3) Yksityiskohtainen suunnittelu

- a. Laboratoriotestit
- b. Pilotointi jätevedenpuhdistamolla
- c. Lisäanalyysit, prosessikontrollin kasvava tarve

4) Olemassa olevien prosessien optimointi

- a. Energian ja nestemäisen hapen tarpeen tarkastus
- b. Bromidipitoisuuden tarkkailu
- c. Haitta-aineiden pitoisuuksien vaihtelu, muutokset UV-absorbanssissa (UVA_{254nm})
- d. Jauhemaisen aktiivihilen poisto käsitellystä jätevedestä

Baresel ym. (2017c) antavat seuraavat suositukset prosessin valintaan:

- Jätevedenpuhdistamoille, joissa on MBR-prosessi, tulisi valita biosuodin, jossa on rakeinen aktiivihiihi suodatinmateriaalina: BAF (GAC).
- Jätevedenpuhdistamoille, joilla on aktiivilieteprosessi ja erittäin hyvä ravinteiden ja hiilen poisto sekä pieni kiintoainepitoisuus, tulisi valita otsonoinnin ja biosuotimen yhdistelmä: O₃-BAF (GAC).
- Jätevedenpuhdistamoille, joilla on aktiivilieteprosessi ja heikko ravinteiden ja hiilen poisto sekä suuri kiintoainepitoisuus, tulisi valita prosessiin integroitu otsonointi, tai ultrasuodatus yhdistettynä biosuotimeen: UF-BAF (GAC).
- Näiden puhdistamojen tulisi kuitenkin ensin parantaa muuta puhdistustulosta ja keskittyä haitta-aineiden poistoon vasta kun muu prosessi toimii paremmin. Kun halutaan tehostaa ravinteiden ja hiilen poistoa sekä poistaa haitta-aineita, MBR-prosessi voi olla hyvä vaihtoehto (Baresel ym., 2017c).

3.2 Suomessa tehdyt haitta-ainetutkimukset jätevesistä ja ympäristöstä

3.2.1 Jätevedet

Suomessa ei tiedettävästi toistaiseksi ole erillistä haitta-aineiden poistoon tarkoitettua prosessivaihetta millään jätevedenpuhdistamolla koko laitoksen täydessä mittakaavassa.

Suomessa on kuitenkin tutkittu haitta-aineiden pitoisuuksia ja poistumista jätevedenpuhdistamoilla jonkin verran. VVY on julkaissut kaksi laajaa tutkimusta useilta jätevedenpuhdistamoilta vuosina 2014 ja 2021 (VVY, 2014; 2021). SYKE on tutkinut haitta-aineita neljällä jätevedenpuhdistamolla EPIC-hankkeessa vuonna 2019 (SYKE, 2019). Lisäksi Kruglova ym. (2014) tutkivat haitta-aineiden poistumista yhdellä puhdistamolla ja Äystö ym. (2020) tutkivat haitta-aineiden määrää käsitellyssä jätevedessä kahdella jätevedenpuhdistamolla. Näissä tutkimuksissa raportoidut haitta-aineiden keskimääräiset pitoisuudet ja poistoprosentit on koottu taulukkoon 3 direktiiviehdotuksessa listattujen haitta-aineiden osalta.

Vuonna 2021 julkaistussa VVY:n tutkimuksessa tutkittiin 69:tta yhdistettä 18:lla suomalaisella jätevedenpuhdistamolla (VVY, 2021). Raportin johtopäätöksenä todetaan, että suurin osa tutkituista yhdisteistä poistui jätevedenpuhdistusprosessissa niin hyvin, että riski vesistölle on vähäinen. Tutkimus sisälsi direktiiviehdotuksen 12:sta yhdisteestä neljä: diklofenaakin, karbamatsepiinin, klaritromysiinin ja venlafaksiinin. Näiden yhdisteiden raportoidaan poistuvan prosesseissa huonosti puhdistamojen keskimääräisen poistotehon ollen 11–24 % yhdisteestä riippuen. Raportissa kuitenkin tunnistettiin yhdisteitä, jotka aiheuttavat Suomessa potentiaalisesti riskin vesistölle, ja näistä venlafaksiini ja diklofenaakki ovat direktiiviehdotuksen listalla. Näytteet kerättiin tässä tutkimuksessa 24 tunnin kokoomanäytteinä virtaama- tai aikapainotteisesti pääosin automaattinäytteenottimella, yksi näyte käsikokoomana. Tulevan veden näyte otettiin viimeistään välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen.

Vuonna 2014 julkaistussa VVY:n tutkimuksessa tutkittiin 42:ää yhdistettä 64:lla suomalaisella jätevedenpuhdistamolla (VVY, 2014). Tutkimus sisälsi direktiiviehdotuksen yhdisteistä kaksi: diklofenaakin ja karbamatsepiinin. Näitä yhdisteitä löytyi myös käsitellystä jätevedestä. Myös tässä tutkimuksessa näiden yhdisteiden raportoidaan poistuvan prosesseissa huonosti: puhdistamojen keskimääräisen poistoteho oli vain 5 % diklofenaakille ja karbamatsepiinille negatiivinen; -5 %. Tässä tutkimuksessa näytteet kerättiin pääosin 24 tunnin kokoomanäytteinä joko aika- tai virtaamaperusteisesti. Yksi näyte otettiin 48 tunnin kokoomanäytteenä ja muutamia kertanäytteinä. Tulevan veden näyte otettiin välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen.

SYKEN EPIC-projektissa tutkittiin 25:ta yhdistettä kuudelta jätevedenpuhdistamolta (Mänttari ym., 2019; Äystö ym., 2020a). Direktiiviehdotuksen yhdisteistä tutkimukseen sisältyi kuusi yhdistettä: diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, karbamatsepiini, metoprololi, sitalopraami ja venlafaksiini. Näiden keskimääräiset poistotehot olivat yhdisteestä riippuen välillä -7–39 %.

Kruglova ym. (2014) tutkivat kolmea yhdistettä jätevedenpuhdistusprosessin aikana yhdellä jätevedenpuhdistamolla. Yhdisteistä kaksi oli direktiiviehdotuksen yhdisteitä: diklofenaakki ja karbamatsepiini. Tutkimus keskittyi yhdisteiden hajoamiseen aktiivilieteprosessissa, kun lämpötila oli alle 12 °C, ja oli pääosin tehty laboratoriomittakaavassa. Tutkimuksessa kuitenkin mitattiin haitta-ainepitoisuudet täyden mittakaavan jätevedenpuhdistamolle tulevasta ja sieltä lähtevästä jätevedestä. Pitoisuuserot tulevan ja lähtevän jäteveden välillä raportoitiin olevan pienemmät kuin mitä mittausvirhe oli. Diklofenaakki ja karbamatsepiinin eivät kuitenkaan poistuneet jätevedenpuhdistusprosessissa juurikaan.

Äystö ym. (2020b) tutkivat lääkkeitä Vantaanjoen valuma-alueella useista näytepisteistä ja lisäksi Helsingin Viikinmäen ja Hyvinkään Kaltevan jätevedenpuhdistamoilta lähtevästä jätevedestä. Jätevesistä analysoitiin 67–69 lääkettä, joista kahdeksan oli direktiiviehdotuksen listalla: diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, kandesartaani, klaritromysiini, metoprololi, sitalopraami ja venlafaksiini.

Lisäksi eteläisellä Saimaalla tutkittiin haitta-aineita seitsemällä jätevedenpuhdistamolla 2020–2022 Lappeenrannan Yliopiston UHASA-hankkeessa (Viitala & Mänttari, 2023). Tutkimuksessa oli mukana seitsemän yhdistettä direktiiviehdotuksen 12:sta yhdisteestä. Tutkimuksen tuloksena todetaan, että heikosti (< 50 %) jätevedestä poistuvat diklofenaakki, karbamatsepiini, sitalopraami ja venlafaksiini. Lisäksi direktiiviehdotuksen yhdisteistä tutkimukseen sisältyivät metoprololi ja klaritromysiini. Jätevesinäytteet kerättiin aikapainotteisesti 24 tunnin kokoomanäytteinä. Tutkimuksesta on odotettavissa raportti ja tieteellisiä julkaisuja loppuvuodesta 2023.

Lisäksi Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja LUT-yliopisto tutkivat jätevesien haitallisten aineiden vähentämistä Vemo-hankkeessa vuosina 2020–2022 Mikkeliissä (XAMK, 2022). Siinä tutkittiin haitta-aineita neljästä eri päästölähteestä ja lisäksi jätevedenpuhdistamolle tulevasta jätevedestä. Tutkittuja yhdisteitä oli yhteensä 58 ja niistä 5 oli direktiiviehdotuksen listalla: diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, karbamatsepiini, metoprololi ja sitalopraami. Näytteet otettiin vuorokauden kokoomanäytteinä aikapainotteisesti.

30.11.2023

HH

Taulukko 3. Aiemmissä suomalaisissa tutkimuksissa raportoidut pitoisuudet ja poistotehot mukana olleilla jätevedenpuhdistamoilla keskimäärin. Harmaalla on merkitty sellaiset kohdat, joita ei käsitelty taulukoissa näkyvissä tutkimuksissa.

Tuleva jätevesi

Haitta-aine	Yksikkö	VVY, 2014 ¹	VVY, 2021 ²	Mänttari ym., 2019 ³	Kruglova ym., 2014 ⁴	XAMK, 2022 ⁴
diklofenaakki	µg/l	1,02	1,82 (min. 0,63)	1,0	1,0 (± 0,4)	1,3; < 0,10
hydroklorotiatsidi	µg/l			2,4		2,8; 1,7
karbamatsepiini	µg/l	0,29	0,35 (min. <0,05)	1,1	0,4 (± 0,1)	0,58; < 0,10
klaritromysiini	µg/l		0,16 (min. <0,01)			
metoprololi	µg/l			1,1		0,97; < 0,10
sitalopraami	µg/l			0,26		< 0,10; < 0,10
venlafaksiini	µg/l		0,79 (min. 0,36)			

¹13 jätevedenpuhdistamolla, ²17 isolla jätevedenpuhdistamolla ³6 jätevedenpuhdistamolla, ⁴1 jätevedenpuhdistamolla

Lähtevä jätevesi

Haitta-aine	Yksikkö	VVY, 2014 ¹	VVY, 2021 ²	Mänttari ym., 2019 ³	Kruglova ym., 2014 ⁴	Äystö ym., 2020b ⁵
diklofenaakki	µg/l	0,90 (min. 0,12)	1,5 (min. 0,84)	0,96	≈1,0 (± 0,4)	3,6 (2,2–6,8)
hydroklorotiatsidi	µg/l			3,0		< 0,11–14
kandesartaani	µg/l					< 0,011
karbamatsepiini	µg/l	0,60 (min. 0,02)	0,34 (min. <0,025)	1,2	≈0,4 (± 0,1)	0,15–0,39
klaritromysiini	µg/l		0,091 (min. 0,008)			< 0,016–0,28
metoprololi	µg/l			0,74		0,75–1,5
sitalopraami	µg/l			0,17		< 0,011–0,25
venlafaksiini	µg/l		0,63 (min. 0,4)			0,37–0,89

¹14 jätevedenpuhdistamolla, ²17 isolla jätevedenpuhdistamolla, ³6 jätevedenpuhdistamolla a, ⁴1 jätevedenpuhdistamolla, ⁵2 jätevedenpuhdistamolla.

Poistoteho

Haitta-aine	VVY, 2014 ¹	VVY, 2021 ²	Äystö ym., 2020a ³	Kruglova ym., 2014 ⁴
diklofenaakki	5 %	12 %	17 %	ei mittausvirhettä suurempi
hydroklorotiatsidi			13 %	
karbamatsepiini	-5 %	11 %	-7 %	ei mittausvirhettä suurempi
klaritromysiini		24 %		
metoprololi			31 %	
sitalopraami			39 %	
venlafaksiini		20 %		

¹13–14 jätevedenpuhdistamolla, ²17 isolla jätevedenpuhdistamolla, ³4 jätevedenpuhdistamolla, ⁴1 jätevedenpuhdistamolla.

3.2.2 Vesistö

Suomessa lääkeaineiden pitoisuuksien on havaittu ylittävän haitattomiksi arvioidut pitoisuudet (PNEC, Predicted no-effect concentration) käsitellyssä jätevedessä ja vastaanottavassa vesistössä kuten esimerkiksi Vantaanjoessa. (Äystö ym., 2020; VVY, 2021). Äystö ym. (2020) raportoivat useiden lääkeaineiden ylittävän haitattomaksi arvioidut pitoisuudet. Työssä käytettiin CWPharma-hankkeessa määritettyjä PNEC-arvoja, jotka perustuvat aineille laboratorio-oloissa tehtyihin ekotoksisuustesteihin. Heidän tutkimuksensa mukaan riskit ovat Vantaanjoessa suurimmat jätevedenpuhdistamoiden läheisyydessä, ja pienenevät jokisuualueelle tultaessa. Tutkituista 69 yhdisteestä Äystön ym. (2020) mukaan suurin riski ympäristölle sekä jätevedessä että pintavedessä aiheutui diklofenaakista ja karbamatsepiinista. Nämä kaksi yhdistettä sisältyvät direktiiviehdotuksen yhdisteliselä (EU, 2022/0345).

Tavanomainen kipulääke ibuprofeeni poistuu tyyppillisessä jätevedenpuhdistusprosessissa tehokkaasti: VVYn tutkimuksessa (2021) sen poistoksi on raportoitu keskimäärin 99,6 %. Tuossa tutkimuksessa sen ei katsottu aiheuttavan riskiä ympäristölle. Äystö ym. (2020) kuitenkin raportoivat ibuprofeenin olevan riski ympäristölle laimenemisesta huolimatta. Tämä johtuu luultavasti merkittävästi korkeammista havaituista pitoisuuksista verrattuna VVY:n tutkimukseen.

3.3 Haitta-aineiden poiston kustannustieto ja kustannusarviot kirjallisuudessa

Kustannusarvioita vertailtaessa on huomioitava, että kustannukset voivat vaihdella suuresti puhdistamokohtaisesti, alueittain valtioiden sisällä ja valtioiden välillä. Lisäksi kustannusarvioiden oletukset ja rajaukset saattavat erota toisistaan merkittävästi. Esimerkiksi otsonille annetut kustannusarviot eivät välttämättä aina sisällä jälkikäsittelyn kustannuksia (Baresel ym., 2019). Kustannuksissa on myös ollut odottamatonta nousua viime vuosina, ja esimerkiksi rakennuskustannusindeksi nousi vuosina 2021–2022 aiempaa tasoa jyrkemmin (Tilastokeskus, 2023).

Pistocchi ym. (2022) analysoivat erilaisia skenaarioita haitta-aineiden poistamiseksi jätevesistä, ja esittävät kirjallisuuden perusteella jätevedenpuhdistamon koosta riippuvia kustannusfunktioita erilaisille haitta-aineiden poistoprosesseille. Heidän arvionsa mukaan otsonoinnin kokonaiskustannus on noin 3–4 €/hlö/v kun taas GAC-käsittelyn kokonaiskustannus on selvästi korkeampi, hiukan alle 6 €/hlö/v. Julkaisussa kuitenkin todetaan, että kustannukset riippuvat suuresti rakennettavasta prosessista ja prosessin osista sekä puhdistamokohtaisista yksityiskohdista. Otsonoinnin jälkikäsittelyn ja GAC-suodattimien rakentaminen nostavat investointikustannuksia. Julkaisussa kustannukset on jaoteltu neljään ryhmään: prosessiin laitettavat materiaalit kuten aktiivihiihi ja happi, investointi, huolto. Näistä GAC:illa suurin osa kokonaiskustannuksesta koostuu aktiivihiihen kustannuksista, ja otsonoinnissa taas korostuvat erityisesti energiasta aiheutuvat kustannukset. Otsonoinnin investointikustannukset ovat merkittävästi suuremmat kuin GAC-käsittelyn. Laskelmassa on oletettu huollon ja käyttökustannusten (pois lukien energiakustannukset) olevan 3 % vuosi-investoinnista, ja investointikustannusten poistoaikana on käytetty 20 vuotta ja sen kannattavuuden laskeamisessa on käytetty 3 % diskonttokorkoa (Pistocchi ym., 2022).

Pistocchi ym. (2022) mukaan otsonikäsittelyn energiantarve on noin 0,3 kWh/m³. Hapen tuottamiseen kuluu energiasta suurin osa, noin 0,25 kWh/m³, ja otsonin tuottamiseen hapestaa noin 0,05–0,07 kWh/m³. Lisäksi otsonin jälkikäsittelyä toimiva hiekkasuodatus kuluttaa energiaa noin 0,01–0,05 kWh/m³.

Kuten Pistocchi ym. (2022) esittävät, myös CWPharma-projektin ohjeessa haitta-aineidenpoistoprosessin suunnitteluun esitetään jätevedenpuhdistamon koosta riippuvia kustannusfunktioita haitta-aineidenpoistolle. Kustannuksiin saattaa suuresti vaikuttaa puhdistamon ominaisuudet kuten esimerkiksi seuraavat asiat (CWPharma, 2020):

- alueen ominaisuudet (käytössä oleva tila, maaperän tyyppi, rakennetaanko maaperän alle tai päälle)
- käsiteltävän veden laatu (esimerkiksi DOC-, ja nitriittipitoisuudet)
- käsiteltävän veden osuus koko virtaamasta
- valmiina käytettävissä olevat rakennelmat ja laitteistot (esimerkiksi suodattimet)

- pumppaustarve

Suomessa haitta-aineiden poiston kustannuksia ovat arvioineet ainakin Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL) CONPAT-projektissa (2018) ja VVY (2016). Haitta-aineiden poistolle esitettyjä arvioita käyttö- (OPEX) ja investointikustannuksista (CAPEX) on listattu taulukossa 4. Lisäksi SYKE:n EPIC-projektin yhteenvetona sanotaan, että uuden käsittelyvaiheen lisääminen voi olla vaikeaa ja kallista (SYKE, 2019), mutta varsinaista kustannusarviota ei esitetä.

Taulukko 4. Haitta-aineiden poistolle kirjallisuudessa esitettyjä kustannusarvioita.

	CAPEX (investointikustannus)		OPEX (käyttökustannus)	Kokonaiskustannus (100 000 AVL)		
	M€	€/m ³		€/m ³		
Lähde	O ₃	GAC	O ₃	GAC		
Pistocchi ym., 2022			0,035–0,05	0,04	0,04	O ₃ : 3–4 €/hlö/v GAC: noin 6 €/hlö/v
CWPharma, 2020 ¹						O ₃ : ≈0,03 €/m ³ , GAC: ≈0,06 €/m ³ , ≈0,07 €/m ³ , O ₃ : ≈3 €/hlö/v, GAC: ≈9 €/hlö/v, ≈4 €/hlö/v ⁷
Baresel ym., 2019						Erisuuruisia puhdistamoita mukana: O ₃ : 0,015–0,035 €/m ³ , GAC: 0,02–0,08 €/m ³
THL, 2018	0,74 ³ 1,1 ⁶	3,8 ³ 5,6 ⁶		0,002 ⁵ 0,008–0,02 ⁴ 0,03 ⁴ 0,06 ⁶ –0,07	0,003 ² 0,02–0,05 0,12 ⁶	
VVY, 2016					0,08–0,17	

¹Eri tutkimusten välisiä laskutapoja ja -rajoituksia ei harmonisoitu, joten suora vertailu ei ole mahdollista.

² Tapaus, jossa aktiivihiihiisuodatus edeltää aktiivilieteprosessin lisäksi hiekkasuodatus.

³10 000 m³/d, tarvittaessa käytetty muunnoskerrointa 250 dm³/AVL/d.

⁴Hinta ei sisällä henkilöstö- tai varaosakustannuksia.

⁵Otsonointia edelsi aktiivilieteprosessin lisäksi hiekkasuodatus ja aktiivihiihiisuodatus.

⁶100 000 AVL jätevedenpuhdistamolle.

⁷Menetelmä joko O₃, GAC tai PAC.

4 Hankkeeseen osallistuneet jätevedenpuhdistamot

Tutkimukseen osallistuivat seuraavat kuusi jätevedenpuhdistamoa:

- Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo, Turun seudun puhdistamo Oy
- Hämeenlinnan Paroisten jätevedenpuhdistamo, Hämeenlinnan seudun Vesi Oy
- Riihimäen jätevedenpuhdistamo, Riihimäen Vesi
- Kouvolan Mäkikylän jätevedenpuhdistamo, Kouvolan Vesi Oy
- Seinäjoen jätevedenpuhdistamo, Seinäjoen Vesi
- Oulun Taskilan jätevedenpuhdistamo, Oulun Vesi

Puhdistamot ovat suuria (>100 000 AVL) tai keskikokoisia (10 000–100 000 AVL) laitoksia. Kohdepuhdistamoiden ominaispiirteitä on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Selvityksen kohdepuhdistamoiden ominaispiirteitä ja lupaehtoja.

Muuttuja	Laatu	Turku	Hämeenlinna	Riihimäki	Kouvola	Seinäjoki	Oulu
Virtaama, keskiarvo	m ³ /d	80 000	20 000	13 000	26 000	20 000	53 000
Asukasvastineluku	as.	360 000	100 000	92 000	106 000	100 000	200 000
Typenpoiston lupaehto	mg/l	-	-	-	20*	-	-
	%	75	70	70	(70**)	60*	70*
Fosforinpoiston lupaehto	mg/l	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	%	95	97	95	95	95	95
Laitoksen sijainti	-	Kallion sisällä	Maan päällä	Maan päällä	Maan päällä	Maan päällä	Maan päällä
Biologinen prosessi	-	CAS	CAS	CAS	CAS	CAS	CAS ja MBR
Fosforinpoistokemikaalit		Ferrosulfaatti, ferrisulfaatti	Ferrisulfaatti, alumiinisulfaatti	Ferrosulfaatti	Ferrisulfaatti	Ferrisulfaatti	Polyalumiinikloridi, ferrisulfaatti
Jälkikäsittely	-	Hiekkasuodatus	Flotaatio	Hiekkasuodatus	-	Hiekkasuodatus	Biologinen jälkisuodatus (CAS)

30.11.2023

HH

Lietteenkä- sittely	-	Sakeutus, kuivaus	Sakeutus, mädätys, kuivaus	Sakeutus, mädätys, kuivaus	Sakeutus, kuivaus	Sakeutus, kuivaus	KemiCond, kuivaus
Teollisuus- jätevesien esikäsitte- lylinja		Ei	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei

*Kun prosessilämpötila ≥ 12 °C.

**Tavoite vuosikeskiarvona.

Taulukosta havaitaan, että puhdistamoissa on samankaltaisia ominaispiirteitä (käsittely perustuu aktiivilieteprosessiin ja kemialliseen fosforinpoistoon), mutta niissä on myös lukuisia eroja (laitoskoko, laitoksen sijoitus, typenpoiston lupaehdot, jälkikäsitteily, lietteenkäsittelyprosessi, teollisuusjätevesien kuormitus). Laitokset sijoittuvat Suomen eri osiin ja niiden viemäriverkostot eroavat toisistaan kunnoltaan sekä sekaviemäroinnin osuuksiltaan. Nämä eroavaisuudet vaikuttavat mm. jäteveden lämpötilaan ja virtaamavaihteluihin. Toisaalta kahdella laitoksista teollisuusjätevedet nostavat jäteveden lämpötilaa.

Kohdepuhdistamoiden laitosalueet eroavat luonnollisesti toisistaan. Osalla laitoksista on tontilla käytettävissä hyvin tilaa uusille prosessiyksiköille, mutta toisilla tontti on ahdas. Osalla puhdistamoista on tontilla tilavarauksia, joskaan millään kohdepuhdistamoista ei ole tilavarausta haitta-ainesten poistoprosessille. Merkittävin ero on Turun ja muiden puhdistamoiden välillä: uusien prosessiyksiköiden toteuttaminen kallioluolaan eroaa maan päälle rakennettavista uudisrakennuksista ja altaista.

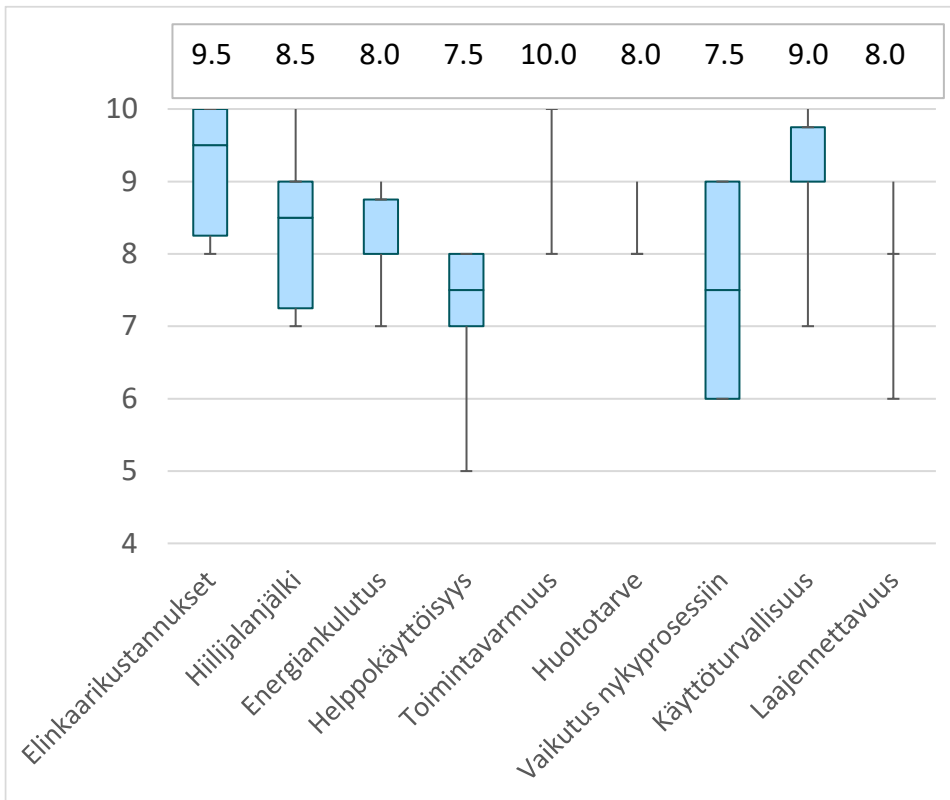
5 Haitta-aineidenpoistoa koskeva kysely

Puhdistamojen edustajia pyydettiin vastaamaan lähtötietokyselyyn projektin alussa. Kysely toteutettiin Microsoft Formsin avulla. Sen kysymykset ja tulokset on listattu liitteessä 4. Kyselyllä pyrittiin saamaan lisätietoja haitta-aineidenpoistoprosessin valintaan pyytämällä arvioimaan kymmenen prosessivalintaan mahdollisesti vaikuttavan asian tärkeyttä. Seuraavat asiat tuli arvioida asteikolla 1–10 (1 ei lainkaan tärkeä, 10 erittäin tärkeä):

- Elinkaarikustannukset
- Hiilijalanjälki
- Energiankulutus
- Helppokäyttöisyys
- Toimintavarmuus
- Huoltotarve
- Vaikutus nykyprosessiin
- Käyttöturvallisuus
- Laajennettavuus

Kyselyssä pyydettiin lisäksi valitsemaan joko O₃- tai GAC-prosessi, tai ”En osaa sanoa”-vaihtoehto, ja perustelemaan valinta. Lisäksi kysyttiin avoimia kysymyksiä puhdistamon erityispiirteistä ja toiveista.

Vastausten hajonta on esitetty laatikko-jana-kuviona (Kuva 1). Kymmenestä prosessivalintaan vaikuttavasta asiasta vastaajat katsovat tärkeimmiksi prosessin toimintavarmuuden (keskiarvo 9,7) ja kustannukset (ka 9,2). Laatikko-jana-kuviossa data on ajettu neljään joukkoon seuraavien tunnuslukujen mukaan: minimi, alakvartiili, mediaani, yläkvartiili ja maksimi. Kolmen kysytyn asian kohdalla kuvassa ei ole laatikkoa (toimintavarmuus, huoltotarve, laajennettavuus). Tämä johtuu siitä, että vastauksissa oli niin vähän hajontaa, ettei kvartaaleja voitu laskea (4–5 samaa vastausta kuudelta laitokselta). Kuvaajasta voidaan näin ollen havaita vastausten minimi ja maksimit. Vastausten mediaanit ovat esitetty numeroina kuvaajien yläpuolella.



Kuva 1. Kymmenen prosessivalintaan vaikuttavan asian arvioinnit asteikolla 1: ei lainkaan tärkeä – 10: erittäin tärkeä. Vastausten mediaanit on esitetty numeroina kuvaajien yläpuolella.

Yksi vastaajista katsoi, että kaikkia listattuja asioita voidaan pitää erittäin tärkeinä prosessinvalinnan kannalta. Tärkeimmäksi tämä vastaaja listasi toimintavarmuuden ja kustannukset ja vähiten tärkeäksi operoinnin omaksumisen helppouden. Viisi vastaajista katsoi käyttökustannusten pienuuden olevan investointikustannuksia tärkeämpi tekijä prosessin valinnalle (kysymys 12). Kaksi vastaajaa kuitenkin huomautti, että käyttö- ja investointikustannusten yhteisvaikutus/elinkaarikustannus 25 vuoden aikajänteellä on merkittävä tai tärkeämpi kuin joko käyttö- tai investointikustannus.

Seuraavaksi tärkeimpinä pidettiin prosessin käyttöturvallisuutta (ka 9,0), hiilijalanjälkeä (ka 8,3), energiankulutusta (ka 8,2) ja huoltotarvetta (ka 8,2). Vähiten tärkeinä pidettiin prosessin laajennettavuutta tulevaisuudessa (ka 7,8), prosessin vaikutusta nykyprosessiin (ka 7,5) ja prosessin omaksumisen helppoutta ja helppokäyttöisyyttä (ka 7,2).

Yksi vastaaja huomautti, että ympäristöluvan nykyiset ja ennakoituvat tulevat vaatimukset kannattaa yrittää huomioida prosessivalinnassa (kysymys 13).

Kaksi vastaajista valitsisi tämänhetkisen tietojensa perusteella puhdistamolleen otsonoinnin, kaksi rakeisen aktiivihiihen ja kaksi valitsi vaihtoehdon ”en osaa sanoa” (kysymys 14). Otsonointia puolestaan, koska se vaatii vastaajan mukaan vähemmän huoltoa kuin aktiivihiihikäsittely, mm. aktiivihiihen vaihtamistarpeen vuoksi.

30.11.2023

HH

Rakeista aktiivihiltä taas puolletaan, koska sitä pidetään otsonointia tehokkaampana ja turvallisempaan menetelmänä haitta-aineiden poistoon, ja koska siitä on kokemusta talousvesilaitoksilta (kysymys 15).

Kaksi vastaajista epäili otsonoinnin kykyä hävittää lääkejäämiä (kysymykset 15 ja 16).

Jos haitta-aineiden poisto toteutettaisiin otsonoinnin avulla, toivoisivat vastaajat, että toteutuksessa huomioitaisiin ainakin käyttöturvallisuus, desinfioinnin sivutuotteet, prosessin häiriöttömyys ja aiemmat käyttökokemukset (kysymys 16).

Jos haitta-aineiden poisto toteutettaisiin rakeisen aktiivihillen avulla, toivoisivat vastaajat, että toteutuksessa huomioitaisiin ainakin hiilen vaihdon sujuvuus, regeneroinnin toteutuspaikka tai aktiivihillen hävitys ja sen kustannukset, muuttuvien virtaamaolosuhteiden vaikutus prosessiin ja huuhteluvesien määrä ja minne huuhteluedet johdetaan prosessissa. Lisäksi vastaajat listaavat selvitetäviksi asioiksi biohiilen käyttökelpoisuuden ja sen mitä lääkejäämille tapahtuu aktiivihilleen sitoutumisen jälkeen (kysymys 17).

Valitulla prosessilla tulisi olla myös riittävä kapasiteetti, ja lisäksi sen olisi toivottavaa olla liitettävissä automaatiojärjestelmään (kysymykset 16 ja 17).

Puhdistamojen erityispiirteiksi ja toiveiksi listataan käytävissä oleva tila, mahdollinen tarvittava kaavamuutos, teollisuuden vaikutus vedenlaadun vaihteluihin, hulevesien ajoittainen korkea määrä, ja se, että prosessi ei aiheuttaisi ”lisää vaikeasti hävitettävää ongelmaa”. Tämän tulkittiin viittaavan joko hävittämistä vaativaan aktiivihilleen tai otsonoinnissa muodostuviin hajoamistuotteisiin (kysymys 18).

6 Näytteenotto ja analyysit

6.1 Analysoidut yhdisteet ja näytteenotto

6.1.1 Vedenlaatu

Puhdistamojen edustajia pyydettiin analysoimaan jätevesistä normaalin tarkkailun sisältämien muuttujien lisäksi liuenneen orgaanisen hiilen määrää (DOC), kemiallista hapentarvetta (COD), kokonaiskiintoainepitoisuutta (TSS), nitriittiä (NO_2^-) ja bromidia (Br^-).

Näytteet otettiin 24 tunnin aika- tai virtaamapainotteisina näytteinä. Mahdollisuuksien mukaan analyysit teetettiin puhdistamon velvoitetarkkailun näytteestä. Näytepisteitä oli kaksi: mahdolliseen jälkikäsitteilyyn menevä vesi, ja lähtevä vesi ennen mahdollista UV-käsittelyä. Jokaisella puhdistamolla otettiin yksi näyte kummastakin näytepisteestä, paitsi Turun jätevedenpuhdistamolla otettiin neljä näytettä kummastakin näytepisteestä.

6.1.2 Haitta-ainenäytteet

Kaikilla kuudella puhdistamolla otettiin tulevasta ja lähtevästä jätevedestä kaksi näytettä haitta-aineanalyysijä varten. Puhdistamoiden edustajat ottivat näytteet itse ja täyttivät näytteenotosta sitä varten laaditun päiväkirjan, kuten tehtiin myös VVY:n tutkimuksessa (VVY, 2021). Päiväkirjat ovat liitteessä 5. Lähtevän veden näytteet otettiin mahdollisen UV-käsittelyn jälkeen. Turussa UV:tä ei ohitettu näytteenottoaikana eli näytteet kuvastivat lähtevää jätevettä. Tulevan ja sitä vastaavan lähtevän veden näytteet otettiin samaan aikaan eikä viipymää puhdistamon prosessissa huomioitu. Näytteenottoaika oli kuitenkin pitkä. Näytteet otettiin 48 h kokoomanäytteinä aika- tai virtaamapainotteisesti siten, että lopulliset näytteet koostuivat kahdesta 24 h kokoomanäytteen sekoituksena. Sekoitus tehtiin näytteenottoaikojen virtaamien suhteessa, ja sekoitetut näytemäärät laskettiin käyttäen kaavaa 3:

$$V_{\text{näyte } 2} = \frac{V_{\text{näyte } 1} \cdot Q_2}{Q_1} = \frac{100 \text{ ml} \cdot Q_2}{Q_1}, \quad (3)$$

missä

$V_{\text{näyte } 1}$ = sekoitusta varten otettava näytteen 1 määrä = 100 ml

$V_{\text{näyte } 2}$ = sekoitusta varten otettava näytteen 2 määrä, tuntematon, lasketaan kaavalla 1

Q_1 = ensimmäisen näytteen oton aikana näytepisteen läpi mennyt virtaama

Q_2 = toisen näytteen oton aikana näytepisteen läpi mennyt virtaama

30.11.2023

HH

Näytteitä säilytettiin kylmässä, alle 4 °C:n lämpötilassa koko näytteenottoajan aina siihen asti, kun näytteet lähetettiin laboratorioon analysoitavaksi. Näytteet pakattiin kylmälaukkuun kylmävaraa-
jien kanssa, ja toimitettiin kuljetusyrityksen avulla Sveitsiin laboratorioon siten, että ne olivat perillä
lähetyksestä seuraavana päivänä. Osa näytteistä ehti lämmetä matkan aikana viivästyneen kuljetuksen
vuoksi, mikä lisää tulosten epävarmuutta. Analysoitavat yhdisteet eivät poistu biologian avulla kovin
hyvin, joten näytteet ovat kuitenkin luultavasti hyvin samankaltaisia kuin ne olisivat olleet ilman
lämpenemistä.

Sveitsin lainsäädäntö edellyttää tiettyjen indikaattoriyhdisteiden seuraamista 4–24 kertaa vuodessa
riippuen puhdistamon koosta ja haitta-ainepoistotekniikan käyttöönotosta (micropoll.ch). Haitta-
aine-analyysit teetettiin sveitsiläisessä laboratoriossa (Envilab), jolla on analyysipaketti juuri näille
yhdisteille Sveitsin lainsäädännön vuoksi.

Aiemmin VVY:n raportissa on suositeltu, että laboratoriota valitessa kannattaa pyrkiä saamaan
PNEC-arvoja alemmat määräysrajat, ja että prioriteettiaineiden osalta määräysraja saisi olla kor-
keintaan 0,3 x EQS-arvo (Vna 868/2010) (VVY, 2021). Toteutuneet määräysrajat ja PNEC-arvot on
listattu liitteessä 1.

On huomattava, että erilaisia analysoitavia yhdisteitä on valtavasti, ja lainsäädäntö koskee vain osaa
yhdisteistä. On mahdollista seurata tiettyjä valittuja yhdisteitä, kuten tehdään esimerkiksi Sveitsissä.
On myös mahdollista tunnistaa näytteestä paljon muita yhdisteitä erilaisten analyysikirjastojen
avulla. Vaihtoehtoisesti voi mitata jotain välillistä muuttujaa kuten vaikutusta eliöihin, jolloin myös
yhdisteiden yhteisvaikutus huomioidaan (Rogowska ym., 2020).

6.2 Mittaustulokset

6.2.1 Vedenlaatu

Taulukossa 6 on listattu vedenlaatutuloksia, jotka ovat olennaisia prosessivalintaa ja mitoitusta varten. Tulokset ovat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta yksittäisistä näytteistä ja ne ovat siten vain suuntaa antavia tuloksia eikä niistä kannata vetää kovin suuria johtopäätöksiä.

Taulukko 6. *Prosessivalinnan ja prosessin mitoituksen kannalta olennaisia vedenlaatutuloksia. Tulokset ovat yksittäisistä näytteistä, jollei toisin ole huomautettu. Tulokset on laskettu määrittämissä ylittävien näytteiden keskiarvona.*

Muuttuja	Yksikkö	Hämeenlinna	Kouvola	Oulu	Riihimäki	Seinäjoki	Turku, n=4
DOC	mg/l	14	9,3	14	12 ^A	11 ^A 8,5 ^B	9,5 ^A 8,9 ^B
COD	mg/l	31	31	35	33 ^{A, B}	32 ^A 25 ^B	26 ^A 22 ^B
TSS	mg/l	5,8	6,5	2,4	< 2 ^A	4,7 ^A 7,3 ^B	2,7 ^A 1,9 ^B
NO ₂ ⁻	mg/l	0,15	0,21 ^C	0,25 ^D	0,01 ^A	0,2 ^A	0,04 ^{A*}
Br ⁻	mg/l	< 0,5	0,08	0,2	0,39 ^A 0,4 ^B	< 0,1 ^{A, B}	0,36 ^A 0,34 ^B

^AEnnen laitoksen nykyistä jälkisuodatusta otetusta näytteestä. Laitoksilla, joilla ei ole jälkisuodatusta, näyte otettiin lähtevästä jätevedestä. Tämä vesi johdetaan kaikissa suunnitelmissa otsonointiin.

^BLaitoksen nykyisen jälkisuodatuksen jälkeen otetusta näytteestä.

^CAjalla 1.1.2020–26.10.2023 vaihteluväli 0,02–0,36 mg/l, keskimäärin 0,08 mg/l.

^DVuosina 2020–2021 vaihteluväli 0,11–1,4 mg/l, keskimäärin 0,36 mg/l.

*Keskiarvo kolmesta näytteestä, koska yhden tulos oli alle määrittämissä <0,015 mg/l.

DOC kuluttaa otsonia ja siksi otsoniannos suhteutetaan DOC:n määrään. Muun DOC:n pitoisuus on käsiteltävässä vedessä merkittävästi suurempi kuin myös DOC:ksi luokiteltavien haitta-aineiden pitoisuus. Tyypillinen spesifinen otsoniannos haitta-aineiden poistossa jätevedestä on 0,3–0,9 mgO₃/mgDOC. Koska jätevedenpuhdistamoilla analysoidaan tavallisesti COD eikä DOC, voi tarkemmassa suunnitteluvaiheessa olla järkevää tutkia miten DOC-pitoisuus korreloi COD-pitoisuuden kanssa. Näin DOC:n vaihtelua voidaan arvioida olemassa olevan COD-datan pohjalta (CWPharma, 2020). Sen vuoksi mitattiin myös COD, ja sen tulokset on listattu taulukossa 6.

Kiintoaine vaikuttaa suodattimen tukkeutumismuutokseen, ja koskee siten sekä aktiivihilisuodatusta että otsonoinnin jälkikäsittelyä käytettävää jälkisuodatusta. GACia suositellaan käytettävän vedelle, jonka kiintoainepitoisuus on alle 10–20 mg/l (CWPharma, 2020). Tässä hankkeessa mitattujen näytteiden kiintoainepitoisuus oli kaikilla puhdistamoilla alle 10 mg/l. Kiintoainepitoisuus voi kuitenkin vaihdella paljonkin tulevan veden laadun ja prosessin toiminnan vaikutuksesta. Puhdistamojen vuosiraporteista ei välttämättä käy ilmi haitta-ainekäsittelyyn menevän veden kiintoaineen

pitoisuus, joten näitä tietoja kysyttiin tarvittaessa puhdistamoilta erikseen, ja ne on taulukoitu liitteessä 6.

Nitriitti kasvattaa tarvittavaa otsoniannosta, sillä osa otsoniannoksesta kuluu nitriitin hapettumiseen nitraatiksi: 3,43 mgO₃/mg-N (CWPharma, 2020). Nitriittitypen pitoisuus vaihtelee tyypillisesti jätevedenpuhdistamoilla huomattavasti vuoden aikana. Esimerkiksi Kouvolan jätevedenpuhdistamolla nitriittitypen pitoisuus on lähtevässä jätevedessä keskimäärin noin 0,08 mg/l ja sen vaihteluväli 0,02–0,36 mg/l ajalla 1.1.2020–26.10.2023. Oulun jätevedenpuhdistamolla nitriittitypen pitoisuus oli vuosina 2020–2021 keskimäärin 0,36 ja sen vaihteluväli 0,1–0,6 mg/l lukuun ottamatta kahta tätä suurempaa piikkiä.

Kohonneet bromidipitoisuudet (> 0,15 mg/l) voivat aiheuttaa bromaatin muodostumisen riskin otsonoinnissa (CWPharma, 2020). Bromidimittausten yllättävän korkeiden määritysrajojen vuoksi (0,5–1,0 µg/l) bromidipitoisuudet mitattiin osalla puhdistamoista uudestaan. Bromidipitoisuuksia ja bromaatinmuodostumista kannattaa seurata myöhemmässä suunnitteluvaiheessa tarkemmin, mikäli otsonointi vaikuttaa vaihtoehtoista sopivimmalta.

Oulussa, Riihimäellä ja Turussa lähtevän jäteveden tai hiekkasuodatuksen jälkeisen veden bromidipitoisuus ylittää pitoisuuden 0,15 mg/l, jolla bromaatin muodostuminen voi olla haaste. Jos näille laitoksille suunnitellaan otsonointia, tulisi bromidipitoisuuksia mitata tarkemmassa suunnitteluvaiheessa useammasta näytteestä ja tutkia laboratoriokokeilla bromaatin muodostumista. Tuossa yhteydessä voidaan kartoittaa myös puhdistamolle tulevan bromidin päästölähteitä, ja selvittää, voidaananko bromidin saapumista puhdistamolle vähentää. Bromidia voi esimerkiksi päätyä viemäriin meriveden mukana rannikolla sijaitsevilla puhdistamoilla kuten Oulussa ja Turussa, ja sitä voi tulla jätteenpolttolaitoksista kuten varmaankin tulee Riihimäellä. (CWPharma, 2020).

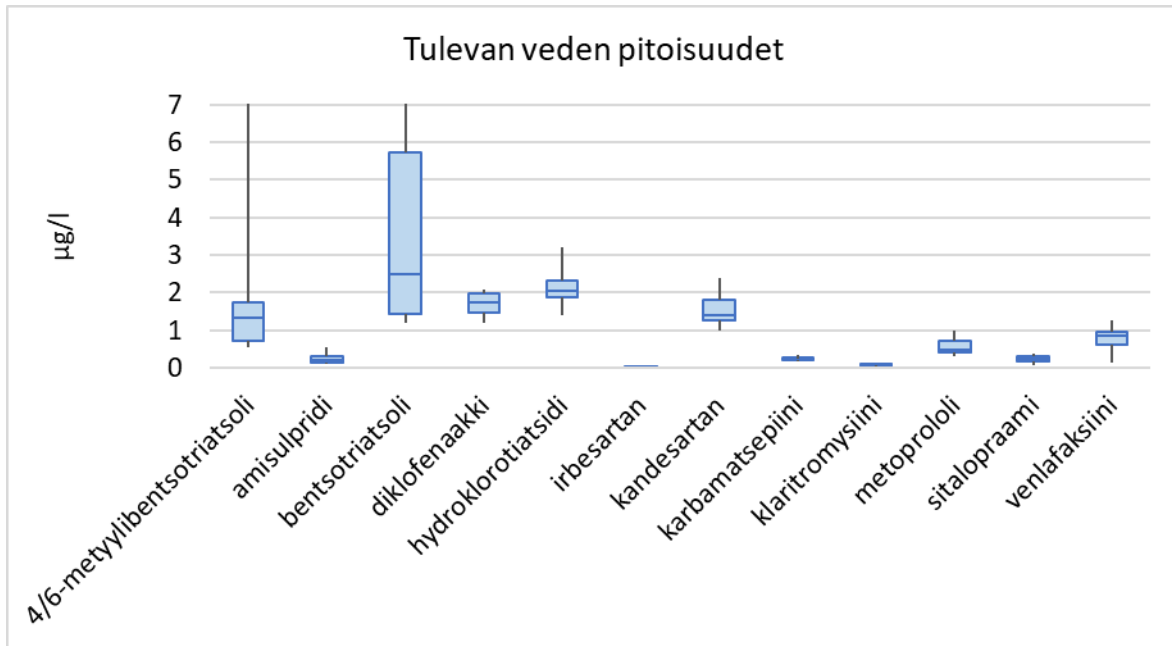
6.2.2 Haitta-aineet

6.2.2.1 Pitoisuudet

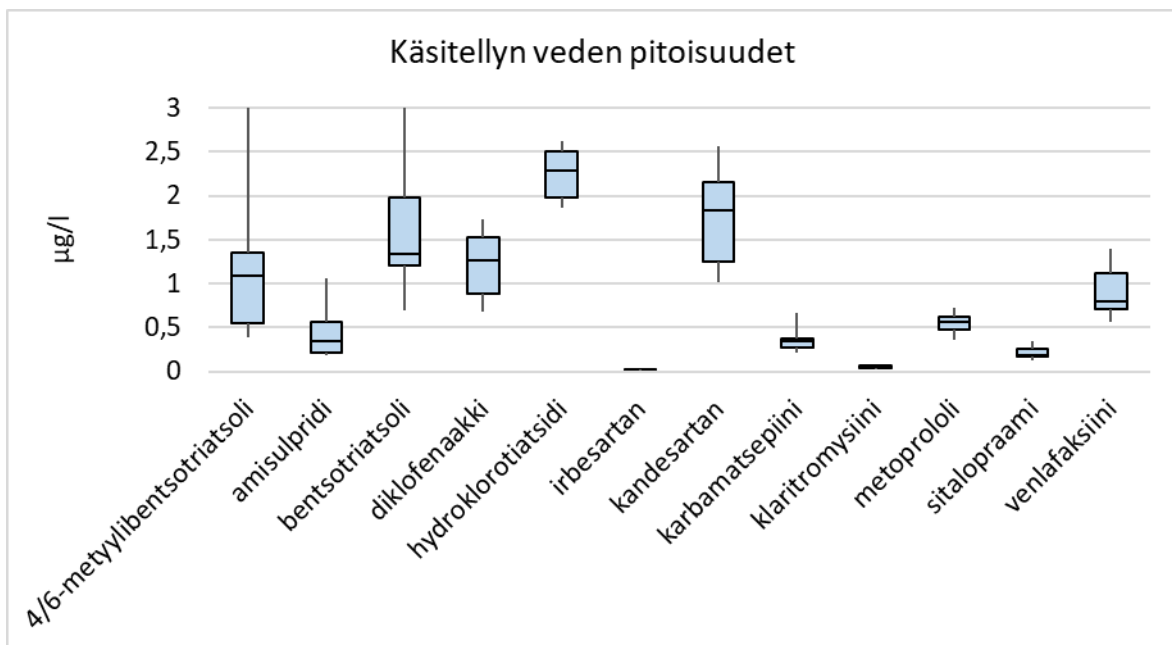
Tutkittujen yhdisteiden mitatut pitoisuudet tulevassa jätevedessä on esitetty laatikko-jana-kuvioina kuvassa 2 ja käsitellyssä jätevedessä kuvassa 3. Laatikko-jana-kuviossa puolet tuloksista on laatikon sisällä, laatikon poikki kulkeva viiva esittää tulosten mediaanin, ja jana ulottuu pienimpään ja suurimpaan mittaustulokseen. Määritysrajan alittavat tulokset eivät ole mukana kuvaajien arvoissa. Määritysrajat saattoivat vaihdella yhdisteiden ja näytteiden välillä. Toteutuneet määritysrajat on koottu liitteeseen 5. Laboratorio ilmoitti tulosten epävarmuudeksi 12–24 %. Tuloksia on verrattu tässä aiemmin raportoituihin pitoisuuksiin, jotka on listattu kappaleessa 3.2.1.

30.11.2023

HH



Kuva 2. Mitattujen haitta-aineiden pitoisuudet tulevan veden näytteissä kaikilla puhdistamoilla. Määritysrajan allittavat tulokset eivät ole mukana kuvaajan arvoissa. Kuvaajan y-akselia on skaalattu siten, että tulokset erottuvat paremmin. 4/6-metyyli-bentsotriatsolin suurin mitattu pitoisuus tulevassa vedessä oli 20 µg/l ja bentsotriatsolin 8,6 µg/l.



Kuva 3. Mitattujen haitta-aineiden pitoisuudet käsitellyn veden näytteissä kaikilla puhdistamoilla. Määritysrajan allittavat tulokset eivät ole mukana kuvaajan arvoissa. Kuvaajan y-akselia on skaalattu siten, että tulokset erottuvat paremmin. 4/6-metyyli-bentsotriatsolin suurin mitattu pitoisuus käsitellyssä vedessä oli 11 µg/l ja bentsotriatsolin 4,0 µg/l.

30.11.2023

HH

Yhdistekohtaiset pitoisuudet olivat puhdistamojen välillä enimmäkseen hyvin lähellä toisiaan. Isoin hajonta oli 4/6-metyylibentsotriatsolin ja bentsotriatsolin pitoisuuksissa, jotka olivat Hämeenlinnassa Paroisten puhdistamolla suuret verrattuna muihin puhdistamoihin. Analyysilaboratoriosta kerrottiin näiden korroosionestoaineina käytettävien yhdisteiden pitoisuuksien vaihtelevan valuma-alueen teollisuuden mukaan, ja esimerkiksi Sveitsissä tulevan jäteveden pitoisuuksien olevan välillä 1–40 µg/l (Envilab, 2023). Tässä hankkeessa suurimmat mitatut pitoisuudet olivat 4/6-metyylibentsotriatsolille 20 µg/l ja bentsotriatsolille 8,6 µg/l.

Amisulpridin havaitut pitoisuudet olivat tulevan veden näytteissä välillä 0,11–0,54 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 0,19–1,1 µg/l. Sitä ei havaittu Kouvolan ja Hämeenlinnan näytteissä. Amisulpridille ei löydetty kirjallisuudesta verrokkituloksia suomalaisista jätevesistä.

Bentsotriatsolia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä 1,2–8,6 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 0,69–4,0 µg/l. 4/6-metyylibentsotriatsolia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä 0,55–20 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 0,39–11 µg/l. Bentsotriatsoleille ei löydetty kirjallisuudesta verrokkituloksia suomalaisista jätevesistä.

Diklofenaakkia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuus tulevan veden näytteissä välillä 1,2–2,1 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 0,68–1,7 µg/l. Tulokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin mitä on aiemmin raportoitu suomalaisista jätevesistä (VVY, 2014; VVY, 2021; SYKE, 2019b; Kruglova ym., 2014; XAMK, 2022). Äystö ym. raportoivat lähtevässä vedessä suurempia pitoisuuksia: 2,2–6,8 µg/l ja keskimäärin 3,6 µg/l (Äystö ym., 2020).

Hydroklorotiatsidia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä 1,4–3,2 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 1,9–2,6 µg/l. Aiemmin Suomessa Suomen ympäristökeskus (SYKE) on raportoinut hydroklorotiatsidia tulevassa jätevedessä keskimäärin 2,4 µg/l ja lähtevässä jätevedessä keskimäärin 3,0 (SYKE, 2019b). Lisäksi on raportoitu tulevassa jätevedessä pitoisuudet 1,7 ja 2,8 µg/l (XAMK, 2022) ja lähtevässä jätevedessä pitoisuuksia < 0,11–14 µg/l (Äystö ym., 2020).

Irbesartania havaittiin vain Turussa, jossa pitoisuus oli kaikissa tulevan ja lähtevän veden näytteissä 0,01–0,02 µg/l. Pitoisuudet olivat noin kymmenesosan siitä mitä laboratoriossa yleensä mitataan sveitsiläisille puhdistamoille tulevasta jätevesistä (Envilab, 2023). Muilla puhdistamoilla irbesartania ei havaittu, vaan sen tulokset olivat alle määrittäysrajan, joka oli puhdistamosta riippuen 0,01–0,02 µg/l (Seinäjäki, Kouvola, Hämeenlinna, Riihimäki, Oulu). Kirjallisuudesta ei löydetty irbesartanille verrokkituloksia suomalaisista jätevesistä.

Kandesartania havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä 0,98–2,4 µg/l ja lähtevän veden näytteissä välillä 1,0–2,6 µg/l. Kandesartanin pitoisuus tulevan veden näytteissä oli laboratorion mukaan 1,5–10-kertainen verrattuna sveitsiläisiin jätevesiin (Envilab, 2023). Kirjallisuudesta löytyi yksi aiempi tutkimus kandesartanista lähtevässä jätevedessä

suomalaisella jätevedenpuhdistamolla, mutta tulos alitti määritysrajan $< 0,011 \mu\text{g/l}$ (Äystö ym., 2020). Tulevalle jätevedelle ei löydetty kirjallisuudesta verrokkitulosta suomalaisista jätevesistä.

Karbamatsepiinia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä $0,17\text{--}0,33 \mu\text{g/l}$ ja lähtevän veden näytteissä välillä $0,21\text{--}0,67 \mu\text{g/l}$. Tulokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin mitä on aiemmin raportoitu suomalaisista jätevesistä (VVY, 2014; VVY, 2021; SYKE, 2019b; Kruglova ym., 2014; XAMK, 2022; Äystö ym., 2020).

Klaritromysiiniä havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä $0,06\text{--}0,09 \mu\text{g/l}$ ja lähtevän veden näytteissä välillä $0,02\text{--}0,06 \mu\text{g/l}$. Aiemmin Suomessa Vesilaitosyhdistys (VVY) on raportoinut klaritromysiiniä tulevassa jätevedessä keskimäärin $0,16 \mu\text{g/l}$ ja lähtevässä jätevedessä keskimäärin $0,09$ (VVY, 2021). Lisäksi Äystö ym. (2020) raportoi lähtevässä jätevedessä pitoisuuksia $< 0,016\text{--}0,28$.

Metoprololia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä $0,30\text{--}1,0 \mu\text{g/l}$ ja lähtevän veden näytteissä välillä $0,36\text{--}0,72 \mu\text{g/l}$. Aiemmin Suomessa SYKE on raportoinut metoprololia tulevassa jätevedessä keskimäärin $1,1 \mu\text{g/l}$ ja lähtevässä jätevedessä keskimäärin $0,74$ (SYKE, 2019b). Lisäksi on raportoitu tulevassa jätevedessä pitoisuudet $< 0,10$ ja $0,97 \mu\text{g/l}$ (XAMK, 2022) ja lähtevässä jätevedessä pitoisuuksia $0,75\text{--}1,5 \mu\text{g/l}$ (Äystö ym., 2020).

Sitalopraamia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä $0,06\text{--}0,38 \mu\text{g/l}$ ja lähtevän veden näytteissä välillä $0,12\text{--}0,34 \mu\text{g/l}$. Aiemmin Suomessa SYKEon raportoinut sitalopraamia tulevassa jätevedessä keskimäärin $0,26 \mu\text{g/l}$ ja lähtevässä jätevedessä keskimäärin $0,17$ (SYKE, 2019b). Lisäksi on raportoitu tulevassa jätevedessä määritysrajan alittava pitoisuus $< 0,10$ (XAMK, 2022) ja lähtevässä jätevedessä pitoisuuksia $< 0,011\text{--}0,25 \mu\text{g/l}$ (Äystö ym., 2020).

Venlafaksiinia havaittiin kaikissa näytteissä, ja sen pitoisuudet tulevan veden näytteissä välillä $0,15\text{--}1,3 \mu\text{g/l}$ ja lähtevän veden näytteissä välillä $0,57\text{--}1,4 \mu\text{g/l}$. Aiemmin Suomessa VVY on raportoinut venlafaksiinia tulevassa jätevedessä keskimäärin $0,79 \mu\text{g/l}$ ja lähtevässä jätevedessä keskimäärin $0,63 \mu\text{g/l}$ (VVY, 2021). Lisäksi Äystö ym. (2020) raportoivat lähtevässä jätevedessä pitoisuuksia $0,37\text{--}0,89 \mu\text{g/l}$.

Sitalopraamin ja venlafaksiinin pitoisuudet lähtevässä jätevedessä (Hämeenlinna, Kouvola, Seinäjoki) olivat laboratorion mukaan korkeammat kuin sveitsiläisissä jätevesissä tyypillisesti (Envilab, 2023).

6.2.2.2 Poistotehot

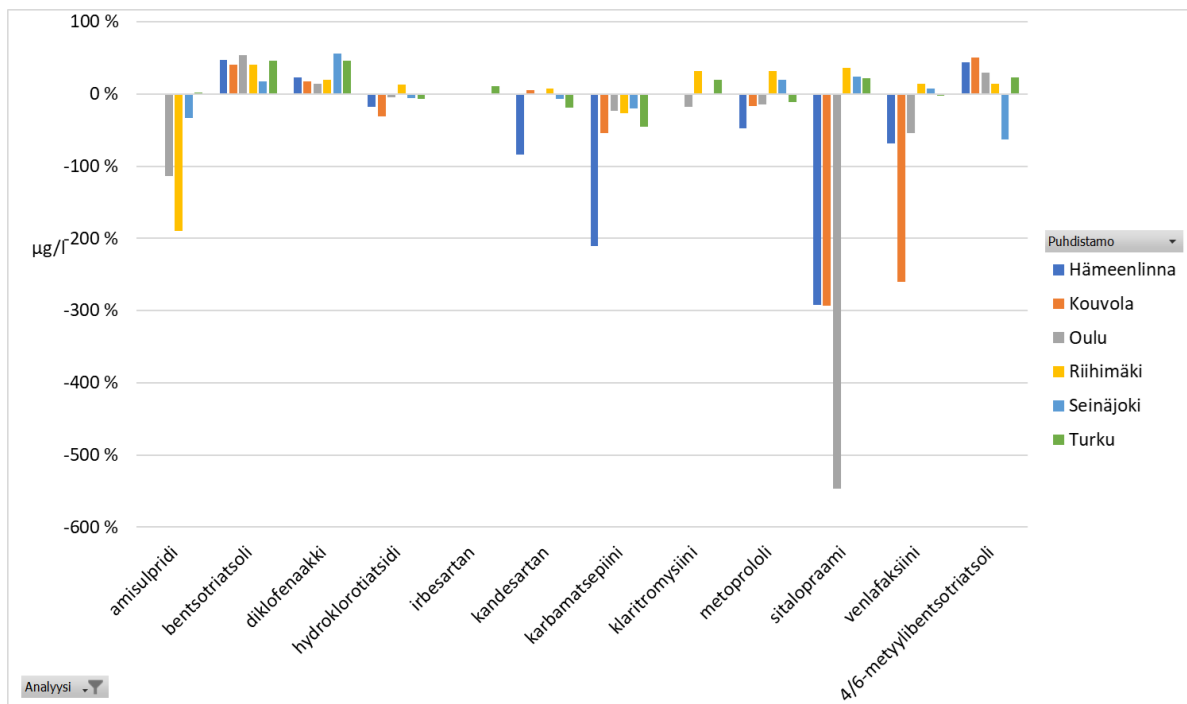
Yhdisteet eivät juurikaan poistuneet puhdistamoilla (kuvat 4 ja 5). Tämä oli odotettua kirjallisuuden perusteella. Joskus lähtevässä jätevedessä mitattiin jopa suurempi pitoisuus joitakin yhdisteitä kuin tulevassa, eli poistotulos oli negatiivinen. Tämä saattaa johtua siitä, ettei näytteenotossa huomioitu veden viipymää jätevedenpuhdistamolla vaan näytteet otettiin samaan aikaan tulevasta ja

lähteestä jätevedestä. Laboratorio laski poistotulokset Sveitsin lainsäädännön mukaisesti. Määrittäjärajalla alittavia tuloksia ei sisällytetty kokonaispoistoprosentin laskentaan.

Poistotulokset olivat laboratorion mukaan odotettuja: karbamatsepiinia muodostuu laboratorion mukaan jätevedenpuhdistuksen biologisessa vaiheessa, kun taas diklofenaakki ja bentsotriatsolia poistuu biologisessa puhdistusprosessissa. (Hämeenlinna, Kouvola, Seinäjoki). Lisäksi biologia poisti osalla puhdistamoista myös klaritromysiiniä (Turku) ja metyylibentsotriatsolia (Turku, Riihimäki, Oulu).

Kaikille paitsi bentsotriatsolille saatiin osalla näytekertoista negatiivinen poistotulos: amisulpridi, diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, irbesartan, kandesartan, karbamatsepiini, klaritromysiini, metoprololi, sitalopraami, venlafaksiini, 4/6-metyylibentsotriatsoli. Negatiivinen poisto saattaa johtua veden viipymästä jätevedenpuhdistamolla (Envilab, 2023).

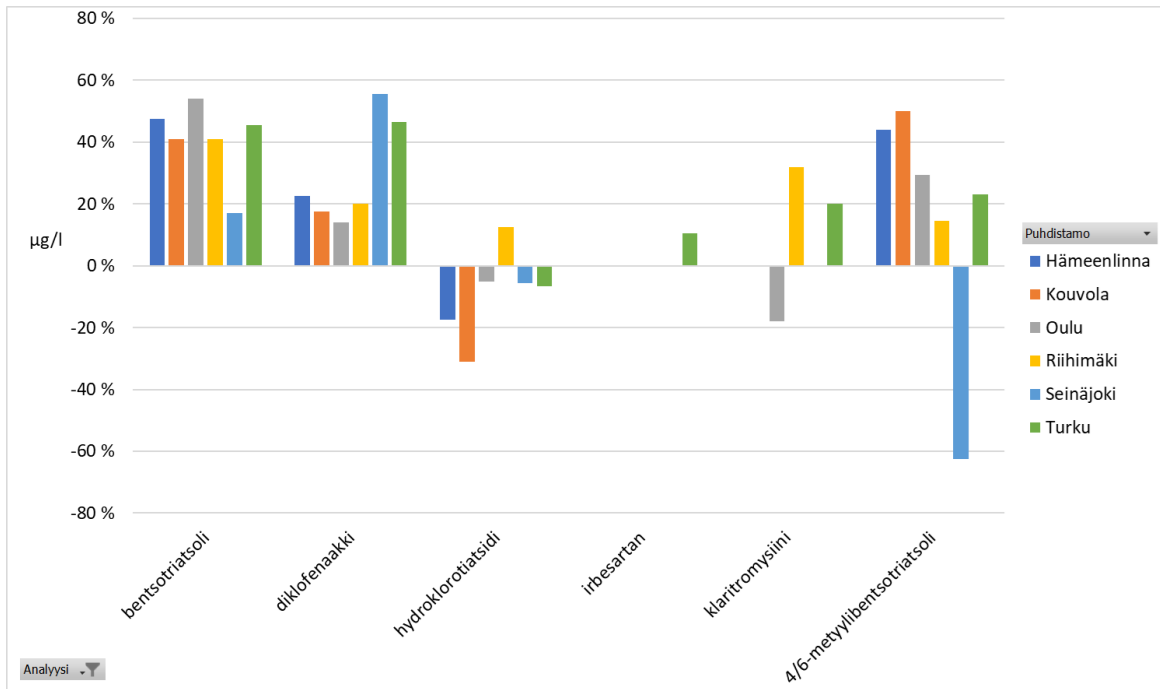
Ainut puhdistamo, jossa kaikkien haitta-aineiden poistoista laskettu kokonaispoisto oli laboratorion laskennan mukaan positiivinen, oli Turun puhdistamo. Sielläkin näiden yhdisteiden kokonaispoisto oli hyvin vaatimaton, vain 7 %. Kahden peräkkäisen näytekerran poistotulokset olivat tässä tapauksessa melko erisuuret: 0 % ja 14 %.



Kuva 4. Laboratorion laskemat poistotulokset kullekin tutkitulle yhdisteelle. Jokainen tulos on laskettu kahdesta tulevan ja kahdesta lähtevän jäteveden näytteestä.

30.11.2023

HH



Kuva 5. Laboratorion laskemat poistotulokset kullekin tutkitulle yhdisteelle. Jokainen tulos on laskettu kahdesta tulevan ja kahdesta lähtevän jäteveden näytteestä.

7 Prosessi- ja laitossuunnittelu

7.1 Prosessimitoituksen periaatteet

Uusien prosessien suunnittelussa tavoitteena on ollut ennakoitu direktiivimuutokseen liittyvä haitta-aineidenpoistovelvoite. Muita direktiivipäivityksen ennakoituja uusia vaatimuksia (Taulukko 2) ei ole sisällytetty suunniteltavien uusien prosessien käsittelytavoitteisiin. Esimerkiksi mahdollisesti kiristyvien typenpoistovaatimuksien täyttämiseen nämä prosessit eivät juurikaan auta.

Kohdepuhdistamoilla ei ole tehty haitta-aineidenpoiston pilot-kokeita, minkä vuoksi mitoitus jokaisessa kohteessa tehtiin laitoskohtaisten lähtötietojen ja suunnittelukirjallisuuden perusteella. Pilot-kokeita ja jätevesinäytteiden analyysikampanjoita suositellaan toteutettavaksi ennen yksityiskohtaisempaa suunnittelua (ks. kappale 3.1.4). Kohdekohtaiset prosessimitoitukset on raportoitu erillisissä laitoskohtaisissa suunnitteluraporteissa.

Lähtökohtana oli, että jokaiselle kohteelle suunnitellaan kaksi eri prosessivaihtoehtoa, jotka valittiin laitosten edustajien kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella huomioiden kunkin kohteen erityispiirteet sekä käyttäjien näkemykset. Lähtökohtana oli, että selvityksessä keskitytään prosesseihin, jotka ovat täydessä mittakaavassa pitkäkestoisesti koeteltua tekniikkaa, joista on referenssikohteita ja jotka lähtökohtaisesti soveltuvat Suomen olosuhteisiin. Käytännössä prosessivaihtoehdot rajautuivat näillä perustein otsonointiin ja aktiivihilisuodatukseen. Esimerkiksi jauhemaisen aktiivihillen käyttö rajautui pois prosessivaihtoehdoista Suomen nykyisten pääasiallisten puhdistamolietteen jatkokäyttötapojen (maatalous 46 %, viherrakentaminen 40 % ja maisemointi 7 %; VVY, 2021b) vuoksi. Muita prosessivaihtoehtoja (esim. kappaleessa 3.1.3 kuvattuja) kehitetään jatkuvasti ja todennäköisesti kiihtyvällä tahdilla päivitetyn yhdyskuntajätevesidirektiivin myötä, joten on varsin mahdollista, että seuraavan 20 vuoden aikana muiden prosessivaihtoehtojen teknisten valmiusasteiden noustessa osasta niistä tulee relevantteja vaihtoehtoja otsonoinnille ja aktiivihilisuodatukseen.

Seuraavassa kuvataan mitoituksessa käytettyä aineistoa ja periaatteita.

7.1.1 Otsonointi

- Otsoniannoksen mitoituksessa hyödynnettiin laitoskohtaisia tietoja käsiteltävän jäteveden virtaamavaihteluista ja laadusta (mm. DOC, NO₂-N, kiintoaine). Lähtötietoja kerättiin mahdollisuuksien mukaan laitoksilta ja tarvittaessa tehtiin analyysjä jätevedestä. Käsiteltävän jäteveden DOC:n oletettiin vaikuttavan tarvittavaan otsoniannokseen tasolla 0,7 mg O₃/mg DOC ja nitraatin tasolla 3,43 mg O₃/mg NO₂-N. Mitoitus perustuu kirjallisuuteen, jota on koottu raportin kappaleeseen 3.1.1 (mm. Miehe ym., 2017; Miehe, 2019; Stapf ym., 2020).

- Hapentarpeen mitoituksessa hyödynnettiin kirjallisuutta sekä happea ja otsonointiratkaisuja toimittavalta yritykseltä (Air Liquide Finland Oy) saatua informaatiota.
- Kontaktialtaan mitoituksessa hyödynnettiin kirjallisuutta (mm. Miehe ym., 2017; Stapf ym., 2020) sekä prosessitoimittajalta (Xylem Water Solutions Suomi Oy) saatua mitoitusinformaatiota. Mitoitusperusteina oli jäteveden viipymäaika altaassa (25 min) ja altaan syvyys vähintään 5 m.
- Mahdolliset esi- ja jälkikäsittelyprosessit mitoitettiin yleisten suunnitteluperusteiden sekä vastaavien referenssikohteiden suunnittelukokemusten perusteella. Prosessit (hiekkasuodatus jälkikäsittelynä sekä yhdessä kohteessa flotaatio esikäsittelynä) ovat suomalaisilla puhdistamoilla vakiintunutta tekniikkaa.

7.1.2 Aktiivihiihluodatus

- Aktiivihiihluodatuksen mitoituksessa hyödynnettiin laitoskohtaisia tietoja käsiteltävän jäteveden virtaamavaihteluista ja laadusta (mm. kiintoaine). Lähtötietoja kerättiin mahdollisuuksien mukaan laitoksilta ja tarvittaessa tehtiin analyysjä jätevedestä. Mitoituksessa hyödynnettiin kirjallisuutta, jota on koottu raportin kappaleeseen 3.1.2 (mm. EPA, 2000; Elavarthi, 2021).
- Mitoitusperusteina käytettiin mm. tyhjän pedin kontaktiaikaa (EBCT) 20 min mitoitusvirtamalle pesujen aikaan ja käsiteltyjä pettilavuuksia (BV) 25 000 kpl ennen suodatinmassojen vaihtoja. Mitoituksessa tarkasteltiin myös pintakuormia. Pyrkimyksenä oli, että pintakuormat pysyvät tasolla 5–7 m/h eri virtaamatilanteissa huomioiden pesutilanteet, joskin joissain kohteissa virtaamavaihtelut olivat niin suuria, että piikkivirtaamalla pintakuorma oli hieman suurempi. Aktiivihiihluodatuksen halkaisijaksi oletettiin tyypillistä aktiivihiihluodatuksessa käytettävää kokoluokkaa 0,5–2,0 mm.
- Vastavirtapesuja ja ilmahuuhteluita oletettiin tarvittavan 1 kpl/vrk/suodatin.

7.2 Rakennustekniset yksityiskohdat

Kullakin puhdistamolla selvitettiin uusien prosessiyksiköiden sijoitusmahdollisuudet nykyisen laitoksen alueelle. Tilatarkastelussa otettiin huomioon nykyiset vesienjohtamis- ja purkujärjestelyt, nykyiset rakennusosat ja rakenteet sekä osalla suunnittelukohteista myös suunnitteilla olevat muut lähitulevaisuuden laajennus- tai tehostushankkeet (typenpoiston tehostaminen, hygienisointi) ja niihin liittyvä lisärakentaminen. Lisäksi suoritettiin alustava hydraulinen tarkastelu mahdollisten välipumppaustarpeiden selvittämiseksi.

Kaikki suunnittelukohteet Turun kalliolaitosta lukuun ottamatta sijaitsevat rakennusteknisesti haastavilla paikoilla ja perustamisolosuhteet edellyttävät rakennuskaivantojen tuentaa ja perustamista paalutuksen varaan.

Lähes kaikissa suunnittelukohteissa lisärakentamiseen käytettävissä oleva tila on melko rajallinen nykyiset ja suunnitteilla olevat muut toiminnot huomioon ottaen. Uusien prosessiyksiköiden layout-suunnittelussa on tästä syystä pyritty etsimään tilaa säästäviä ratkaisuja, kuten esimerkiksi pesuve-sien tasausaltaiden sijoittaminen suodatinlaitosten alapuolelle. Otsonoinnin ja sen jälkikäsittelynä toimivan hiekkasuodatuksen rakennusten yhdistämismahdollisuuksien selvittämistä mahdollisen jatkosuunnittelun yhteydessä suositellaan.

Aktiivihiilisuodatinlaitoksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon suhteellisen usein suoritettava suodatinmateriaalin vaihto. Aktiivihiilirouheen poistamiseen suodattimista, siirtoihin, lastaukseen ja uuden suodatinmateriaalin asentamiseen tulee ajoneuvoille, työkoneille ja muulle kalustolle varata riittävän väljät ja toimivat tilat.

7.3 Vesienjohtaminen

Kaikissa kohteissa Turun kalliopuhdistamo lukuun ottamatta vesienjohtaminen arvioitiin olevan mahdollista järjestää ilman muuta välipumppausta kuin eri käsittelyvaihtoehtoihin sisältyvien suodatinlaitosten tulopumppaamot.

Turun laitoksella haasteena on valmiin, vapaan luolatilan puute. Laitoksella tutkittiin kahta päävaihtoehtoa: aktiivihiilisuodatuksen sijoittaminen nykyisiin hiekkasuodattimiin korvaamalla niiden suodatinmateriaali aktiivihiilirouheella tai uuden aktiivihiilisuodatuksen rakentaminen uuteen, louhitavaan luolatilaan. Jälkimmäinen edellyttää sekä tulo- että purkupumppausta uuden suodatinlaitoksen yhteyteen ja pitkiä käsittelyn veden siirtolinjoja aktiivihiilisuodatukselta laitoksen purkukana-viin, koska uusi suodatinlaitos joudutaan sijoittamaan melko kauas nykyisen hiekkasuodatuksen taakse, olemassa olevan laajennustilavarauksen alueelle.

Seinäjoen laitoksella aktiivihiilisuodatus ja Riihimäen laitoksella otsonoinnin kontaktialtaat voidaan rakentaa olemassa olevien hiekkasuodatinlaitosten välittömään yhteyteen siten, että vesienjohtaminen on mahdollista kokonaan ilman uusia pumppauksia.

7.4 Prosessivaihtoehtojen toteutusperiaatteet

Uudisrakennukseen sijoitettava aktiivihiilisuodatus on kohteesta ja ko. tilaajan toivomuksista riip-puen suunniteltu toteutettavaksi joko perinteisenä avosuodattimena (Hämeenlinna, Oulu) tai nk. jatkuvatoimisena suodattimena (Kouvola, Seinäjoki).

Avosuodatinvaihtoehto on suunniteltu toteutettavaksi kumpaankin kohteeseen samalla periaatteella: betonirakenteiset suodatinlaitteet rakennetaan kahteen riviin, joiden välissä olevaan putkitilaan sijoitetaan tulevan ja poistuvan veden jako- ja keruuputkisto. Suodatinlaitoksen tulopumppaamosta käsiteltävä vesi johdetaan suodattimien yläosaan. Veden virtaussuunta suodatustilassa on ylhäältä alas. Huuhtelu vedellä ja ilmalla tapahtuu vastavirtaan alhaalta ylös.

Suodatinpohjiksi on valittu teräsrakenteinen suodatinpohjaelementti, koska sen arvioidaan olevan kestävämpi vaihtoehto, kun aktiivihieiltä määrääjain vaihdetaan suodattimiin. Lisäksi tämä ratkaisu mahdollistaa hieman perinteistä betonirakenteista suutinpohjavaihtoehtoa suuremman hiilimäärän sijoittamisen altaaseen, koska aktiivihieiden alla ei tarvita erillistä suojasorakerrosta. Tällä on merkitystä Turun kalliolaitokselle suunnitellussa vaihtoehdossa, jossa hyödynnetään nykyisiä hiekkasuodattimia.

Suodatettu vesi ja huuhteluissa poistuva likainen huuhteluvesi kootaan suodatinlaitteiden ja putkitilan alapuolelle sijoitettaviin tasausaltaisiin. Suodatetun veden altaasta vesi purkautuu painovoimaisesti laitoksen muuhun käsittelyyn. Altaan tarkoituksena on toimia puhtaan huuteluveden varastoaltaana. Likainen huuhteluvesi pumpataan tasaisena virtana laitoksen käsittelyprosessin alkuun.

Jatkuvatoimisessa suodatinvaihtoehdossa suodatus ja suodattimien pesu tapahtuvat samanaikaisesti, eikä erillisiä pesuveden varasto- tai tasausaltaita tarvita. Suodatukseen tuleva vesi nostetaan tulopumpuilla betonisella väliseinällä toisistaan erotettujen suodatinlaitteiden tulokanavaan. Tulokanavasta vesi jaetaan suodatinlaitteisiin, joissa on useita erillisiä suodatinyksiköitä. Kukin suodatinyksikkö käsittää betonisen pohjakartion ja sen keskellä pystysuoran putkisto-osan (hiekkapesuri). Vesi syötetään suodattimien pohjalle ja se suodattuu aktiivihiekerroksen läpi ylös virratessaan. Suodatettu vesi purkautuu suodatinlaitteiden yläosan ylivuotoreunan kautta purkukanavistoon ja edelleen painovoimaisesti puhdistamon muuhun käsittelyyn.

Likainen huuhteluvesi on alustavan tarkastelun perusteella kummassakin kohteessa mahdollista johtaa painovoimaisesti puhdistamon käsittelyprosessin alkuun. Viettoputki on kuitenkin hyvä varustaa huuhtelumahdollisuudella (esimerkiksi tekninen vesi).

Kahdessa kohteessa on tutkittu mahdollisuuksia muuttaa nykyinen hiekkasuodatus aktiivihieilisuodattimeksi. Riihimäen puhdistamon jatkuvatoimisessa hiekkasuodattimessa suodatinmassojen vaihtamisen lisäksi tarvitaan jonkin verran koneistoteknisiä muutoksia (hiekkapesuri ja sen mammut-pumppu). Turun puhdistamolla tämä edellyttää nykyisten suutinpohjien (betonielementit muovisuuttimin) uusimista ja muita pienempiä rakennusteknisiä muutostöitä sekä jokaisen suodatinlaitteesta suodatetun veden, huuhteluveden ja -ilman putkistojen muutoksia.

Otsonointi käsittää laitteen otsonaattorilaitteistoille ja otsonoinnin kontaktialtaan. Otsoni on tässä selvityksessä suunniteltu valmistettavaksi nesteytetystä happikaasusta, jonka varastosäiliö sijoitetaan otsonaattoritalan läheisyyteen. Jäännösotsonin hävittämiseen tarvittaville laitteistoille rakennetaan laitteen kontaktialtaan kannelle.

30.11.2023

HH

Otsonoinnin kontaktialtaat ovat vesisyvyydeltään vähintään 5 metriä syviä betonialtaita. Suuri vesisyvyys on edellytys tehokkaalle kaasun siirrolle nesteeseen. Tämä oli rajoittava tekijä, kun tutkittiin mahdollisuuksia hyödyntää tähän tarkoitukseen osalla laitoksista olevia entisiä kloorauksen kontaktialtaita, joissa vesisyvyys on yleensä selvästi pienempi.

Kontaktialtaat jaetaan vähintään kahteen rinnakkaiseen käsittelylinjaan ja varustetaan tulo- ja purkupään vesikanavin ja sulkuluukuin siten, että tarvittavat huollot on mahdollista suorittaa linja kerrollaan käsittelyä kokonaan keskeyttämättä.

Kontaktialtaat jaetaan lohkoihin ali- ja ylivirtausväliseinillä siten, että veden virtaus altaassa on enimmäkseen pystysuuntaista. Otsonin syötön diffuusorit sijoitetaan altaissa lohkoihin, joissa veden virtaussuunta on alas.

Otsonin käsittelyssä tulee huomioida kaasun haitallisuus terveydelle (mm. putkistojen ja altaiden tiiveys, ilmanvaihto, jäännösotsonin hävittäminen).

Otsonoinnin jälkikäsittelynä toimii hiekkasuodatus, joka on tyypiltään suunnittelukohteesta ja ko. tilaajan toivomuksista riippuen joko edellä kuvattu avosuodatin tai jatkuvatoiminen suodatin.

Muista otsonoinnin toteutuskokonaisuuksista poiketen Seinäjoen puhdistamolle on suunniteltu otsonoinnin esikäsittelyksi flotaatio. Esikäsittely ennen otsonointia on Seinäjoella tarpeen johtuen muita tarkastelukohteita korkeammasta kiintoainepitoisuudesta.

8 Uusien prosessiyksiköiden vaikutukset

8.1 Energia

Tarkasteltujen haitta-aineidenpoistoprosessien vaihtoehtojen sähköenergiantarvetta arvioitiin osana vaikutustarkastelua. Lähtötiedot arviointiin saatiin laitoskohtaisista esisuunnitelmista.

Otsonointivaihtoehtojen sähköenergian laskennassa huomioitiin seuraavat sähkökuluttavat toiminnot:

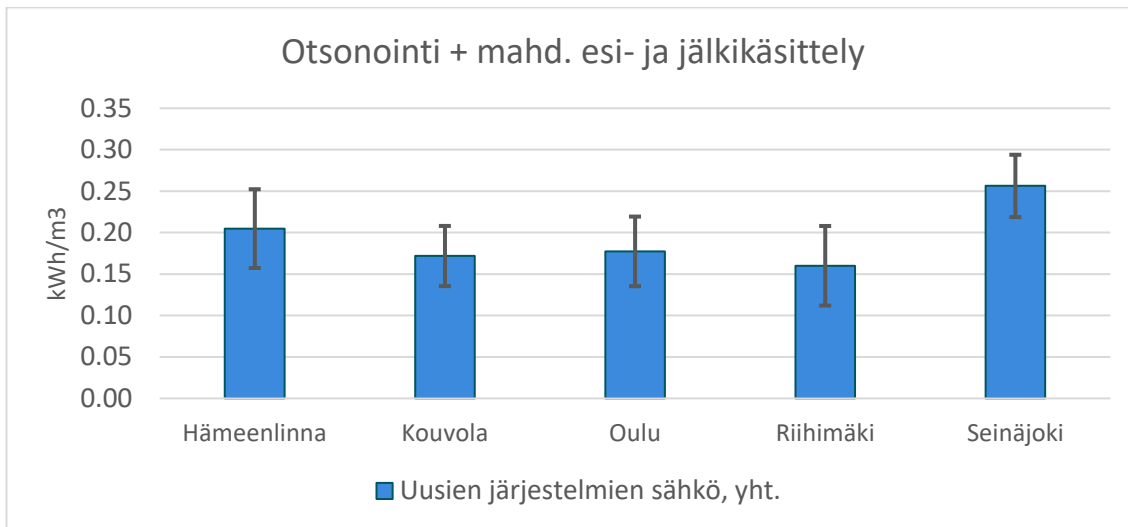
- otsonigeneraattori
- uudet välipumppaukset
- uudet pesuvesipumppaukset (jälkikäsittely)
- uudet huuhteluilmakompressorit (jälkikäsittely)
- esikäsittelyprosessit.

Aktiivihiihisuodatusvaihtoehtojen sähköenergian laskennassa huomioitiin seuraavat sähkökuluttavat toiminnot:

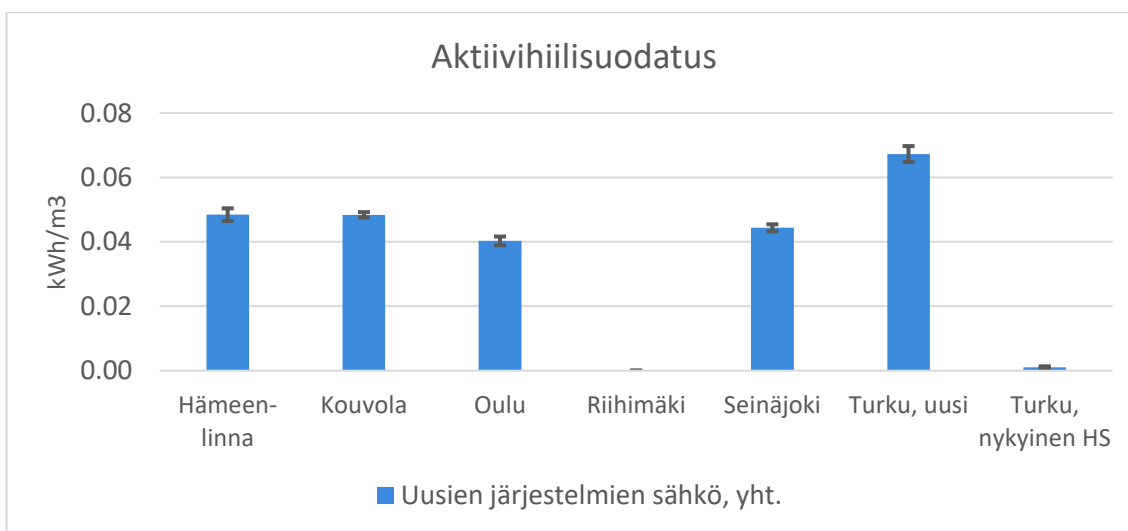
- uudet välipumppaukset
- uudet pesuvesipumppaukset
- uudet huuhteluilmakompressorit.

Sähkökulutusarvioihin laskettiin vain laitoksilla tapahtuva sähkökulutus. Esimerkiksi nestemäisen hapen valmistamiseen tarvittava sähkökulutus ei sisälly laskelmiin, koska esisuunnitelmissa on oletettu, että happi valmistetaan muualla ja tuodaan säiliöautoilla laitoksille. Sähköenergiatarkastelussa ei ole huomioitu sitä, että otsonoinnissa yli jäävää happirikasta kaasua on mahdollista hyödyntää esimerkiksi ilmastusprosessissa (Jukka Isometsä, Air Liquide Finland Oy, 4.10.2023), mikä vaatii muutoksia puhdistamoiden nykyisiin laitteisiin ja ilmastusjärjestelmään kokonaisuudessaan.

Uusien prosessiyksiköiden sähkökulutusarviot suhteutettiin laitosten keskimääräisiin tulovirtaamiin. Otsonointitarkasteluiden sähkökulutukset jätevesikuutiota kohden on esitetty kuvassa 6a ja aktiivihiihisuodatustarkasteluiden kuvassa 6b. Otsonigeneraattorin sähkökulutuksen arviointiin käytettiin kirjallisuusarvoa 10 kWh/kgO₃ (Stapf M. ym., 2020).



(a)



(b)

Kuva 6. Uusien (a) otsonointiin ja (b) aktiivihiiლისუodatuseseen liittyvien prosessiyksiköiden sähkökulutus jätevesikuutiota kohden tarkastelluilla jätevedenpuhdistamoilla. Pylväiden janat kuvaavat laskentaepävarmuutta.

Koska jätevesiprosessien esisuunnittelu sisältää aina jonkin verran epävarmuuksia, joita tarkennetaan yksityiskohtaisemmissa suunnitteluvaiheissa, on sähkökulutuslaskennassa huomioitu mitoituksen epävarmuutta seuraavasti:

- Otsonoinnissa laskettiin sähkökulutus kohdepuhdistamoiden mitoitusilanteen lisäksi oletuksilla, joiden mukaan otsonia tarvittaisiin 30 % mitoitusarvoa vähemmän tai enemmän

- Aktiivihiihluodatuksessa laskettiin sähk6nkulutus kohdepuhdistamoiden mitoitustilanteen lisäksi oletuksilla, joiden mukaan aktiivihiihluodattimia pestäisiin 30 % mitoitusarvoa vähemmän tai enemmän

Pylväskuvaajiin on merkitty laskentaepävarmuutta kuvaavat janat edellisessä kappaleessa kuvatus laskentatavan mukaisesti.

Otsonointiratkaisuiden sähk6nkulutuksen välillä on puhdistamokohtaisia eroja (Kuva 6a), jotka selittyvät suurimmalta osin olemassa olevan hiekkasuodatuksen hyödyntämisestä jälkikäsitteilynä (Riihimäki) ja esikäsitteilyprosessiksi suunnitellun flotaation sähk6nkulutuksella (Seinäjoki). Lisäksi laitojen välipumppaustarpeissa on eroja, jotka vaikuttavat jonkin verran sähk6nenergiatarpeeseen. Sähk6nkulutukseen vaikuttaa merkittävästi tarvittava otsoniannos, mikä havaitaan kuvan 6a laskentaepävarmuutta kuvaavista janoista.

Kahdessa kohteessa (Riihimäki ja Turku) on tarkastelu aktiivihiihluodatusprosessin toteuttamista nykyisin käytössä oleviin hiekkasuodattimiin olettaen, että suodattimien pesujärjestelyjä voidaan soveltaa nykyisen kaltaisesti suodatusmassojen vaihdon jälkeen. Tästä johtuen niiden sähk6nkulutuksen lisäystä ei ole tai se on minimaalinen (Kuva 6b). Muutoin erot aktiivisuodatusratkaisuiden sähk6nkulutuksessa eri puhdistamoilla selittyvät pääosin erilaisilla välipumppaustarpeilla. Kuvasta havaitaan myös, että pesuveden pumppauksen ja ilmahuuhtelun sähk6nkulutus on suhteellisen pientä verrattuna koko jätevesimäärän nostopumppaukseen, sillä pesutiheyden epävarmuuteen liittyvät janat pylväissä ovat varsin lyhyitä.

Taulukossa 7 on tarkastelujen haitta-aineidenpoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden sähk6nkulutuksen tilastollisten tunnuslukujen yhteenveto. Suluissa on mediaanin ja keskiarvon vaihteluväli huomioitaessa kuvassa 6 janoilla esitetty epävarmuusalue.

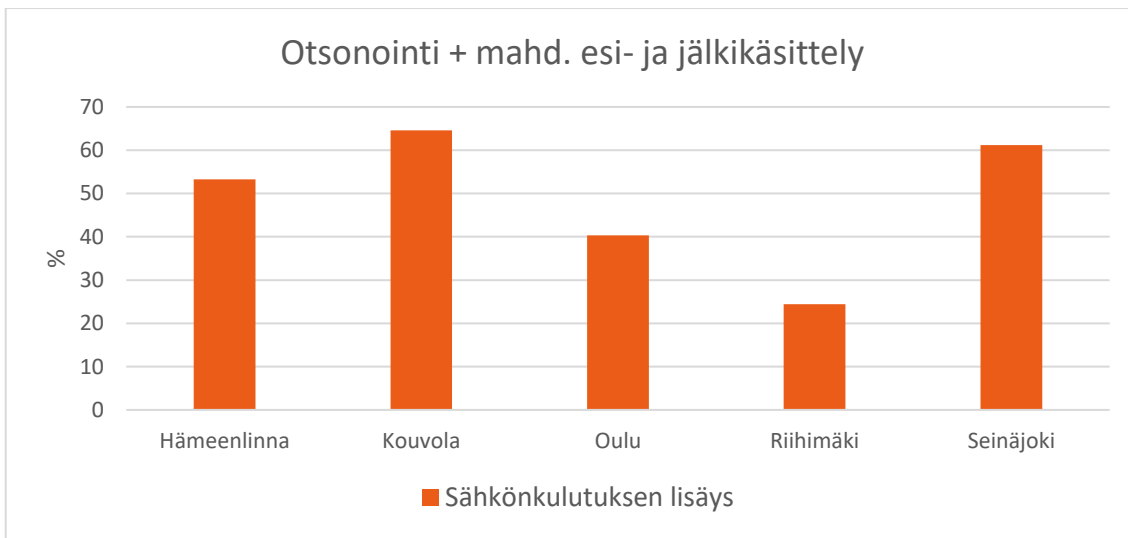
Taulukko 7. Eri laitojen haitta-aineidenpoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden sähk6nenergiakulutuksen tilastolliset tunnusluvut.

Tilastollinen tunnusluku	Otsonointi (sis. esi- ja jälkikäsitteilyn)	Aktiivihiihluodatus
n	5	7
mediaani, kWh/m ³	0,18 (0,14–0,22)	0,04 (0,04–0,05)
keskiarvo, kWh/m ³	0,19 (0,15–0,24)	0,04 (0,03–0,04)
keskihajonta, kWh/m ³	0,03	0,02
minimi, kWh/m ³	0,16	0
maksimi, kWh/m ³	0,26	0,07

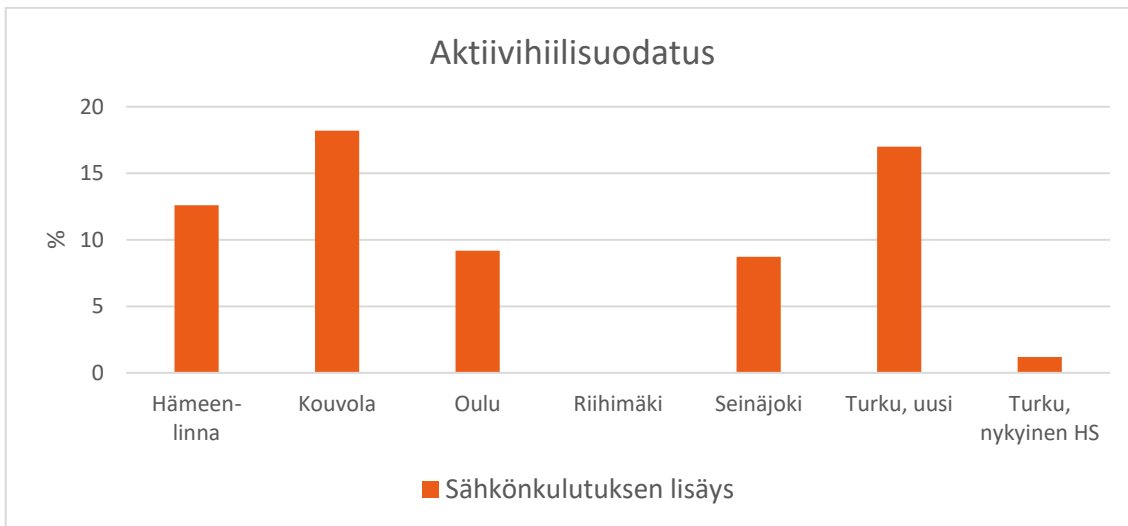
Taulukosta havaitaan, että otsonoinnin (sisältäen mahdolliset uudet esi- ja jälkikäsitteily-yksiköt) sähk6nkulutus tavanomaisesti arvioitu 4–6 kertaa suuremmaksi kuin aktiivihiihluodatuksen. Otsonointiratkaisuihin liittyvässä sähk6nkulutuksessa on myös suurempaa laitospohtaista hajontaa kuin

aktiivihiilisuodatuksen sähkökulutuksen hajonnassa, mikä johtuu pääosin erilaisista esi- ja jälkikäsittelytarpeista.

Tarkastelukohteiden haitta-aineidenpoistoon liittyvän sähkökulutuksen kasvua verrattiin laitosten jätevedenpuhdistusprosessin nykyiseen sähkökulutukseen. Laitosten nykytilannetta koskevat sähkökulutukset on saatu lähtötietoina vertailun mahdollistamiseksi. Otsonointitarkasteluiden arvioitu sähkökulutuksen suhteellinen kasvu laitoksilla nykytilanteeseen nähden on esitetty kuvassa 7a ja aktiivihiilisuodatustarkasteluiden sähkökulutuksen suhteellinen kasvu kuvassa 7b.



(a)



(b)

Kuva 7. Uusien (a) otsonointiin ja (b) aktiivihiilisuodatukseen liittyvien prosessiyksiköiden aiheuttama sähkökulutuksen suhteellinen kasvu tarkastelluilla jätevedenpuhdistamoilla.

Otsonoinnin ja sen mahdollisten esi- ja jälkikäsittelyprosessin vaatiman sähkönkulutuksen kasvun tarkastelluissa kohteissa on arvioitu olevan keskiarvona 49 % (vaihteluväli 24–65 %). Aktiivihiili-suodatuksen vaatiman sähkönkulutuksen kasvun tarkastelluissa kohteissa on arvioitu olevan keskiarvona 10 % (vaihteluväli 0–18 %). Tarkastelujen puhdistamoiden nykyisen sähkönkulutuksen keskiarvo on lähtötietojen perusteella 0,45 kWh/m³. Laitisen ym. (2014) selvityksessä raportoitiin suomalaisen kokoluokan > 10 000 m³/d (n=20) jätevedenpuhdistamoiden sähkönkulutuksen keskiarvoksi 0,41 kWh/m³. Koska kohdepuhdistamoiden sähkönkulutus on lähellä tavanomaista tasoa, voidaan arvioida, että haitta-aineiden poistoprosessien suhteelliset vaikutukset sähkönkulutukseen tarkastelluilla puhdistamoilla ovat kohtuullisen hyvin yleistettävissä muille suomalaisille vastaavan kokoluokan puhdistamoille.

8.2 Kustannukset

Kaikki jäljempänä esitetyt summat on ilmoitettu ilman arvonlisäveroa.

8.2.1 Investointikustannukset

Investointikustannuksista on selvityksen yhteydessä tarkasteltu erikseen rakennusteknisten töiden, koneistoteknisten töiden, sähköistyksen, LVI-töiden sekä automaation ja instrumentoinnin kustannuksia. Arviotuihin urakkasummiin on lisätty 25 % suunnittelun, rakennuttamisen ja muutostöiden kustannuksia.

Esiselvitysvaiheessa laitossuunnittelu jää melko karkealle luonnostasolle, joten myös kustannusarviointi sisältää runsaasti epävarmuuksia. Tarkemman arvion laatiminen edellyttää yksityiskohtaisempaa suunnittelua. Lisäksi on odotettavissa, että haitta-aineiden poiston etenemiseen konkreettiseen rakennusvaiheeseen puhdistamoilla kuluu useita vuosia ennen kuin erilaiset viranomaispäätökset, lainsäädännön valmistelu ja tarkempi suunnittelu valmistuvat. Yleisen rakennuskustannustason ja rakennusalan kilpailutilanteen vaihtelu lisää osaltaan investointikustannusten arvioinnin epävarmuutta. Näistä syistä edellä muodostettuun loppusummaan on lisätty vielä ylimääräinen kustannusvaraus 25 %.

Kustannusarvioinnin tukena ja tulosten vertailukohteina on mahdollisuuksien mukaan käytetty aiemmin toteutettuja, ominaisuuksiltaan vastaavia laitospaikoita, joiden toteutuneet urakkasummat on tarkistettu ao. aikavälin rakennuskustannusindeksin muutoksella.

Havaintoja investointikustannusarvioinnin tuloksista:

- Tulosten välillä on vaihtelua riippuen kohteeseen valitusta suodatinlaitostyyppistä. Jatkuva-toiminen suodatinlaitos ei sisällä pesuveden tasausaltaita niihin liittyvine pumppauksineen, mutta toisaalta jatkuvatoiminen suodatinjärjestelmä sisältää enemmän suodatinkohtaisia laiteasennuksia.

- Avosuodatinratkaisussa käytetty teräksinen suodatinpohja on perinteistä betonielementtirakenteista suutinpohjaa jonkin verran kalliimpi vaihtoehto, mikä nostaa avosuodatuksen kustannuksia.
- Aktiivihilivaihtoehdossa rakennetaan vain yksi uusi prosessiyksikkö, mutta se on joka kohteessa hieman suurempi kuin vastaava otsonoinnin jälkikäsittely (hiekkasuodatus, poikkeuksena Seinäjoen flotaatio)
- Turun puhdistamolla uuteen luolatilaan sijoitettava vaihtoehto poikkeaa toteutustavaltaan ja kustannusrakenteeltaan selvästi muista, koska sen rakentaminen edellyttää louhimista

Laitoskoon vaihtelun lisäksi suunnitellut toimenpiteet vaihtelevat kohteittain: osassa uudisrakentamista, osassa vain saneeraustyyppisiä muutostöitä (Turun laitoksella aktiivihilisuodatus nykyisissä hiekkasuodattimissa, Riihimäen laitoksella hiekkasuodattimen muutos aktiivihilisuodatuksiksi vain vähäisin toimenpitein), Seinäjoen laitoksella muista poikkeava käsittelykokonaisuus (flotaatio otsonoinnin esikäsittelynä), Turun laitoksella merkittävä laajennus uusine luolatiloineen uuden aktiivihilisuodatuksen rakentamiseksi jne. Tästä syystä investointikustannusarvion kokonaissummien käsittely ei tässä yhteydessä ole tarkoituksenmukaista, vaan investointikustannukset on eritelty tarkemmin laitoskohtaisissa erillisraporteissa.

Yleisesti voidaan todeta, että kustannusarviot vaihtelevat välillä noin 1,6–39 miljoonaa euroa sisältäen edellä mainitun ylimääräisen kustannusvarauksen. Ulkona sijaitsevien laitosten uudisrakennuskohteissa aktiivihilivaihtoehdon ja otsonointivaihtoehdon investointikustannukset ovat melko lähellä toisiaan aktiivihilivaihtoehdon ollessa hieman kalliimpi. Seinäjoen laitos poikkeaa tässä suhteessa muista, koska otsonointi edellyttää esikäsittelyä (flotaatio), mikä nostaa vaihtoehdon selvästi kalliimmaksi. Myös Riihimäen laitoksella otsonointi on kalliimpi vaihtoehto, koska se edellyttää uudisrakentamista. Turun kalliolaitoksessa uudisrakentamismuutoksen vaihtoehto on luonnollisesti moninkertaisesti saneerausvaihtoehtoa kalliimpi.

8.2.2 Käyttökustannukset

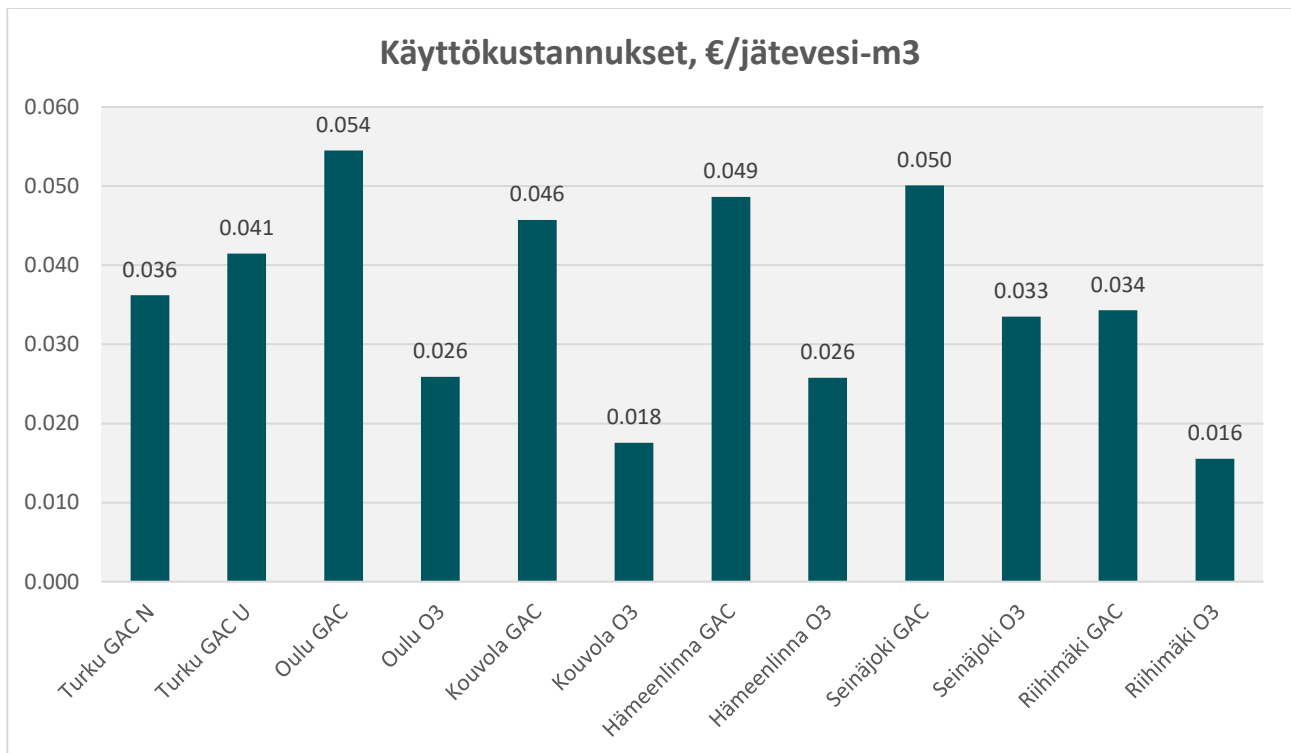
Käyttökustannuksista on tässä selvityksessä tarkasteltu sähköenergia käsittelyprosessien suurimpien sähkönkuluttajien osalta, prosessikemikaalit (happi, ferrisulfaatti, polymeeri), suodatinmassat (aktiivihili) sekä korjaukset ja kunnossapito. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty talotekniikan energiankulutus ja henkilöstökulut.

Käyttökustannusten laskennassa on käytetty seuraavia yksikköhintoja ja laskentaperusteita:

- sähkön hinta (sisältäen energian ja siirron kustannukset) laitoskohtaisesti kun se on ollut saatavilla, muuten käytetty valtakunnallisten tilastojen keskiarvohintaa
- aktiivihili 1 500 €/m³
- happi 200 €/t, happiaseman vuokra 1 000 €/kk

- ferrisulfaatti 300 €/t
- polymeeri 4 000 €/t
- korjaus ja kunnossapito: 0,5 % rakennusteknisten töiden kustannusarviosta ja 2,5 % koneistoteknisten töiden kustannusarviosta.

Käyttökustannukset on eritelty tarkemmin laitoskohtaisissa erillisraporteissa. Käsiteltyä jätevesikuutiota kohti laskettuna käyttökustannukset vaihtelevat laitoksittain ja prosessivaihtoehdoittain välillä noin 0,016–0,054 €/jätevesikuutio (Kuva 8).



Kuva 8. Tarkasteltujen haitta-aineiden poistoprosessien käyttökustannusarviot kohdepuhdistamoilla.

Yllä olevasta kaaviosta on nähtävissä, että aktiivihiilivaihtoehdon käyttökustannukset ovat kaikissa kohteissa huomattavasti otsonointia korkeammat. Suurimmaksi osaksi eron aiheuttaa aktiivihiili, jonka regeneroinnin ja uusimisen kustannukset ovat huomattavan korkeat. Aktiivihiili tuodaan ulkomailta ja sen hinta vaihtelee melko paljon markkinatilanteen ja mm. regeneroinnissa käytettävän maakaasun hintamuutosten mukaan. Tässä selvityksessä käytetty yksikköhinta aktiivihiilelle on hintavaihtelun yläpäässä.

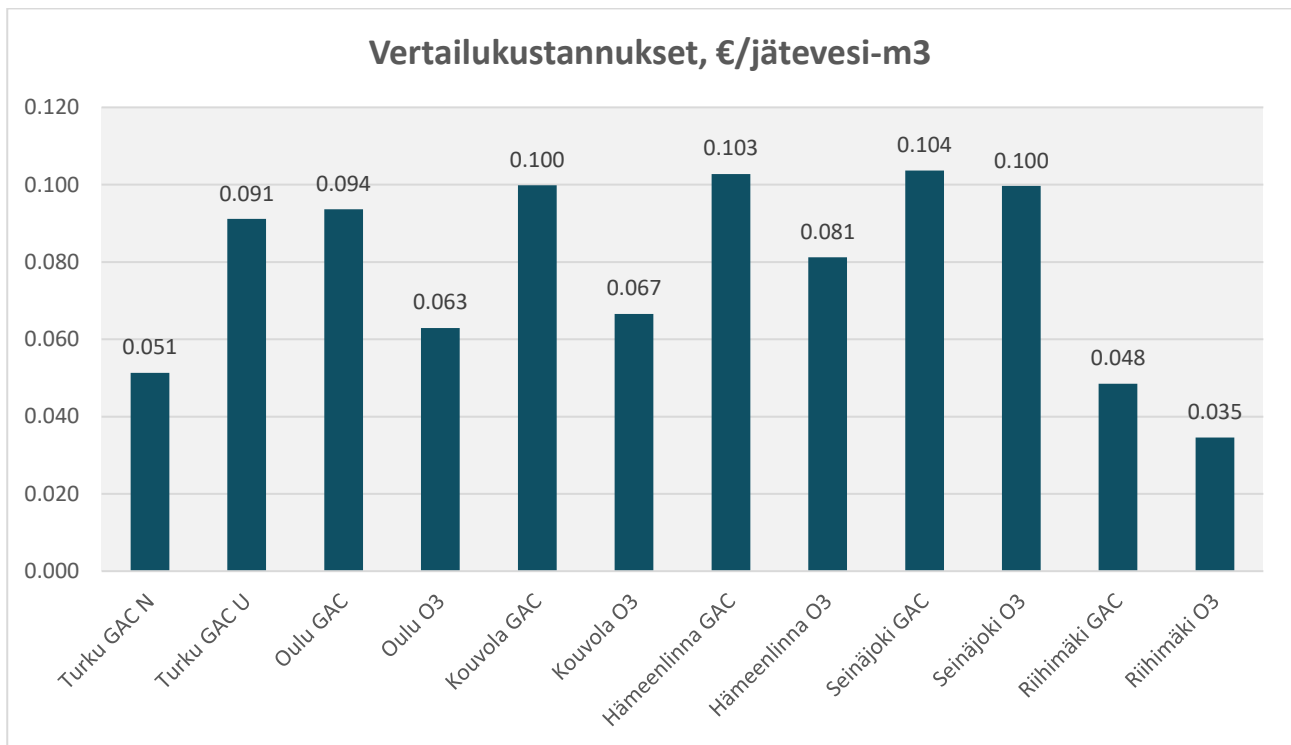
Sähköenergian osuus kokonaiskustannuksista on aktiivihiilivaihtoehdoissa pieni. Otsonin valmistaminen hapesta käyttökohteessa kuluttaakin melko paljon energiaa ja se muodostaa suuren osan otsonointivaihtoehdon kokonaiskustannuksista.

Kun jätevedenpuhdistuksen käyttökustannusten mediaani laskutettua jätevesikuutiota kohti on (VVY, 2022) noin 0,35 €, haitta-aineiden poistosta aiheutuva käyttökustannusten nousu voi olla noin 5–15 % menetelmästä ja kunkin kohteen nykyisistä käyttökustannuksista riippuen.

Eri vaihtoehtojen investointi- ja käyttökustannuksista on muodostettu vertailukustannukset. Tätä varten investointikustannuksille on laskettu vuosikustannukset nk. annuiteettimenetelmällä, jonka laskentaperusteina on käytetty:

- investointien takaisinmaksuajat: rakenteet 30 vuotta, muu tekniikka 15 vuotta
- laskentakorkokanta investointien vuosikustannuksille 5 %

Vertailukustannukset käsiteltyä jätevesikuutiota kohti kullekin kohteelle ja vaihtoehdolle on koottu kaavioon kuvassa 9.



Kuva 9. Tarkasteltujen haitta-aineiden poistoprosessien vertailukustannusarviot kohdepuhdistamoilla.

8.3 Hiilijalanjälki

8.3.1 Laskentarajaus ja päästökertoimet

Tarkasteltujen haitta-aineidenpoistoprosessien vaihtoehtojen käytönaikaista hiilijalanjälkeä arviointiin osana vaikutustarkastelua. Lähtötiedot arviointiin saatiin laitoskohtaisista esisuunnitelmista ja kirjallisuudesta.

Otsonoinnin hiilijalanjäljen laskennassa huomioitiin seuraavat uusiin prosessiyksiköihin (sisältäen mahdolliset esi- ja jälkikäsitteily-yksiköt) liittyvät käyttöhyödykkeet:

- sähköenergia
- kemikaalit (happi, saostuskemikaali, polymeeri)
- kuljetukset

Aktiivihiiisuodatuksen hiilijalanjäljen laskennassa huomioitiin seuraavat uusiin prosessiyksiköihin liittyvät käyttöhyödykkeet:

- sähköenergia
- aktiivihiihi
- kuljetukset

Laskennassa pyrittiin käyttämään paikallisiin olosuhteisiin sopivia päästökertoimia (CO_{2e}/toiminnallinen yksikkö). Ne koottiin eri lähteistä seuraavasti:

- Laitoskohtaiset sähköenergian päästökertoimet, jotka riippuvat laitoksilla käytettävästä sähkön tuotantotavoista (lähtötiedot laitoksilta)
- Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökerroin 77 kg CO₂/MWh (Motiva 2023)
- Kemikaalitoimittajilta saadut kemikaalituotteiden päästökertoimet (Kemira Oyj, Air Liquide Finland Oy)
- Kuljetuksien päästökertoimet: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n Lipasto-tietokanta
- Aktiivihiihen päästökertoimet Suomessa tehdystä opinnäytetyöstä (Vilén, 2021). Kirjallisuuslähteen kivihiilipohjaisen aktiivihiihen päästökertoimien laskentarajaus sisältää uuden aktiivihiihen tuotannon, aktiivihiihen regeneroinnin, jätetuhkan käsittelyn ja kuljetukset. Päästökertoimet sisältävät kuljetuksen päästöt Helsinkiin, mikä on huomioitu kohdekohtaisesti tämän selvityksen laskennassa kuljetuspäästöjen arvioinnissa.

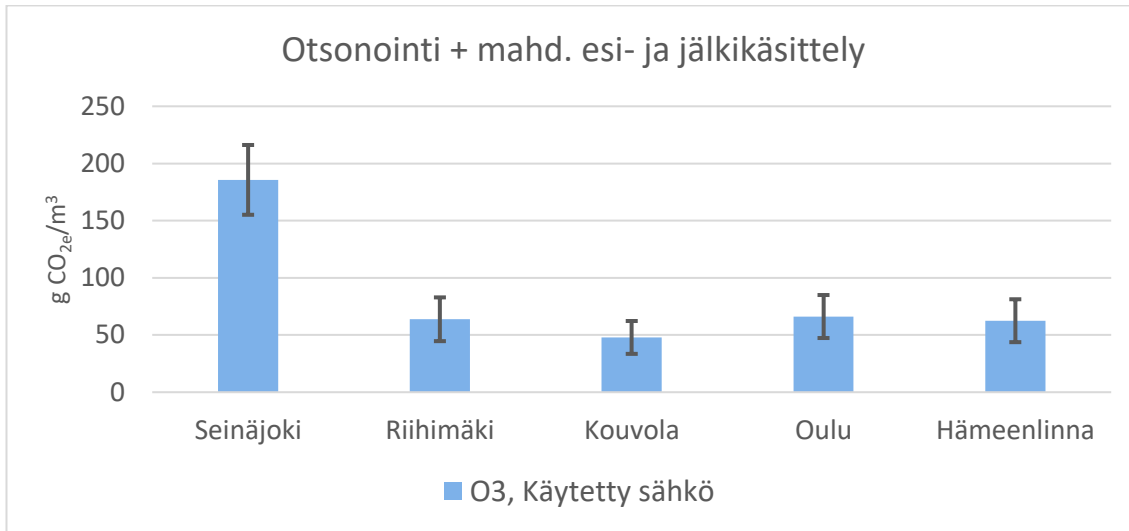
Rakeista aktiivihiiltä regeneroitaessa osa siitä hajoaa, mikä vuoksi regeneroitua hiiltä tarvitsee täydentää korvaushiilellä. Esimerkiksi suomalaisella talousvesilaitoksella korvaushiilen osuus on 10–20 % (Lehtoranta ym. 2023). Laskennassa oletetaan, että laitoksilla käytetään kivihiilipohjaista regeneroitavaa hiiltä sekä tarvittava määrä korvaushiiltä. Oletuksena on kuitenkin, että otettaessa uusi prosessi käyttöön, siinä käytetään uutta aktiivihiiltä. Alkuvaiheen uuden aktiivihiilen päästöt on laskennassa jaettu 15 vuodelle.

Koska jätevesiprosessien esisuunnittelu sisältää aina jonkin verran epävarmuuksia, joita tarkennetaan yksityiskohtaisemmissa suunnitteluvaiheissa, on hiilijalanjälkilaskennassa huomioitu mitoituksen epävarmuutta seuraavasti:

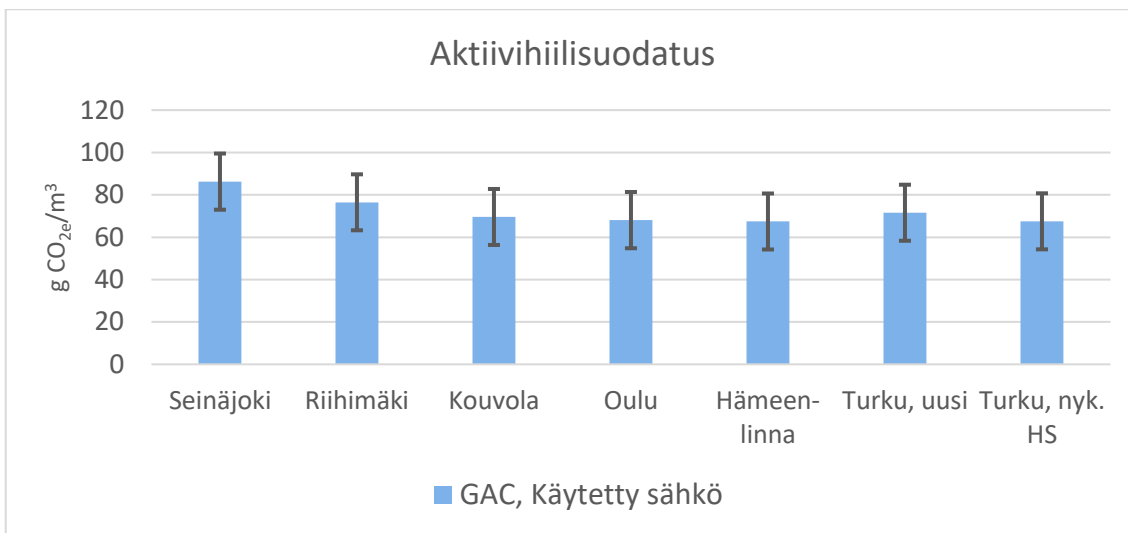
- Otsonoinnissa laskettiin hiilijalanjälki kohdepuhdistamoiden mitoitusilanteen lisäksi oletuksilla, joiden mukaan otsonia tarvittaisiin 30 % mitoitusarvoa vähemmän tai enemmän. Tämä vaikuttaa laskennassa hapenvalmistuksen, sähkönkulutuksen ja kuljetusten päästöihin.
- Aktiivihiilisuodatuksessa laskettiin hiilijalanjälki kohdepuhdistamoiden mitoitusilanteen lisäksi oletuksilla, joiden mukaan aktiivihiiltä vaihdettaisiin suodattimiin vuosittain 30 % mitoitusarvoa vähemmän tai enemmän. Tämä vaikuttaa laitoksilla vaihdetun aktiivihiilen (reaktivoitu hiili sekä uusi korvaushiili) ja kuljetusten päästöihin.

8.3.2 Laskennan tulokset

Uusien prosessiyksiköiden käytönaikaiset CO_{2e}-päästöt suhteutettiin jätevedenpuhdistamoiden keskimääräisiin tulovirtaamiin. Otsonointitarkasteluiden CO₂-päästöt jätevesikuutiota kohden on esitetty kuvassa 10a ja aktiivihiilisuodatustarkasteluiden kuvassa 10b. Laskennassa on käytetty laitoskohtaisia sähköenergia päästökertoimia. Pylväskuvaajiin on merkitty laskentaepävarmuutta kuvaavat janat edellisessä kappaleessa kuvatun laskentatavan mukaisesti.



(a)



(b)

Kuva 10. Uusien (a) otsonointiin ja (b) aktiivihiihisuodatukseen liittyvien prosessiyksiköiden käytön-aikainen hiilijalanjälki tarkastelluilla jätevedenpuhdistamoilla. Laskennassa käytetty laitoskohtaisia sähkön päästökertoimia. Pylväiden janat kuvaavat laskentaepävarmuutta.

Taulukossa 8 on tarkastelujen haitta-aineidenpoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden käytön-aikaisen hiilijalanjäljen tilastollisten tunnuslukujen yhteenveto. Suluissa on mediaanin ja keskiarvon vaihteluväli huomioitaessa kuvassa 10 janoilla esitetty epävarmuusalue.

Taulukko 8. Eri laitosten haitta-ainepoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden hiilijalanjäljen tilastolliset tunnusluvut. Laskennassa käytetty laitoskohtaisia sähköenergian päästökertoimia.

Tilastollinen tunnusluku	Otsonointi (sis. esi- ja jälkikäsittelyn)	Aktiivihiilisuodatus
n	5	7
mediaani, g CO _{2e} /m ³	64 (45–83)	70 (56–83)
keskiarvo, g CO _{2e} /m ³	85 (65–106)	72 (59–86)
keskihajonta, g CO _{2e} /m ³	51	6
minimi, g CO _{2e} /m ³	48	67
maksimi, g CO _{2e} /m ³	186	86

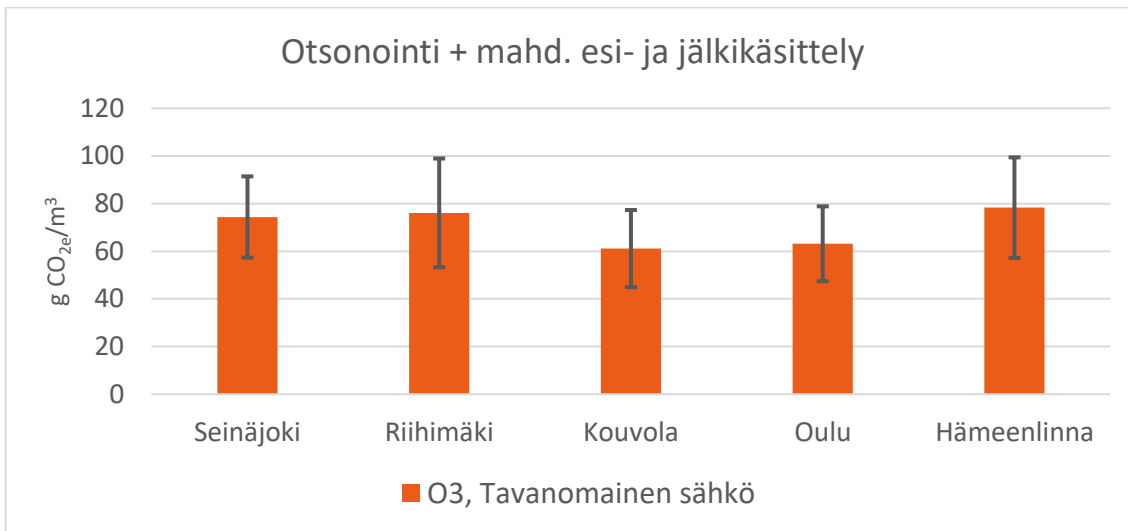
Tarkasteluilla puhdistamoilla otsonoinnin ja aktiivihiilisuodatuksen hiilijalanjäljet ovat samaa suuruusluokkaa. Otsonoinnin hiilijalanjäljissä on merkittävästi enemmän vaihtelua puhdistamoisen välillä, mikä liittyy ostetun sähkön tuotantotapaan. Aktiivihiilisuodatuksen hiilijalanjälki on keskimäärin hieman otsonoinnin hiilijalanjälkeä suurempi.

Neljälle tarkastelluista puhdistamoista ole tehty käytönaikainen hiilijalanjälkilaskelma koskien vuosia 2017–19 (Awaitey, 2021). Puhdistamoilla on laskennan jälkeen tapahtunut muutoksia (mm. Hämeenlinnan puhdistamon saneeraus) ja ostetun sähköenergian tuotantotavoissa on myös muutoksia. Jotta voidaan karkealla tasolla arvioida haitta-aineprosessien vaikutusta puhdistamoiden kokonaishiilijalanjälkeen, muutettiin puhdistamoita koskeviin muutaman vuoden takaisin hiilijalanjälkilaskelmiin nykyinen sähköenergian päästökerroin ja vertailtiin siten saatuja hiilijalanjälkiä haitta-ainepoistoprosessien hiilijalanjälkiin. Otsonoinnin ja sen mahdollisten uusien esi- ja jälkikäsittelyprosessien vaikutus näiden neljän puhdistamon hiilijalanjälkeen edellä kuvatulla karkealla arviointitavalla on keskimäärin 10 % (vaihteluväli 7–15 % huomioiden kappaleessa 8.3.1 kuvattu laskennan epävarmuustarkastelu). Aktiivihiilisuodatuksen vaikutus näiden neljän puhdistamon hiilijalanjälkeen edellä kuvatulla karkealla arviointitavalla on keskimäärin 12 % (vaihteluväli 8–17 % huomioiden kappaleessa 8.3.1 kuvattu laskennan epävarmuustarkastelu).

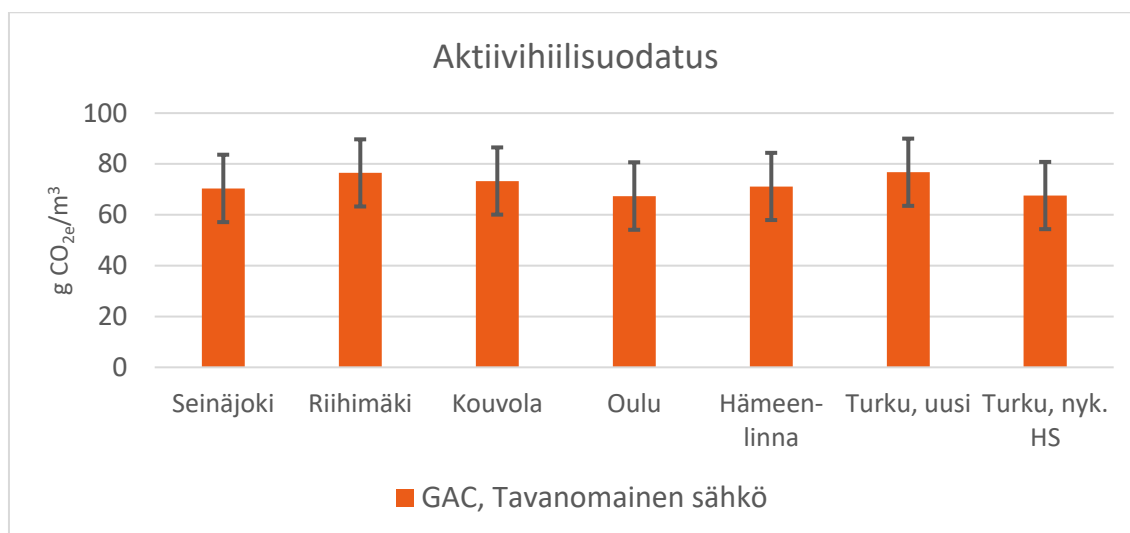
Usealla tarkastelluista laitoksista käytettiin selvityksen ajankohtana CO₂-päästövapaata sähköä. Yksi hankkeen tavoitteista oli tuottaa yleisluontoista tietoa haitta-ainepoistoprosessien vaikutuksista suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Yleisesti ottaen suomalaisilla puhdistamoilla käytetyn sähkön tuotantotavat, ja siten sähkön ominaispäästöt, vaihtelevat ja laitoskohtaisilla sähköenergian tuotantotavoilla on merkittävä vaikutus haitta-ainepoiston hiilijalanjälkeen. Tämän vuoksi hiilijalanjäljet laskettiin jokaiselle kohteelle käyttäen sekä laitoskohtaisia sähkön päästökertoimia että valtakunnallista keskimääräistä sähkön päästökerrointa. Otsonointitarkasteluiden CO₂-päästöt jätevesikuutiota kohden on esitetty käyttäen sähkön keskimääräistä päästökerrointa kuvassa 11a ja aktiivihiilisuodatus-tarkasteluiden kuvassa 11b. Pylväskuvaajiin on merkitty laskentaepävarmuutta kuvaavat janat edellisessä kappaleessa kuvatun laskentatavan mukaisesti.

30.11.2023

HH



(a)



(b)

Kuva 11. Uusien (a) otsonointiin ja (b) aktiivihiihisiuodatuseseen liittyvien prosessiyksiköiden käytön-aikainen hiilijalanjälki tarkastelluilla jätevedenpuhdistamoilla. Laskennassa käytetty Suomen keski-määräistä sähkön päästökerrointa. Pylväiden janat kuvaavat laskentaepävarmuutta.

Taulukossa 9 on tarkastelujen haitta-aineidenpoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden käytön-aikaisen hiilijalanjäljen tilastollisten tunnuslukujen yhteenveto, kun laskennassa on käytetty Suomen keskimääräistä sähkön päästökerrointa. Suluissa on mediaanin ja keskiarvon vaihteluväli huomioitaessa kuvassa 11 janoilla esitetty epävarmuusalue.

Taulukko 9. Eri laitosten haitta-ainepoistovaihtoehtojen uusien prosessiyksiköiden hiilijalanjäljen tilastolliset tunnusluvut. Laskennassa käytetty Suomen keskimääräistä sähköenergian päästökerronta.

Tilastollinen tunnusluku	Otsonointi (sis. esi- ja jälkikäsitteilyn)	Aktiivihiilisuodatus
n	5	7
mediaani, g CO _{2e} /m ³	74 (53–91)	71 (58–84)
keskiarvo, g CO _{2e} /m ³	71 (52–89)	72 (59–85)
keskihajonta, g CO _{2e} /m ³	7	4
minimi, g CO _{2e} /m ³	61	67
maksimi, g CO _{2e} /m ³	78	77

Mikäli kohdepuhdistamoilla käytettäisiin sähköä, jonka päästökerronin vastaa Suomen keskimääräistä, olisivat otsonoinnin ja aktiivihiilisuodatuksen käytönaikaiset hiilijalanjäljet hyvin samalla tasolla käytetyillä laskentarajauksilla ja -oletuksilla.

Lehtoranta ym. (2023) ovat arvioineet vesihuollon ilmastopäästöjä koko Suomen mittakaavassa. Koko luokassa > 10 000 m³/d jätevedenpuhdistamoiden hiilijalanjälki on heidän arvionsa mukaan keskimäärin 0,70 kg CO_{2e}/m³. Jotta haitta-aineidenpoiston käytönaikaisen hiilijalanjäljen vertailu olisi laskennan rajaukseltaan yhdenmukaisempi edellä esitettyyn kohdepuhdistamoiden tarkasteluun, jätetään purkuvesistön ilmastopäästöt (noin 6 %, Lehtoranta ym., 2023) huomioimatta. Kun koko Suomea koskevaa nykytilanteen päästötasoarviota vertaillaan tässä selvityksessä keskimääräistä sähköenergian päästökerronta (Taulukko 9) käyttäen laskettuihin päästöihin, voidaan arvioida seuraavaa: Otsonoinnin ja sen mahdollisten uusien esi- ja jälkikäsitteilyprosessien vaikutus puhdistamoiden hiilijalanjälkeen on karkealla tasolla 7–15 % ja aktiivihiilisuodatuksen vaikutus hiilijalanjälkeen tasolla 8–14 % riippuen esimerkiksi tarvittavasta puhdistamokohtaisesta otsoniannoksesta tai aktiivihiilen regenerointivälistä.

Edellä on kuvattu haitta-aineidenpoistoprosessin käytön arvioidut hiilijalanjälkivaikutukset selvityksen kohdepuhdistamoilla, sekä yleisemmin kokoluokan > 10 000 m³/d jätevedenpuhdistamoilla. Haitta-aineidenpoiston hiilijalanjälkeä voi olla mahdollista pienentää arvioidusta esimerkiksi seuraavien keinoin:

- Nesteytetyn hapen valmistus vastaa noin 60–80 % otsonointiratkaisuiden käytön hiilijalanjäljestä, kun puhdistamolla käytetään ominaispäästöiltään keskimääräistä sähköä. Vastavasti kuin puhdistamoilla, myös hapentuotannossa voidaan käyttää nollapäästöistä sähköä. Käytettäessä uusiutuvaa sähköntuotantoa, voidaan alustavan arvion mukaan pienentää otsonoinnin hiilijalanjälkeä 50–70 %. Arvio perustuu kemikaalitoimittajalta saatuihin tietoihin.
- Tällä hetkellä kivihiilipohjainen aktiivihiili on laajalti käytössä haitta-aineidenpoistotarkoituksessa. Tulevaisuudessa voi olla mahdollista, että esimerkiksi Suomessa puupohjaisesta

biohiilestä valmistettaisiin aktiivihiiltä (Vilén, 2021), joka toimisi riittävän hyvin haitta-aineidenpoistoon jätevedestä. Tällöin on alustavan arvion mukaan mahdollista pienentää aktiivihiilisuodatuksen hiilijalanjälkeä esitettyjen laskentaoletuksen puitteissa maksimissaan 65–75 %.

9 Johtopäätökset ja suositukset

Euroopan komissio on uudistamassa yhdyskuntajätevesidirektiiviä. Yhtenä uutena asiana direktiiviesityksessä on velvoite poistaa jätevedestä mikroepäpuhtauksia eli haitta-aineita. Haitta-aineilla tarkoitetaan tässä yhteydessä jätevedessä pienissä pitoisuuksissa olevia liuenneita orgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi lääkeaineita tai hyönteismyrkkyjä. Haitta-aineiden poistovelvoite koskee esityksen mukaan yhdyskuntien suuria jätevedenpuhdistamoita sekä keskikokoisia puhdistamoita, jotka purkavat käsitellyt jätevedet alueille, joilla haitta-aineista aiheutuu riski ympäristölle tai ihmisten terveydelle.

Tässä raportissa on selvitetty haitta-aineidenpoiston toteutettavuutta ja vaikutuksia suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Selvitys toteutettiin käyttäen kuutta suomalaista jätevedenpuhdistamoita esimerkkeinä, joille tehtiin haitta-aineidenpoiston esisuunnitelmat ja niiden perusteella havainnointiin toteutettavuuteen vaikuttavia seikkoja sekä tutkittiin uusien prosessiyksiköiden vaikutuksia energiankulutukseen, kustannuksiin ja hiilijalanjälkeen. Lisäksi hankkeessa tehtiin laaja kirjallisuuskatsaus haitta-aineidenpoistosta yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla, teetettiin kohdepuhdistamoiden jätevesinäytteistä haitta-aineanalyyskejä ja toteutettiin kohdepuhdistamoille kysely koskien haitta-aineidenpoistoa.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella täyden mittakaavan haitta-aineprosesseja on käytössä enimmäkseen Sveitsissä ja Saksassa. Käytetyt käsittelytekniikat perustuvat lähinnä otsonointiin ja aktiivihiiileen. Katsauksessa on tietoa myös muista tekniikoista, joita on sovellettu haitta-aineidenpoistoon jätevesistä lähinnä pilot-mittakaavassa. Keski-Euroopassa aktiivihiihtä käytetään enemmän jauhemaisena reaktorissa kuin rakeisena suodatusprosessissa. Jauhemainen aktiivihiihi kertyy prosessista poistettavaan lietteeseen ja käyttö on parhaiten mahdollista, mikäli liete poltetaan. Rakeisen aktiivihiihtien käyttö sopii nykyisin jauhemaisen aktiivihiihtien käyttöä paremmin suomalaisille jätevedenpuhdistamoilla, koska Suomessa ei polteta puhdistamolietettä kuin pienessä mittakaavassa ja käsitelty liete hyödynnetään pääosin maanviljelyksessä ja viherrakentamisessa. Katsaus sisältää myös yhteenvedon Suomessa tehdyistä jätevesiä ja vesistöä koskevista haitta-ainetutkimuksista.

Hankkeessa tehdyn kyselytutkimuksen perusteella mukana olleet kuuden puhdistamon edustajat arvioivat kymmenestä vaihtoehdosta olleesta haitta-aineidenpoiston prosessivalintaan vaikuttavasta asiasta tärkeimmiksi prosessin toimintavarmuuden ja kustannukset. Viisi kuudesta vastaajasta katsoi käyttökustannusten pienuuden olevan investointikustannuksia tärkeämpi tekijä haitta-aineidenpoistoprosessin valinnalle.

Kohdepuhdistamoilla otettiin tulevasta ja lähtevästä jätevedestä kaksi kokoomanäytettä haitta-aineanalyyskejä varten. Näytteistä analysoitiin direktiiviehdotuksessa listattuja 12 haitta-ainetta. Raportissa esitetään tiettävästi ensimmäiset yhdistekohtaiset pitoisuus- ja poistotulokset suomalaisista jätevesistä neljälle yhdisteistä: amisulpridi, irbesartan, bentsotriatsoli, 4/6-

30.11.2023

HH

metyylibentsotriatsoli. Yhdisteet eivät juurikaan poistuneet puhdistamoiden nykyisissä käsittelyprosesseissa, joiden biologinen käsittely perustuu aktiivilietteeseen. Tämä oli odotettua kirjallisuuden perusteella.

Viidelle puhdistamokohteelle suunniteltiin erilliset otsonointiin ja aktiivihiihluodatukseseen perustuvat haitta-aineidenpoistoprosessit. Otsonoinnille suunniteltiin tarvittaessa hiekkasuodatukseseen perustuvat jälkikäsittelyratkaisut ja yhdelle puhdistamolle esikäsittely. Yhdelle kallion sisällä sijaitsevalle puhdistamolle suunniteltiin kaksi eri aktiivihiihluodatukseseen perustuvaa prosessiratkaisua. Maan päällä sijaitsevista viidestä kohdepuhdistamosta kolmella oli haasteita saada tarvittavia uusia prosessiyksiköitä sijoitettua puhdistamon tontille ainakin toisessa tarkastelluista prosessivaihtoehdoista. Kallion sisällä sijaitsevalla puhdistamolla ei ollut valmista luolatilaa uudelle prosessiyksikölle. Todennäköisesti tilanne nykyisen tonttitilan ahtauden tai luolatilan puuteiden suhteen on vastaava merkittäväällä osalla suomalaisista jätevedenpuhdistamoista. Osalla hankkeessa mukana olleista puhdistamoista oli hiekkasuodatusprosessi, jota voidaan hyödyntää otsonoinnin jälkikäsittelynä tai johon mahdollisesti voidaan vaihtaa hiekan tilalle aktiivihiihluohetta ja tehdä tarvittavia muutoksia koneistoihin sekä muutoksia kemikaalien annostelupisteisiin. Hiekkasuodatuksen muuttaminen aktiivihiihluodatuksesi edellyttää käsiteltävän jäteveden riittävän alhaista kiintoaineen sekä orgaanisen aineen pitoisuutta ja voi vedenlaadun heiketessä johtaa tihentyneisiin pesuihin sekä lyhyempään aktiivihiihlu vaihtoväliin. Joka tapauksessa puhdistamon nykyisten prosessiyksiköiden hyödynnettävyys voi vaikuttaa haitta-aineidenpoiston prosessivalintaan ja on asia, jota suositellaan tarkasteltavaksi kohdekohtaisesti.

Aktiivihiihluvaihtoehdon käyttökustannusten arvioitiin olevan kaikilla kohdepuhdistamoilla huomattavasti otsonointia korkeammat, mikä johtuu suurimmaksi osaksi aktiivihiihlu regeneroinnin ja uusimisen korkeista kustannuksista. Käyttökustannusarviot vaihtelevat laitoksittain ja prosessivaihtoehdoittain välillä noin 0,02–0,05 €/jätevesikuutio. Haitta-aineiden poistosta aiheutuva käyttökustannusten nousu suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla yleisesti voi olla noin 5–15 % menetelmästä ja kunkin kohteen nykyisistä käyttökustannuksista riippuen. Suurimmalla osalla kohdepuhdistamoista eri tarkasteltujen haitta-aineidenpoistovaihtoehtojen investointikustannusten arviointiin olevan lähellä toisiaan, jolloin investointi- käyttökustannukset yhdistävien vertailukustannusten ero prosessivaihtoehtojen välillä on pienempi kuin käyttökustannusten ero.

Otsonointi mahdollisine uusine esi- ja jälkikäsittelyineen kuluttaa tarkasteluissa kohteissa arviolta 4–6 kertaa enemmän sähköenergiaa kuin aktiivihiihluodatus. Eroon vaikuttaa pääosin otsonigeneraattorin vaatima sähkönkulutus. Sähkönkulutuksen kasvun tarkastelukohteissa otsonointiratkaisuissa arvioitiin olevan 24–65 %. Aktiivihiihluodatuksen vaatiman sähkönkulutuksen kasvun tarkastelluissa kohteissa arvioitiin olevan 0–18 %. Vastaavan sähkönkulutuksen lisäyksen tason olevan melko hyvin yleistettävissä vastaavan kokoisille suomalaisille puhdistamoille. Sähkönkulutuksen lisäys riippuu pitkälti puhdistamoilla olevista hyödynnettävissä olevista prosessiyksiköistä sekä käsiteltävän jäteveden laadusta. Direktiiviesityksessä on uutena vaatimuksena valtakunnallinen 50 % energianeutraalisuusvaatimus yhteensä > 10 000 AVL laitoksilla vuoteen 2030 mennessä. Selvityksen

30.11.2023

HH

sähkönkulutusarvioiden perusteella haitta-aineidenpoistovelvoite vaikeuttaa varsin merkittävästi energianeutraaliusvaatimuksen täyttämisen mahdollisuuksia.

Osana selvitystä arvioitiin haitta-aineidenpoistoprosessien käytönaikaista hiilijalanjälkeä sisältäen mahdollisten esi- ja jälkikäsitelyprosessien hiilijalanjäljen. Otsonoinnin hiilijalanjälki kohdepuhdistamoilla riippui merkittävästi puhdistamoille ostettavan sähkön tuotantotavasta, kun taas aktiivihii-
lisuodatuksen käsiteltävään jätevesimäärään suhteutetut hiilijalanjäljet eivät eronneet merkittävästi puhdistamoiden välillä. Otsonoinnin ja aktiivihii-
lisuodatuksen hiilijalanjäljet olivat keskenään hyvin samalla tasolla. Selvityksessä haluttiin arvioida haitta-aineidenpoiston vaikutusta suomalais-
ten puhdistamoiden hiilijalanjälkeen yleisellä tasolla, minkä vuoksi tehtiin tarkastelu, jossa sovellettiin Suomen keskimääräistä sähkön päästökerrointa. Laskelman perusteella arvioidaan, että haitta-
aineidenpoisto kasvattaa puhdistamoiden käytön hiilijalanjälkeä karkealla tasolla 7–15 %.

Selvityksen perusteella haitta-aineidenpoistoprosessin toteutuksella ja käytöllä on monenlaisia vaikutuksia puhdistamolla. Vaikutukset liittyvät mm. puhdistamoalueen toimintaan, prosessien käyttöön, investointi- ja käyttökustannuksiin, energiantarpeeseen ja ilmastovaikutuksiin. Prosessivalintaan vaikuttaa puhdistamokohtaiset valintakriteerien painotukset, käytössä oleva tonttitila, mahdollisesti muuten uudistuvat lupamääräykset (esim. direktiiviesityksen vaatimukset) ja käytössä oleva nykyinen prosessilinja. Lisäksi suositellaan huomioitavan muut tiedossa olevat tulevaisuuden tehostamis- ja laajentamistarpeet. Tämän selvityksen vaikutustarkastelut on tehty kohdekohtaisten esisuunnitelmien avulla. Ennen tarkempaa haitta-aineidenpoistoprosessien suunnittelua on suositeltavaa toteuttaa pilot-kokeita riittävässä laajuudessa sekä analysoida kattavammin käsiteltävän jäteveden laatua. Uudella prosessilla käsitellyn jäteveden ekotoksikologisia vaikutuksia voidaan myös arvioida. Myös mallinnusta voidaan hyödyntää erityisesti otsonointiprosessien mitoituksessa ja ajotapojen suunnittelussa.

Lähteet

Arola, K., 2020. Enhanced micropollutant removal and nutrient recovery in municipal wastewater treatment, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, LUT University Press.

Awaitey, A. 2021. Carbon footprint of Finnish wastewater treatment plants. Master's Thesis, Vesi- ja ympäristötekniikan maisteriohjelma, Aalto-yliopisto.

Banzhaf, S., Filipovic, M., Lewis, J., Sparrenbom, C. J. ja Barthel, R., 2017. A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Ambio* 46, 335–346. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0848-8>

Baresel, 2016. Removal of pharmaceutical residues using ozonation as intermediate process step at Linköping WWTP, Sweden, *Water Science and Technology*.

Baresel C., Ek, M., Ejhed H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U. och Söhr, S. (2017a). Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk - Planering och installation av reningstekniker för läkemedelsrester och andra mikroföroreningar. Slutrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2288. Available at www.ivl.se.

Baresel, C., Magnér J., Magnusson K. och Olshammar M. (2017b). Tekniska lösningar för avancerad rening av avloppsvatten. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport C235.

Baresel, C., 2017c. Removal of micropollutants in wastewater treatment plants, Everything you need to know about resource efficient removal of micropollutants. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2288, short version. Available at www.ivl.se.

Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S., Harding, M., Fång, J., Karlsson, J., 2019. Sustainable treatment systems for removal of pharmaceutical residues and other priority persistent substances. *Water Science and Technology*, 79.3: 537–543.

Benstoem, F., Nahrstedt, A., Boehler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J., 2017. Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater – A meta-analysis of pilot- and large-scale studies. *Chemosphere* 185: 105–118. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.118

Bourgin, M., Beck, B., Boehler, M., Borowska, E., Fleiner, J., Salhi, E., Teichler, R., von Gunten, U., Siegrist, H., McArdeall, C.S. 2018. Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. *Water Res.*, 129:486-498. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29190578/>

Böhler, M.; Joss, A.; McArdell, C.; Meier, A. Hinweise zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Konsenspapier zum Ergebnis eines Workshops mit Fachexperten aus der Schweiz und Deutschland; Eawag und VSA: Dübendorf, 2020.

CWPharma, 2020. Clear water from pharmaceuticals, Guideline for advanced API removal.

CWPharma, 2020b. Evaluation and experiences of full-scale ozonation followed by MBBR post-treatment at Kalundborg wastewater treatment plant, GoA3.2: Flexible use of existing infrastructure.

de Boer, S., Gonzalez-Rodríguez, J., Conde, J. J., Moreira, M. T., 2022. Benchmarking tertiary water treatments for the removal of micropollutants and pathogens based on operational and sustainability criteria. *Journal of Water Process Engineering*, 46: 102587. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102587>

Elavarthi B., 2021. GAC filter Design Criteria for Wastewater Treatment for Removal of Organic Micropollutants – A Literature Review. Lund University, Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering, Master Thesis number: 2021-01.

EPA United States Environmental Protection Agency, 2000. Wastewater Technology Fact Sheet: Granular Activated Carbon Adsorption and Regeneration.

EU:n direktiiviehdotus 2022/0345, 2022. https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2022_345

EU:n parlamentin muutosehdotus P9_TA(2023)0355, 2023. Amendments adopted by the European Parliament on 5 October 2023 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast) (COM(2022)0541 – C9-6363/2022 – 2022/0345(COD))

EU, jätevesidirektiivi 91/271/ETY, 1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:01991L0271-20140101>

HSY, 2021a. PAC retention by Microsieve. Piloting at Viikinmäki WWTP. CWPharma-hanke.

HSY, 2021b. PAC retention by Mecana pile cloth filter. Piloting at Viikinmäki WWTP. CWPharma-hanke.

HSY, 2021c. PAC retention by Actiflo® Carb. Piloting at Viikinmäki WWTP. CWPharma-hanke.

Junttila, V., Siimes, K. ja Mehtonen, J. 2020. EU:n tarkkailuainelistan aineet pintavesissä – kartoitustulokset 2015–2018. *Ympäristö ja Terveys*, vol 51, 4/2020.

Kharel, S., Stapf, M., Mieke, U., Ekblad, M., 2020. Ozone dose dependent formation and removal of ozonation products of pharmaceuticals in pilot and full-scale municipal wastewater treatment plants, *Science of the total environment*. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139064

Kienle, C., Werner, I., Fischer, S., Lüthi, C., Schifferli, A., Besserlink, H., Langer, M., McArdell, C.S., Vermeirssen, E.L.M., 2022. Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of *in vitro* and *in vivo* bioassays. *Water Research* 212, 118084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118084>

Kruglova, A., Ahlgren, P., Korhonen, N., Rantanen, P., Mikola, A., Vahala, R., 2014. Biodegradation of ibuprofen, diclofenac and carbamazepine in nitrifying activated sludge under 12 °C temperature conditions. *Science of the Total Environment*, 499: 394–401. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.069

Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R., Toivikko, S. 2014. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) – Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. *Suomen ympäristö 3/2014*, Ympäristöministeriö.

Lehtoranta, S., Laukka, V., Mölsä, K., Linjama, J., Pesu, J., Laitinen, J. 2023. Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 31/2023*, Suomen ympäristökeskus.

Leiviskä, T., Risteelä, S., 2022. Analysis of pharmaceuticals, hormones and bacterial communities in a municipal wastewater treatment plant – Comparison of parallel full-scale membrane bioreactor and activated sludge systems. *Environmental Pollution* 292, 118433.

Micropoll.ch, <https://micropoll.ch/en/faq/abatment-performance/>

Miehe, U. 2019. Overview on full-scale ozonation plants in Germany and Switzerland. Presentation in the Technical Workshop on Ozonation (14.3.2019). CWPharma-hanke. Miehe, U., Stapf, M., Schumann, P., Völker, J., 2017. Studie Über Effecte und Nebeneffekte bei der Behandlung von kommunalem Abwasser mit Ozon. Kompetenzentrum Wasser Berlin gGmbH.

MORPHEUS, 2017–2019. Overview of advanced technologies in wastewater treatment for removal of pharmaceuticals and other micropollutants, Status in four coastal regions of the South Baltic Sea; Germany, Sweden, Poland and Lithuania. Project MORPHEUS 2017–2019, Deliverable 5.2. Saatavilla osoitteessa: <https://www.morpheus-project.eu/downloads/>

Motiva, 2023. CO₂-päästökertoimet. Saatavilla osoitteessa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto suomen sa /co2-paastokertoimet> Tieto haettu 10.11.2023.

Mänttari, M., Vornamo, T., Kallioinen, M., Ajo, P.; Arola, K.; Louhi-Kultanen, M., 2019. Efficient treatment of pharmaceutical residue at source – EPIC, Millä eroon jäteveden lääkeainejäämistä. Final seminar 17.5.2019.

Närhi, K., Westling, K., Andersson, S., Baresel, C., Wahlberg, C. 2021. Mikroföroreningar i avloppsreningsverk med membranteknik. Jämförelse med konventionellt reningsverk och bedömning av recipientpåverkan. SVU-rapport 2021-2. Stockholm, Svenskt Vatten.

Pistocchi, A., Andersen, H.R., Bertanza, G., Brander, A., Choubert, J.M., Cimbritz, M., Drewes, J.E., Koehler, C., Krampe, J., Launay, M., Nielsen, P.H., Obermaier, N., Stanev, S., Thornberg, D., 2022. Treatment of micropollutants in wastewater: Balancing effectiveness, costs and implications. *Science of the Total Environment* 850, 157593. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157593>

Rizzo, S. Malato, D. Antakyali, V.G. Beretsou, M.B. Đolić, W. Gernjak, E. Heath, I. Ivancev-Tumbas, P. Karaolia, A.R. Lado Ribeiro, G. Mascolo, C.S. McArdell, H. Schaar, A.M.T. Silva, D. Fatta-Kassinos, Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater, *Sci. Total Environ.* 655 (2019) 986–1008, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.265>

Rogowska, J., Cieszynska-Semenowicz, M., Ratajczyk, W. et al. Micropollutants in treated wastewater, 2020. *Ambio* 49, 487–503. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01219-5>

Siimes, K., Mehtonen, J. ja Mannio, J. 2016. EU:n tarkkailulistasta aineet pintavesissä –Suomen kar-toitustulokset. *Vesitalous* 5/2016. https://vesitalous.fi/wp-content/uploads/2016/10/VT1605_low-res.pdf

Stapf, M., Miehe, U., Bester, K., Lukas, M. 2020. Guideline for advanced API removal. GoA3.4: Opti-mization and control of advanced treatment. <https://publications.kompetenz-wasser.de/pdf/Stapf-2020-1286.pdf>

SYKE, 2008. Haimi, H., Mannio, J., 2008. Haitallisten aineiden näytteenotto ja esiintyminen jäteve-denpuhdistamoilla, kirjallisuusselvitys. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 5/2008. www.ymparisto.fi/syke/ulkaisut

THL, 2018. CONPAT-projekti.

Tilastokeskus, 2023. Rakennuskustannusindeksi, luettu 14.11.2023. <https://stat.fi/tilasto/rki#tables>

UVEK, 2016. Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Reinigungseffekts von MassnahmenMassnahmenzurzurElimination von Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen. organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen. <https://fedlex.data.admin.ch/filestore/fedlex.data.admin.ch/eli/cc/2016/671/20161201/de/pdf-a/fedlex-data-admin-ch-eli-cc-2016-671-20161201-de-pdf-a.pdf> ; [https://www.fedlex.ad-min.ch/eli/cc/2016/671/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/671/de)

Vieno, N. 2016. Lääkeaineiden poisto jätevedestä PAC-MBR-tekniikalla. *Vesitalous* 5/2016.

Viitala, M., Mänttari, M., 2023. Uudet haitta-aineet jätevesissä ja järviympäristössä eteläisellä Sai-maalla — UHASA, Esitys Vesihuolto 2023 -päivillä.

Vilén, A., 2021. Environmental impact of activated carbon production from various raw materials (Eri raaka-aineista valmistetun aktiivihiilen tuotannon ympäristövaikutukset). Master's Thesis, Vesi- ja ympäristötekniikan maisteriohjelma, Aalto-yliopisto.

VVY, 2014. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla -hankkeen loppuraportti.

VVY, 2016. Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa.

VVY, 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomessa. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56.

VVY, 2021. Uudet haitalliset aineet suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla.

VVY, 2021b. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus vuosilta 2019–2020. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 71.

VVY, 2022. Vesihuollon talouden nykytila ja tulevaisuus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 75.

Wolf, Y., Oster, S., Shuliakovich, A., Brückner, I., Dolny, R., Linnemann, V., Pinnekamp, J., Hollert, H., Schiwy, S., 2022. Improvement of wastewater and water quality via a full-scale ozonation plant? - A comprehensive analysis of the endocrine potential using effect-based methods, Science of the Total Environment, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149756>

Wunderlin, P., Meier, A., Grelot, J., 2017. Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA - Aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen. Aqua & Gas 97 (11), 60–69. https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/06/2017_AG_ZB_Elimination-von-Mikroverunrein_d.pdf

XAMK, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 2022. Jätevesien haitallisten aineiden vähentäminen. ISBN: 978-952-344-439-3 (PDF)

Äystö, L., 2020a. Efficient treatment of pharmaceutical residue at source – EPIC, Final report: Emissions and risk identification (WP1).

Äystö, L., Siimes, K., Junttila, V., Perkola, N., 2020b. Lääkeaineiden esiintyminen ja riskit Vantaanjoen vesistöissä. Suomen Farmasialiitto ry. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/348406508_Laakeaineiden_esiintyminen_ja_riskit_Vantaanjoen_vesistossa

Liitteet

Liite 1: Direktiiviehdotuksessa listatut haitta-aineet

Liite 2: Jätevedenpuhdistamot, joilla on käytössä tai jonne on suunnitteilla koko mittakaavan haitta-aineidenpoistoprosessi

Liite 3: PFAS-yhdisteistä

Liite 4: Lähtötietokyselyn kysymykset ja tulokset

Liite 5: Näytteenottopäiväkirjat haitta-ainenäyteenotosta

Liite 6: Kiintoainepitoisuuksien vaihtelua hankkeen puhdistamoilla

Liite 1: Direktiiviehdotuksessa listatut haitta-aineet

Taulukko 10. Tässä hankkeessa tutkitut haitta-aineet.

Yhdiste	CAS	Yhdisteen käyttötarkoitus	Toteutunut määrittäysraja (LOQ), µg/l	PNEC
amisulpridi (amisulpride)	71675-85-9	antipsykoottinen lääke; psykoosin ja skitsofrenian hoitoon	0,1	
karbamatsepiini (carbamazepine)	298-46-4	antiepileptinen lääke; epilepsian hoitoon	0,01–0,02	2,5 µg/l ³ 1,3 µg/l ⁴
sitalopraami (citalopram)	59729-33-8	SSRI-lääke; masennuksen, paniikkihäiriön ja julkisten paikkojen pelon hoitoon	0,02–0,05	0,01 µg/l ³ 15 µg/l ⁴
klaritromysiini (clarithromycin)	81103-11-9	antibiootti; alahengitystieinfektiot	0,02–0,2	0,0039 µg/l ⁴
diklofenaakki (diclofenac)	15307-86-5	tulehduskipulääke; tulehduksiin ja kuumeseen	0,01–0,02	0,050 µg/l ² 0,085 µg/l ⁴
hydroklorotiatsidi (hydrochlorothiazide)	58-93-5	diureettinen lääke; korkea verenpaine, turvotus	0,01–0,05	1000 µg/l ³ 1000 µg/l ⁴
metoprololi (metoprolol)	37350-58-6	beetasalpaaja, verenpainelääke	0,01–0,05	7,3 µg/l ³ 4,4 µg/l ⁴
venlafaksiini (velafaxine)	93413-69-5	serotoniinin ja noradrenaliinin takaisinoton estäjä; masennuksen hoitoon	0,01–0,02	0,006 µg/l ² 3,2 µg/l ⁴
bentsotriatsoli (benzotriazole)	95-14-7	korroosionestoaine, synteetin lähtöaine lääketieteellisyydessä	0,05–0,1	

30.11.2023

HH

Yhdiste	CAS	Yhdisteen käyttötarkoitus	Toteutunut määrittäysraja (LOQ), µg/l	PNEC
kandesartan (candesartan)	139481-59-7	verenpainelääke	0,01–0,02	0,420 µg/l ⁴
irbesartan	138402-11-6	verenpainelääke	0,01–0,02	100 µg/l ⁴
4-metyylibentsotriatsoli/6-metyylibent-sotriatsoli (4/6 methylbenzotriazole)	29878-31-7, 136-85-6	korroosionestoaineen hajoamistuote https://zenodo.org/record/3829088#.Y7_FBXbP0R8	0,05–0,1	

¹VVY, 2014; ²VVY, 2021; ³SYKE, 2019; ⁴Äystö ym., 2020b

Taulukko 11. Muutosehdotuksessa listatut kategorian 3 yhdisteet (EU, 2023).

Yhdiste	CAS
telmisartan	144701-48-4
bisfenoli A (bisphenol A)	80-05-7
beta-estradioli (beta-estradiol)	50-28-2
perfluorioktaanisulfonihappo, PFOS (perfluorooctane sulfonic acid)	1763-23-1

30.11.2023

HH

Liite 2: Jätevedenpuhdistamot, joilla on käytössä tai jonne on suunnitteilla koko mittakaavan haitta-aineidenpoistoprosessi

#	Maa	Jätevedenpuhdistamo	Prosessi	Jälkikäsitely	Tila
1	Tanska	Kalundborg	O ₃	MBBR	Käytössä
2	Saksa	Aachen-Soers	O ₃	MBBR	Käytössä
3	Saksa	Bad Sassendorf	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
4	Saksa	Duisburg-Vierlinden	O ₃	MBBR	Käytössä
5	Saksa	Eriskirch	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
6	Saksa	Warburg	O ₃	MBBR	Käytössä
7	Ruotsi	Linköping	O ₃	MBBR	Käytössä
8	Sveitsi	Neugut	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
9	Sveitsi	Reinach	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
10	Sveitsi	Werdhölzli	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
11	Sveitsi	Bassersdorf	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
12	Sveitsi	Porrentuy	O ₃	Hiekkasuodatus	Käytössä
13	Saksa	Weißenburg in Bayern	O ₃ +hiekk/GAC-suodatus	Hiekkasuodatus/GAC-suodatus	Käytössä
14	Sveitsi	Akterhein	O ₃ +GAC-suodatus	GAC-suodatus	Käytössä
15	Saksa	Bad Oeynhausen	GAC-suodatus	-	Käytössä
16	Saksa	Gütersloh-Putzhagen	GAC-suodatus (2/9)	-	Käytössä
17	Saksa	Obere Lutter	GAC-suodatus	-	Käytössä
18	Saksa	Rietberg	GAC-suodatus (jatkuvatoiminen)	-	Käytössä
19	Saksa	Westerheim	GAC-suodatus	-	Käytössä
20	Sveitsi	Penthaz	Moving bed GAC	-	Käytössä
21	Saksa	Albstadt-Ebingen	Ulmer process	-	Käytössä
22	Saksa	Albstadt-Lautlingen	Ulmer process	-	Käytössä
23	Saksa	Barntrup	PAC annostelu ennen suodatusta	suodatus	Käytössä
24	Saksa	Böblingen-Sindelfingen	Ulmer process	-	Käytössä
25	Saksa	Dülmen	Ulmer process	-	Käytössä
26	Saksa	Hechingen	Ulmer process	-	Käytössä
27	Saksa	Kressbronn-Langenar-gen	Ulmer process	-	Käytössä
28	Saksa	Lahr	Ulmer process	-	Käytössä
29	Saksa	Laichingen	Ulmer process	-	Käytössä
30	Saksa	Langwiese	Ulmer process	-	Käytössä
31	Saksa	Mannheim	Ulmer process	-	Käytössä
32	Saksa	Öhringen	Ulmer process	-	Käytössä
33	Saksa	Steinhäule	Ulmer process	-	Käytössä
34	Saksa	Stockacher Aach	Ulmer process	-	Käytössä

30.11.2023

HH

35	Saksa	Wendlingen am Neckar	Ulmer process	-	Käytössä
36	Sveitsi	Herisau	Ulmer process	-	Käytössä
37	Sveitsi	Thunersee	Ulmer process	-	Käytössä
38	Sveitsi	Schönau	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Käytössä
39	Sveitsi	Flos	Ulmer process	-	Käytössä
40	Sveitsi	Egg-Oetwil am See	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Käytössä
41	Saksa	Friedrichshafen	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
42	Saksa	Herrenberg	O ₃	Suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
43	Saksa	Schloß Holte-Stuken- brock	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
44	Saksa	Tübingen	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
45	Sveitsi	Birsig	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
46	Sveitsi	Furthof	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
47	Sveitsi	Kloten Opfikon	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
48	Sveitsi	Lützelmutgtal	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
49	Sveitsi	Morgental (+Hofen)	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
50	Sveitsi	Neuchâtel	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
51	Sveitsi	Seeland Süd	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
52	Sveitsi	Birmensdorf	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
53	Sveitsi	Sierre	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
54	Sveitsi	Aigle	O ₃	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
55	Sveitsi	ProRheno	O ₃ +PAC	Hiekkasuodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
56	Sveitsi	Glanerland	PAC+GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
57	Saksa	Darmsheim	GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
58	Sveitsi	Delémont	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
59	Sveitsi	Le Locle	Moving bed GAC / GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
60	Sveitsi	Moos, Amriswil	GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
61	Sveitsi	Muri	GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
62	Sveitsi	Villette (+Ocybele)	Moving bed GAC / GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
63	Sveitsi	Winterthur	GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
64	Sveitsi	Luzern	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
65	Sveitsi	Niederglatt	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
66	Sveitsi	Val-de-Ruz	Moving bed GAC / GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
67	Sveitsi	Rosenbergsau	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
68	Sveitsi	La Saunerie	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
69	Sveitsi	Brig	GAC-suodatus	-	Suunnitteilla/rakenteilla
70	Sveitsi	Yverdon	Moving bed GAC	-	Suunnitteilla/rakenteilla
71	Saksa	Pforzheim	Ulmer process	-	Suunnitteilla/rakenteilla
72	Saksa	Stuttgart-Mühlhausen	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla

30.11.2023

HH

73	Sveitsi	Bioggio	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
74	Sveitsi	Ecublens	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
75	Sveitsi	Ergolz 1	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
76	Sveitsi	Fehraltorf	Ulmer process	-	Suunnitteilla/rakenteilla
77	Sveitsi	Gossau-Grüningen	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
78	Sveitsi	La Chaux-de-Fonds	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
79	Sveitsi	Lachen-Untermarch	PAC annostelu en- nen suodatusta	suodatus	Suunnitteilla/rakenteilla
80	Sveitsi	Oberglatt	Ulmer process	-	Suunnitteilla/rakenteilla
81	Sveitsi	Zimmerberg	PAC MBR:ään	MBR	Suunnitteilla/rakenteilla
82	Sveitsi	Falkenstein	PAC MBR:ään	MBR	Suunnitteilla/rakenteilla

Lähde: CWPharma, 2020. Clear water from pharmaceuticals, Guideline for advanced API removal.

Liite 3: PFAS-yhdisteistä

Per- ja polyfluoratut alkyyliryhdyhdisteet (PFAS-yhdisteet) ovat laaja, tuhansien yhdisteiden yhdistejoukko, joita käytetään niiden pysyvyyden vuoksi moniin tarkoituksiin erilaisissa tuotteissa ja teollisuudessa. PFAS-yhdisteet kertyvät ajan kuluessa ympäristöön, ja aiheuttavat ympäristö- ja terveysriskejä. Vaikka joidenkin PFAS-yhdisteiden käyttö on kielletty, ne pysyvät ympäristössä vielä pitkään kieltojen jälkeenkin. Ruotsissa tehdyn kansallisen massataseen mukaan pääasialliset PFAS-yhdisteiden päästölähteet ympäristöön ovat päästöt suoraan tuotteista ja ilmalaskeumana, ja jäteveden ja jätevesilietteen aiheuttama välillinen päästö arvioitiin Ruotsissa näihin lähteisiin verrattuna pieneksi. (SVU, 2022) Lisäksi tiedetään, että esimerkiksi perfluorioktaanisulfonihappo (PFOS) on hyvin monen kemikaalin hajoamistuote (VVY, 2014).

PFAS-yhdisteet eivät poistu tyyppillisessä jätevedenpuhdistusprosessissa (Banzhaf ym., 2017) ja esimerkiksi PFOS:ia ja perfluorioktaanihappoa (PFOA) onkin raportoitu käsitellystä jätevedestä useilla jätevedenpuhdistamoilla maailmalla ja myös Suomessa (SYKE, 2008; VVY, 2014; VVY, 2021). Ruotsissa tutkittiin 15:tä PFAS-yhdisteettä käsitellystä jätevedestä ja havaittiin eniten juuri mainittuja PFOS:ia ja PFOA:ta (SVU, 2022). Tosin joidenkin jätevedenpuhdistamojen on havaittu poistavan PFAS-yhdisteitä tehokkaasti, ja tätä tulisi tutkia lisää. (SVU, 2022) Osa PFAS-yhdisteistä päättyy tyyppillisessä prosessissa lietteeseen, ja osa saadaan lisäksi poistettua jätevedestä lääkeaineiden poistoon käytettävillä menetelmillä kuten otsonoinnilla ja aktiivihilikkäsittelyllä. (SVU, 2022; Baresel ym., 2019) Baresel ym. (2019) vertailivat eri haitta-aineiden poistotekniikoiden tehoa, ympäristövaikutuksia ja kustannuksia keskenään, ja raportoivat sekä otsonoinnin että aktiivihilikkäsittelyn poistavan PFAS-yhdisteitä jätevedestä. Heidän arvionsa mukaan rakeinen aktiivihili on otsonointia selvästi tehokkaampi PFAS-yhdisteiden poistossa. (Baresel ym., 2019; Baresel ym., 2017b).

Valtioneuvoston asetuksessa 1022/2006 PFOS ja sen johdannaiset on yksilöity vaaralliseksi aineeksi ja sille on annettu ympäristölaatuunormi (VnA 1022/2006, Liite 1, taulukot C1 ja C2). PFOSia tarkkaillaan asetuksen vaatimilla jätevedenpuhdistamoilla osana haitallisten ja vaarallisten aineiden tarkkailua.

Liite 4: Lähtötietokyselyn kysymykset ja tulokset

Kysymykset

1. Valitse edustamasi vesilaitos ja jätevedenpuhdistamo
2. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit prosessin elinkaarikustannukset (sisältäen investointi- ja käyttökustannukset)?
3. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin hiilijalanjäljen?
4. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin energiankulutuksen?
5. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin operoinnin omaksumisen helppouden ja prosessin helppokäyttöisyyden?
6. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin toimintavarmuuden?
7. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin huoltotarpeen?
8. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin vaikutuksen nykyprosessiin?
9. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin käyttöturvallisuuden?
10. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit prosessin laajennettavuuden tulevaisuudessa?
11. Täsmennä halutessasi edellisten kysymysten pisteytystä.
12. Kumpi on Vesilaitoksellenne tärkeämpi kriteeri prosessin valinnassa: Käyttökustannusten pienuus vai investointikustannusten pienuus?
13. Mikä muu asia pitäisi huomioida prosessin valinnassa kuin tähän asti kyselyssä esitetyt asiat ja miksi?
14. Jos nykyisillä tiedoilla pitäisi valita niin kumpi olisi parempi vaihtoehto O3 vai GAC?
15. Miksi?
16. Jos puhdistamolla päätettäisiin toteuttaa haitta-aineiden poistoa otsonoinnilla (O3), mitä siinä tulisi ainakin huomioida?
17. Jos puhdistamolla päätettäisiin toteuttaa haitta-aineiden poisto aktiivihiilikäsittelyllä (rakeisella aktiivihiilellä, GAC), mitä siinä tulisi ainakin huomioida?
18. Onko puhdistamolla joitakin erityispiirteitä tai toiveita, jotka tulisi huomioida haitta-aineiden poistoprosessia valitessa ja suunnitellessa?

Tulokset

Vesilaitos ja jätevedenpuhdistamo	Laitos 1	Laitos 2	Laitos 3	Laitos 4	Laitos 5	Laitos 6	Keskiarvo
2. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit prosessin elinkaarikustannukset (sisältäen investointi- ja käyttökustannukset)?	10	8	10	9	8	10	9,2
3. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin hiilijalanjäljen?	9	7	10	8	7	9	8,3
4. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin energiankulutuksen?	8	8	7	9	8	9	8,2
5. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin operoinnin omaksumisen helppouden ja prosessin helppokäyttöisyyden?	7	8	7	8	5	8	7,2
6. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin toimintavarmuuden?	10	10	10	10	8	10	9,7
7. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin huoltotarpeen?	8	8	8	8	8	9	8,2
8. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin vaikutuksen nykyprosessiin?	9	6	9	6	6	9	7,5
9. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit uuden prosessin käyttöturvallisuuden?	9	9	10	7	10	9	9,0
10. Miten tärkeäksi prosessin valinnan kannalta arvioisit prosessin laajennettavuuden tulevaisuudessa?	8	6	8	8	8	9	7,8

30.11.2023

HH

11. Täsmennä halutessasi edellisten kysymysten pisteytystä.

Laitos 2	Kaikki asiat tärkeitä ja niillä osittain ristikkäisvaikutusta. Lähtökohtana kuitenkin, että prosessi on toimia, turvallinen, taloudellinen ja hiilijalanjäljen kannalta "siedettävä".
Laitos 3	Osa vastauksista (energiankulutus, huolto) on kytköksissä elinkaarikustannuksiin. Uuden prosessin vaikutus ei saisi heikentää nykyisen prosessin toimivuutta (mm. typenpoisto). Prosessin laajennettavuuteen liittyen, onko valitulla prosessilla mahdollista poistaa myös muita haitta-aineita esim. PFAS-yhdisteet.
Laitos 4	Kysymys 7. vastattu ajatuksella, miten tärkeää on huoltotarpeen vähyyys. Kysymys 8. vastattu ajatuksella, miten paljon uusi prosessi saa muuttaa nykyistä prosessia ja/tai vaatia uudistuksia/investointeja olemassa olevaan järjestelmään. Vastaajan mielestä muutokset/uudistukset olemassa olevaan järjestelmään ei ole huono asia, jolloin asian tärkeys ei ole prioriteetti.
Laitos 6	Kaikkia edellä mainittuja kohtia voidaan pitää erittäin tärkeinä prosessin valinnan kannalta.

12. Kumpi on Vesilaitoksellenne tärkeämpi kriteeri prosessin valinnassa: Käyttökustannusten pienuus vai investointikustannusten pienuus?

Laitos 1	Käyttökustannusten pienuus
Laitos 2	Käyttökustannusten pienuus
Laitos 3	Investointikustannusten pienuus
Laitos 4	Käyttökustannusten pienuus
Laitos 5	Käyttökustannusten pienuus
Laitos 6	Käyttökustannusten pienuus

13. Mikä muu asia pitäisi huomioida prosessin valinnassa kuin tähän asti kyselyssä esitetyt asiat ja miksi?

Laitos 2	Elinkaarikustannus 25 vuoden aikajänteellä on tärkeämpi kuin investointi- tai käyttökustannus. Huoltovarmuus on myös otettava huomioon (GAC, kemikaalit, varaosat, huollot). Samoin teknii-kan kypsyysaste.
Laitos 4	Pitkällä tähtäimellä investointi sekä käyttökustannus yhteisvaikutus on merkitsevä (kysymys 12)
Laitos 5	Että peilataan ympäristölupaa esim 25 vuoden päähän, vaikkei lupaehtoja silloin vielä suoraan tiedetäkään niin eivät ne ainakaan lavennu

14. Jos nykyisillä tiedoilla pitäisi valita niin kumpi olisi parempi vaihtoehto O3 vai GAC?

Laitos 1	Aktiivihiiikäsittely rakeisella aktiivihiiilellä, GAC
Laitos 2	En osaa sanoa
Laitos 3	Aktiivihiiikäsittely rakeisella aktiivihiiilellä, GAC
Laitos 4	Otsonointi, O3
Laitos 5	Otsonointi, O3
Laitos 6	En osaa sanoa

30.11.2023

HH

15. Miksi?

Laitos 1	Otsoni pilkkoo yhdisteitä pienemmäksi, mutta ei poista niitä prosessista. Otsoni ei pysty pilkkomaan PFAS-yhdisteitä tehokkaasti.
Laitos 3	Aktiivihiihikäsittely turvallisempi ja helpommin hallittavissa oleva prosessi. Aktiivihiihiprosessista on käyttökokemusta talousvesipuolelta.
Laitos 4	Oletuksena on, että aktiivihiihikäsittely vaatii enemmän huoltoa (esim. hiilien vaihto)
Laitos 5	Jos aktiivihiihilellä on ns jätevesijätetestaus niin hävittäminen maksaa jotakin. Mikäli sille saadaan lupa ajaa pellolle lannoitteeksi niin siitä saa ruveta perimään maksua. Pitäisi kuitenkin tietää mitä lääkejäämät aiheuttavat. No kai se on tutkittu ja joku tutkimus puolesta toinen vastaan.
Laitos 6	Tässä vaiheessa ei ole kokemusta em. menetelmistä.

16. Jos puhdistamolla päätettäisiin toteuttaa haitta-aineiden poistoa otsonoinnilla (O3), mitä siinä tulisi ainakin huomioida?

Laitos 1	Laitteiston tulisi olla kapasiteetiltaan riittävä, turvallinen käyttää ja liitettävissä väylän kautta automaatiojärjestelmään.
Laitos 2	käyttöturvallisuus ja desinfioinnin sivutuotteet
Laitos 3	Työturvallisuus ainakin.
Laitos 4	Turvallisuus, prosessin häiriöttömyys, aiemmat käyttökokemukset jätevedenpuhdistamoilla.
Laitos 5	Tekniikka vastaajille vierasta, ei osaa enempää sanoa.
Laitos 6	Kapasiteetti riittäisi. Ei silti hävitä lääkejäämiä
Laitos 6	Minkälaista tekniikka on saatavilla, mitkä ovat vaihtoehtojen käyttö- ja investointikustannukset, tarvitaanko hapelle oma hapen varastosäiliö vai tehdäänkö tarvittava happi paikan päällä. Jääkö prosessin jälkeen jäljelle (huoneilmaan) jäännösotsonia, joka pitää johtaa otsonin tuhoajaan. Haitta-aineiden poistoteho vs. otsonin syöttömäärä, perinteinen otsonointi vai kehittyneemmät otsonointitekniikat.

17. Jos puhdistamolla päätettäisiin toteuttaa haitta-aineiden poisto aktiivihiihikäsittelyllä (rakeisella aktiivihiihilellä, GAC), mitä siinä tulisi ainakin huomioida?

Laitos 1	Laitteiston tulisi olla kapasiteetiltaan riittävä, mitoitettu niin, että hiilien vaihdot olisivat minimissä ja laitteisto olisi liitettävissä väylän kautta automaatiojärjestelmään.
Laitos 2	Teknisessä ratkaisussa hiilien vaihdon sujuvuus ja regeneroinnin toteutuspaikka. Käytetyn hiilen hävittämisen kustannus (lienee poltto?). Biohiilen käyttökelpoisuus?
Laitos 3	Aktiivihiihiproessin käyttö/kuormitus eri virtaamaolosuhteissa ja huuhteluvesien määrä
Laitos 4	Rakeiden vaihdon helppous ja tuotteen loppusijoitus/kierrätys?
Laitos 5	Mitä tapahtuu lääkejäämille pitkässä juoksussa. Pystyykö tuota regeneroimaan tai poistamaan lääkejäämiä uunittamalla.
Laitos 6	Millaisia aktiivihiihilaatuja on saatavilla (kertakäyttöiset, regeneroitavat, uudet aktiivihiihilaadut), mitkä ovat vaihtoehtojen käyttö- ja investointikustannukset, miten kauan aktiivihiihi pysyy toimintakykyisenä, hiilien huuhtelut ja pesut => mihin vedet johdetaan?, missä aktiivihiihien regenerointi voidaan suorittaa, ns. kertakäyttöisten hiilien hävittäminen käytön jälkeen, miten ja missä?

18. Onko puhdistamolla joitakin erityispiirteitä tai toiveita, jotka tulisi huomioida haitta-aineiden poistoprosessia valitessa ja suunniteltaessa?

Laitos 1	Kakolanmäen puhdistamolla ei ole tilavarausta uusille suurille laitteistoille. Nykyinen prosessi käsittää tertiäripuolella hiekkasuodatuksen sekä UV-hygienisoinnin. Jossain vaiheessa ollaan mietitty vaihtoehtoa korvata osa hiekkasuodatussolutta haitta-aineiden poistoon suunnitellulla menetelmällä. Toki tähän vaikuttaa se, onko tarkoitus poistaa haitta-aineita vesistöön johdettavasta vedestä prosessin lopussa, vai lieteprosessista.
Laitos 2	Vaatii mahdollisesti kaavamutoksen, mutta tilaa pitäisi olla.

30.11.2023

HH

Laitos 3	Viemäröinnin piirissä on meijeri- ja jätteenkäsittelyteollisuutta, mikä saattaa vaikuttaa vedenlaadun vaihteluihin.
Laitos 4	Hulevesien määrä ajoittain (kevällä ja syksyllä korkea), vuotovesiprosentti n. 56%. Voiko prosessia ohittaa ja mitoitus vain ns. peruskuorman mukaan?
Laitos 5	No ettei poistomenetelmästä tule lisää vaikeasti hävitettävää ongelmaa
Laitos 6	Taskilan puhdistamon tapauksessa on laitoksella kaksi käsittelylinjaa (ns. perinteinen aktiivilieteprosessi + tertiäärikäsittely ja MBR-yksikkö).

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	TURUN SEUDUN PUHDISTAMO OY
Jätevedenpuhdistamon nimi	KAKOLANMÄEN JÄTEVEDENPUHDISTAMO
Näytteenottajan nimi	LOUNAIS-SUOMEN VESI- JA YMPÄRISTÖTUTKIMUS OY
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input checked="" type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	TULEVA
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	LÄHTEVÄ (UU HYGIENISOINNIN JÄLKEEN)
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	PUHDISTAMON TOIMINTA-ALUEELLA RUNSAITTA SATEITA NÄYTTEENOTON ALUUSTA EDELTÄVINÄ PÄIVINÄ, MIKÄ NÄKYY JONKIN VERKAN VIRTAA MASSA.

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	03.07.2023 08:45	03.07.2023 08:45	05.07.2023 08:45	05.07.2023 08:45
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	05.07.2023 08:45	05.07.2023 08:45	07.07.2023 08:45	07.07.2023 08:45
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana (virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	<u>71704</u> + <u>71311</u>	<u>71704</u> + <u>71311</u>	<u>59095</u> + <u>56907</u>	<u>59095</u> + <u>56907</u>
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä Toisen 24 h osanäytteen määrä	100 ml <u>99</u> ml	100 ml <u>99</u> ml	100 ml <u>96</u> ml	100 ml <u>96</u> ml

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy
Jätevedenpuhdistamon nimi	Parainen
Näytteenottajan nimi	Elina Lehtinen
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input checked="" type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	Tuleva jätevesi välppäyksen jälkeen
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	Lähtevä vesi, ympäristöön purettava
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	Tulevan ja lähtevän veden virtaama mitataan samalla mittauksella.

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	10.7. klo. 9:00	10.7. -klo: 9:00	12.7. ~klo. 9:00	12.7. ~klo: 9:00
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	12.7. n.klo. 9:00	12.7. -klo: 9:00	14.7. ~klo. 9:00	14.7. -klo: 9:00
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana (virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	<u>12979</u> + <u>13123</u>	<u>12979</u> + <u>13123</u>	<u>12067</u> + <u>11947</u>	<u>12067</u> + <u>11947</u>
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä Toisen 24 h osanäytteen määrä	100 ml <u>101</u> ml	100 ml <u>101</u> ml	100 ml <u>99</u> ml	100 ml <u>99</u> ml

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	Riihimäen Vesi
Jätevedenpuhdistamon nimi	Riihimäen jätevedenpuhdistamo
Näytteenottajan nimi	Jouko Rantanen
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input checked="" type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input checked="" type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	Tulevan veden putki
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	Lähtevän veden kaivo
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	Reensaita sateita 2.8 ja 3.8

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	31.7.23 klo 8	31.7.23 klo 8	2.8.23 klo 8	2.8.23 klo 8
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	2.8.23 2.8.23 klo 8	2.8.23 klo 8	4.8.23 klo 8	4.8.23 klo 8
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana (virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	<u>10574 m³</u> + <u>12581 m³</u>	<u>7506 m³</u> + <u>9280 m³</u>	<u>13772</u> + <u>14208</u>	<u>10738</u> + <u>10397</u>
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä Toisen 24 h osanäytteen määrä	100 ml <u>119</u> ml	100 ml <u>124</u> ml	100 ml <u>103</u> ml	100 ml <u>97</u> ml

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	Kouvolan Vesi Oy
Jätevedenpuhdistamon nimi	Mäkikeylän jätevedenpuhdistamo
Näytteenottajan nimi	Timo Ruippo
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input checked="" type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	Tuleva jätevesi, välppäyksen jälkeen, ennen hiekanerotusta
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	Ympäristöön purettava vesi
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	10.7.23 Klo 07:00	10.7.23 Klo 07:00	12.7.23 Klo 07:00	12.7.23 Klo 07:00
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	12.7.23 Klo 07:00	12.7.23 Klo 07:00	14.7.23 Klo 07:00	14.7.23 Klo 07:00
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana (virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	<u>21488</u> + <u>20507</u>	<u>21488</u> + <u>20507</u>	<u>19408</u> + <u>18474</u>	<u>19408</u> + <u>18474</u>
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa				
Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml
Toisen 24 h osanäytteen määrä	_____ ml	_____ ml	_____ ml	_____ ml

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	Seinäjoen Energia / seinäjoen vesi
Jätevedenpuhdistamon nimi	Seinäjoen puhdistamo
Näytteenottajan nimi	Tommi Ueki
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input checked="" type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	Tulokanava tuloruuviä ennen
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	Lähteva kanava Dynasarden jälkeen
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	13.07.2023 08:00	13.07.2023 08:00	15.7.2023 08:00	15.07.2023 08:00
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	15.7.2023 08:00	15.07.2023 08:00	17.7.2023 08:00	17.7.2023 08:00
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana	<u>12917 m³</u>	<u>16472 m³</u>	<u>11748</u>	<u>15570</u>
(virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	+ <u>13035 m³</u>	+ <u>16764 m³</u>	+ <u>11370</u>	+ <u>14475</u>
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa				
Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml
Toisen 24 h osanäytteen määrä	<u>101</u> ml	<u>102</u> ml	<u>97</u> ml	<u>93</u> ml

Näytteenottopäiväkirja

Vesihuoltolaitoksen nimi	Oulun Vesi
Jätevedenpuhdistamon nimi	Tasvilan jätevedenpuhdistamo
Näytteenottajan nimi	Sofia Risteclä
Näytteenottomenetelmä (Täsmennä, jos on eri osalle näytteistä)	<input type="checkbox"/> 48 h virtaamapainotteinen kokoomanäyte <input checked="" type="checkbox"/> 48 h aikapainotteinen kokoomanäyte <input type="checkbox"/> muu, mikä:
Tulevan jäteveden näytteenottopiste (esim. tuleva jätevesi, välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen)	tuleva jätevesi, välppäyksen jälkeen
Lähtevän jäteveden näytteenottopiste (esim. ympäristöön purettava vesi)	lähtevä vesi, mereen purettava vesi
Normaalista poikkeavat jäteveden laadun tai prosessin toiminnan muutokset tai muut näytteen laatuun mahdollisesti vaikuttavat tekijät ja niiden ajankohdat.	

Näytteen nimi	1, Influent (tuleva)	2, Effluent (lähtevä)	3, Influent (tuleva)	4, Effluent (lähtevä)
Näytteenoton aloituspvm ja kellonaika	31.7. klo 10	31.7. klo 10	2.8. klo 10	2.8. klo 10
Näytteenoton lopetuspvm ja kellonaika	2.8. klo 10	2.8. klo 10	4.8. klo 10	4.8. klo 10
Tulevan jäteveden virtaama näytteenoton aikana (virtaama ensimmäisen 24 h aikana + virtaama toisen 24 h aikana)	$\frac{45\ 416\ \text{m}^3/\text{d}}{+}$ $\frac{50\ 593\ \text{m}^3/\text{d}}$	$\frac{45\ 416\ \text{m}^3/\text{d}}{+}$ $\frac{50\ 593\ \text{m}^3/\text{d}}$	$\frac{52\ 995}{+}$ $\frac{49\ 362}$	$\frac{52\ 995}{+}$ $\frac{49\ 362}$
48 h näytteen valmistus 24 h näytteitä sekoittamalla virtaamien suhteessa Ensimmäisen 24 h osanäytteen määrä Toisen 24 h osanäytteen määrä $V_{\text{näyte 2}}$	100 ml = $V_{\text{näyte 1}}$ $\frac{111,4}{\text{ml}}$	100 ml $\frac{111,4}{\text{ml}}$	100 ml $\frac{93,1}{\text{ml}}$	100 ml $\frac{93,1}{\text{ml}}$

$$V_{\text{näyte 2}} = \frac{V_{\text{näyte 1}} \cdot Q_2}{Q_1} = \frac{100\ \text{ml} \cdot Q_2}{Q_1}$$

$$V_{\text{näyte 2}} = \frac{100\ \text{ml} \cdot 50\ 593}{45\ 416} = 111,4\ \text{ml}$$

$$V_{\text{näyte 2}} = \frac{100\ \text{ml} \cdot 49\ 362}{52\ 995} = 93,1\ \text{ml}$$

Liite 6: Kiintoainepitoisuuksien vaihtelua hankkeen puhdistamoilla

	Vuosiraportin ja tarkkailun lisätiedot, kiintoaine
HS-Vesi Oy	Vuonna 2022 lähtevän veden kiintoainepitoisuus oli välillä 5,6–31 mg/l. Kolmessa näytteessä pitoisuus oli yli 20 mg/l ja 11 näytteessä yli 10 mg/l 24:stä tarkkailukerralla. (HS-Vesi, Paroisten puhdistamo, Vuosiyhteenveto 2022)
Kouvolan Vesi Oy	Aikavälillä 1.1.2020–26.10.2023 kiintoainepitoisuus oli lähtevässä jätevedessä FCG:n VeRa-käyttöpäiväkirjasta luetun laboratoriodatan perusteella välillä 1,6–17, keskimäärin 5,8. Enimmäkseen kiintoainepitoisuus oli < 10 mg/l tai < 5 mg/l, ja kahden viime vuoden aikana 2022–2023 vain yhden kerran 10 mg/l.
Oulun Vesi	Vuonna 2022 lähtevän veden kiintoainepitoisuus oli välillä 1,4–18. Kahdessa näytteessä pitoisuus oli yli 10 mg/l ja neljässä näytteessä yli 5 mg/l 24:stä tarkkailukerralla. (Oulun Veden Taskilan jätevedenpuhdistamon vuosiraportti 2022)
Riihimäen Vesi	Ennen jälkisuodatusta kiintoainepitoisuus oli aikavälillä keskimäärin 6,0 mg/l. Tulos on laskettu automaation tuntikeskiarvoista, ja sisältää muutamia erikoisia suuria piikkejä, jotka eivät luultavasti pidä paikkaansa. Automaatiodatan vaihteluväli oli nämä erikoisen suuret piikit mukaan lukien 1–1 356 mg/l. Kun suurimmat piikit (> 100 mg/l) jätettiin huomiotta, kiintoainepitoisuus oli keskimäärin 3,9 mg/l. Vuonna 2022 lähtevän veden kiintoainepitoisuus oli välillä 2,8–13 mg/l. Kahdeksassa näytteessä pitoisuus oli yli 10 mg/l ja 13 näytteessä yli 5 mg/l 24:stä tarkkailukerralla (Riihimäen Vesi, Riihimäen jätevedenpuhdistamo, Käyttö- ja päästötarkkailun vuosiyhteenveto 2022).
Seinäjoen Vesi	Aikavälillä 1.1.2020–16.8.2023 kiintoainepitoisuus oli ennen jälkisuodatusta FCG:n VeRa-käyttöpäiväkirjasta luetun automaatiodatan perusteella välillä 0–99,9 mg/l, keskimäärin 10,2 mg/l. Vuosina 2020, 2022 ja 2023 jälkisuodatukseen menevässä vedessä oli paljon isoja, yli 20 mg/l piikkejä, kun taas vuonna 2021 kiintoainepitoisuus oli pääosin alle 10 mg/l. Vuonna 2022 lähtevän veden kiintoainepitoisuus oli vuosineljänneksittäin tarkasteltuna välillä 4,1–8,1. (Seinäjoen Energia Oy, Jätevesitarkkailun yhteenveto 2022)
Turun seudun puhdistamo Oy	Ennen jälkisuodatusta kiintoainepitoisuus oli vuonna 2022 laboratoriotulosten mukaan välillä 1,6–6,1 mg/l, keskimäärin 3,6 mg/l (n=50). Lähtevän veden kiintoainepitoisuus oli vuoden 2022 vuosineljänneksillä keskimäärin 1,1–1,7 mg/l, ja aikavälillä 13.1.–24.8.2022 välillä <1–4,7 mg/l (Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus, Vuosiraportti 2022).