

Jätevedenpuhdistuksen suorien typpioksiduuli- ja metaanipäästöjen laskentatyökalu

Aineisto ja laskentaperusteet

Kaisa Korhonen, Anna Kuokkanen, Anna Mikola

Kuvailulehti

Julkaistu	16.5.2025
Tekijät	Kaisa Korhonen, Anna Kuokkanen, Anna Mikola
Julkaisun nimi	Jätevedenpuhdistuksen suorien typpioksiduuli- ja metaanipäästöjen laskentatyökalu Aineisto ja laskentaperusteet
Sivumäärä	20
Kieli	suomi
Asiasanat	Kasvihuonekaasupäästöt, päästölaskenta, E-PRTR-päästöraportointi

Tiivistelmä

Suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla merkittävimmät ilmapäästöt ovat typpioksiduuli (N_2O) ja metaani (CH_4), ja niiden E-PRTR-raportoinnin kynnysarvot ylittyvät suurimmilla puhdistamoilla. Päästöjen määrä voi vaihdella laitospohjaisesti, mutta suomalaisen mittaustiedon perusteella N_2O -päästön kynnysarvo ylittyy tyypillisesti, kun puhdistamolle tulevan jäteveden typpikuorma ylittää arvon 2 500 kg/d. Vastaavasti CH_4 -päästön kynnysarvo ylittyy laitokselle tulevan BOD-kuorman ollessa noin 30 000 kg/d. Muiden E-PRTR-rekisterissä raportoitavien päästöjen kynnysarvot eivät ylitä mittaustietojen perusteella edes suurimmilla suomalaisilla puhdistamoilla.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää suorien N_2O - ja CH_4 -päästöjen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä sekä päivittää päästötasolaskentaa viimeaikaisen mittaus- ja kirjallisuustiedon pohjalta. Tulosten perusteella todettiin, että nitriittityypen havaitseminen kohonneina pitoisuuksina aktiivilieteprosessin lopussa kasvattaa riskiä kohonneista N_2O -päästöistä. Toisaalta tehokas denitrifikaatio eli kokonaistypenpoisto vähentää N_2O -päästöjen määrää. CH_4 -päästön huomattiin korreloivan laitokselle tulevan orgaanisen kuormituksen sekä biokaasun käytön kanssa.

Työ toteutettiin erikoistytöinä Aalto-yliopistossa. Työssä päivitettiin päästökertoimia ja luotiin laskentapohja nykytietämyksen mukaisesti hyödyntäen aineistoa sekä Suomesta että ulkomailta. Päästökertoimia ja laskentamenetelmiä päivitettiin IPCC:n ja E-PRTR-rekisterin menetelmäohjeiden mukaisesti. N_2O -päästökertoimet päivitettiin kokonaisuudessaan uusimpaan saatavilla olevaan tutkimustietoon perustuen. CH_4 -päästön osalta laitosten energiantuotannolle määritettiin laitekohtaiset päästökertoimet biokaasun suhteen, minkä lisäksi aiempia BOD-kuormitukseen perustuvia kertoimia päivitettiin uusimpien suomalaisten mittaustulosten perusteella. Uusi laskentapohja tarjoaa myös suositusarvoja prosessiparametreille N_2O -päästötason pienentämiseen. Valmis laskentatyökalu on julkaistu vesilaitosten käyttöön keväällä 2025.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Aineisto	4
2.1	Typpioksiduuli	4
2.2	Metaani	6
3	Laskentamenetelmät	7
3.1	Typpioksiduulipäästö	7
3.1.1	Laskenta nitriittitypen pitoisuuden perusteella	9
3.1.2	Laskenta tulevan typpikuorman perusteella	10
3.2	Metaanipäästö	11
3.2.1	Laskenta biologisen hapenkulutuksen perusteella	11
3.2.2	Laskenta biokaasun perusteella	12
4	Laskentatyökalun sisältö ja käyttö	13
4.1	Käyttäjän syöttämät tiedot	13
4.2	Tulosten raportointi	14
4.3	Suositukset prosessiparametreille N ₂ O-päästöjen ehkäisemiseksi	14
4.4	Metaanipäästön hallinta puhdistamoilla	15
5	Yhteenveto	16
	Liite 1 E-PRTR-ilmapäästöt Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla vuonna 2024	20

1 Johdanto

Suomessa suurten jätevedenpuhdistamoiden typpioksiduulin (N_2O) ja osittain myös metaanin (CH_4) ilmapäästöt ylittävät eurooppalaisen PRTR-rekisterin raportointikynnykset (166/2006 Euroopan päästö- ja siirtorekisteriä koskeva asetus), eli laitoksilla on velvollisuus niiden raportointiin. E-PRTR-rekisterin soveltamisalaan kuuluvat sellaiset yhdyskuntajätevesien käsittelylaitokset, joiden asukasvastineluku on vähintään 100 000. Soveltamisalaan kuuluvalla laitoksella on velvollisuus raportoida kynnysarvon ylittävät päästöt, jos yksi tai useampi päästöjen kynnysarvo ylittyy. N_2O -päästön raportointikynnys on 10 000 kg/vuosi ja CH_4 -päästön 100 000 kg/vuosi.

Ilmapäästöt arvioidaan jätevedenpuhdistamoilla tyypillisesti käyttäen päästökertoimia. Päästöraportoinnissa käytetyt kertoimet perustuvat kuitenkin suppeaan ja osin vanhentuneeseen aineistoon. Tietämys erityisesti N_2O -päästöjen muodostumisesta ja tyypillisistä päästötasoista erityyppisillä puhdistamoilla on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosina. Tässä työssä hyödynnettiin suomalaisten olosuhteiden kannalta relevanttia kirjallisuustietoa viimeaikaisista päästömittaustuloksista. Lisäksi koottiin yhteen Suomessa tehty mittaustieto ja tutkittiin laajemmasta aineistosta mahdollisia vaikuttavia tekijöitä päästötasoon.

Helsingin Vesi (nyk. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, HSY) on julkaissut vuonna 2007 laskentapohjan suomalaisten puhdistamoiden E-PRTR-ilmapäästöille, johon on myöhemmin päivitetty yksittäisiä päästökertoimia. Laskentamallin toteutuksessa on ollut mukana 15 suomalaista puhdistamoa, mutta laskenta perustuu ainoastaan Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla toteutettuihin päästömittauksiin (Fred et al. 2009). Yksittäisen puhdistamon päästökertoimista koostettu laskentapohja ei tarjoa nykytietämysten mukaista työkalua suomalaisten puhdistamoiden päästötasolaskentaan, joten laskentamenetelmiä päivitettiin laajemman aineiston perusteella. Lisäksi haluttiin selventää laskentapohjan käyttäjälle, mitkä ovat kaikista merkittävimpiä ilmapäästöjä puhdistamoilla ja mitkä tekijät voivat vaikuttaa näiden päästöjen syntyyn. Tämän vuoksi laskentatyökalussa keskityttiin ainoastaan suoriin N_2O - ja CH_4 -päästöihin.

Muut E-PRTR-rekisterin ilmapäästöt ovat merkittävästi kynnysarvoja alhaisempia suomalaisilla puhdistamoilla, joten laskentamenetelmien päivytystä ei katsottu tarpeelliseksi. Lisäksi aineisto näiden päästöjen osalta jäisi suppeaksi, sillä edes HSY:n jatkuvatoimisilla mittalaitteilla varustetuilla puhdistamoilla ei mitata suurinta osaa muista E-PRTR-päästöistä, lukuun ottamatta hiilidioksidia, ammoniakkaa ja typen oksideja. Yksittäisiä päästömittauksia muille E-PRTR-päästöille on toteutettu Viikinmäen puhdistamolla (Fred et al. 2008), mutta nämäkin päästöt jäivät reilusti alle kynnysarvojen.

2 Aineisto

Tässä luvussa esitellään laskentatyökalussa käytetty aineisto typpioksiduuli- ja metaanipäästöille. N₂O-päästön osalta aineisto sisältää yhteensä 31 mittausjaksoa ja 19 aktiivilietepuhdistamoa Suomesta ja ulkomailta. CH₄-päästön aineisto sisältää 10 mittausjaksoa kahdelta suomalaiselta puhdistamolta, minkä lisäksi kerättiin laitekohtaisia päästökertoimia IPCC:n kansainvälisistä raportointiohjeista (IPCC 2019; IPCC 2006).

2.1 Typpioksiduuli

Typpioksiduulin päästölaskenta perustuu Suomesta ja ulkomailta kerättyyn aineistoon. Suomessa N₂O-päästöjä mitataan jatkuvatoimisesti ainoastaan HSY:n Viikinmäen ja Blominmäen jätevedenpuhdistamoilla, joissa päästöjä mitataan Gasmet FT-IR-kaasuanalysointilaitosten poistoilmasta. Laskentatyökalun aineistoon on sisällytetty Viikinmäen päästömittaukset vuosilta 2017–2024 ja Blominmäen päästömittaukset vuosilta 2023–2024. HSY:n päästömittausten lisäksi muutamilla suomalaisilla puhdistamoilla on toteutettu N₂O-mittauksia lyhyempinä mittausjaksoina kupumittauksin (Sieranen et al. 2024). Aineistoon sisällytetyt suomalaiset N₂O-mittaukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Aineistoon sisällytetyt suomalaiset typpioksiduulipäästöjen mittaukset (HSY 2017–2024; Sieranen et al. 2024).

Puhdistamo (kaupunki)	Laitoksen koko (AVL)	Tyypenpoisto D/N *	Mittausjaksot
Akaa (Akaa)	20 000	D	joulukuu 2022
Blominmäki (Espoo)	510 000	D	vuodet 2023– 2024
Kakolanmäki (Turku)	315 000	D	maalis-huhti 2022, touko-kesä 2022
Kirkonkylä (Mäntsälä)	14 000	N	kesä-heinä 2022, tammikuu 2023
Nenäinniemi (Jyväskylä)	228 000	N	huhtikuu 2022, kesäkuu 2022
Viikinmäki (Helsinki)	1 100 000	D	vuodet 2017– 2024
Viinikanlahti (Tampere)	350 000	D	syyskuu 2022, lokakuu 2022

* D = denitrifikaatio + nitrifikaatio, N = pelkkä nitrifikaatio.

Suomalaisen aineiston lisäksi kerättiin suomalaisten olosuhteiden kannalta relevanttia kirjallisuustietoa viimeaikaisista päästömittaustuloksista. Koska suomalaisissa päästömittauksissa on puutetta erityisesti pidemmistä mittausjaksoista, päätettiin aineistoon sisällyttää Gruberin et al. (2021) keräämää mittausdataa sveitsiläisiltä ja muilta eurooppalaisilta aktiivilietepuhdistamoilta. Gruber et al. (2021) ovat koonneet tutkimukseensa mittaustietoa, joissa mittausjakson kesto on ollut vähintään 1 vuosi. Lisäksi päästökertoimet ovat vertailukelpoisia suomalaisten kertoimien kanssa. Suomalaisessa aineistossa N₂O-päästökertoimet tulevaa tyyppä kohden vaihtelevat välillä 0,04–2,79 %, kun taas Gruberin et al. (2021) aineistossa vaihteluväli tyyppä poistaville puhdistamoille on noin 0,1–2,9 %. Molemmat vaihteluvälit ovat myös linjassa IPCC:n (2019) raportointiohjeessa esitetyn 0,01–2,9 % päästöhaarukan kanssa. Aineistoon sisällytetyt puhdistamot on esitetty taulukossa 2. Alkuperäisestä aineistosta on jätetty pois Giubiascon laitos, sillä kyseisellä laitoksella ei ole typenpoistoa.

Taulukko 2. Aineistoon sisällytetyt kansainväliset typpioksiduulipäästöjen mittaukset. (Gruber et al. 2021).

Puhdistamo (maa)	Laitoksen koko (AVL)	Typenpoisto D/N *
Altenrhein (Sveitsi)	80 000	N
Altenrhein (Sveitsi)	40 000	N
Avedore (Tanska)	350 000	D
Bazenheid (Sveitsi)	50 000	D
Birs (Sveitsi)	150 000	D
Hofen (Sveitsi)	50 000	D
Kralingseveer (Alankomaat)	360 000	D
Luzern (Sveitsi)	280 000	D
Moossee (Sveitsi)	50 000	D
Schoenau (Sveitsi)	180 000	D
Uster (Sveitsi)	50 000	N
Zurich (Sveitsi)	670 000	D

* D = denitrifikaatio + nitrifikaatio, N = pelkkä nitrifikaatio.

2.2 Metaani

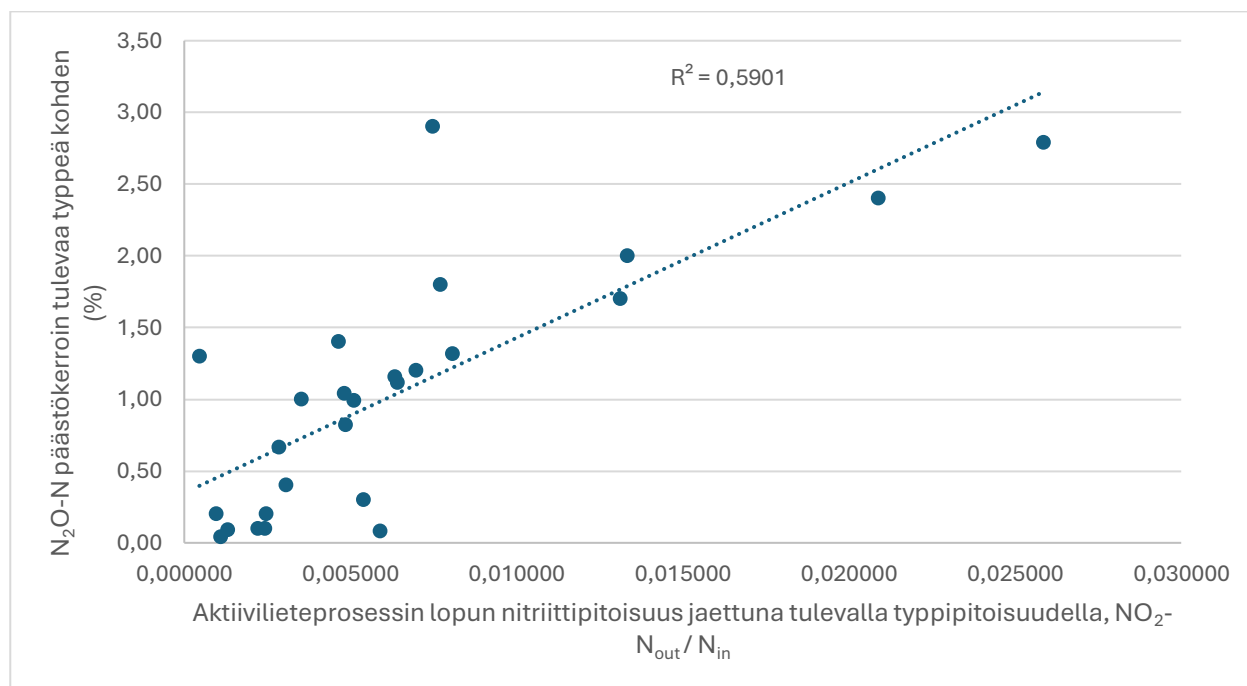
Metaanin päästölaskenta perustuu jätevedenpuhdistusprosessin osalta HSY:n puhdistamoilla tehtyihin jatkuvatoimisiin CH₄-päästömittauksiin laitosten poistoilmasta. Aineistoon on sisällytetty Viikinmäen puhdistamon päästömittaukset vuosilta 2017–2024 ja Blominmäen päästömittaukset vuosilta 2023–2024. Voimatuotannon päästölaskennassa aineistona on käytetty Viikinmäen jätevedenpuhdistamon tuoreimpia laitekohtaisia päästömittauksia vuodelta 2018 sekä IPCC:n (2006) raportointiohjeessa esitettyjä laitekohtaisia päästökertoimia kaasumootoreille ja kattiloille. IPCC ei ole päivittänyt laitekohtaisia päästökertoimiaan vuoden 2019 raportointiohjeessa, joten IPCC:n menetelmäohjeiden mukaisesti voidaan käyttää vuonna 2006 esitettyjä kertoimia. Ensisijaisesti laitosten tulisi kuitenkin mitata voimatuotannon laitekohtaiset päästönsä. Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantolaitosten- ja yksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista (1065/2017) eli ns. PIPO-asetus velvoittaa laitoksia mittaamaan energiantuotantoyksiköidensä savukaasupäästöt. Puhdistamoilla käytettävät energiantuotantoyksiköt (kaasumoottorit ja kattilat) ovat tyypillisesti polttoaineteholtaan alle 5 MW. PIPO-asetuksen (1065/2017) mukaan polttoaineteholtaan 1–5 MW:n yksiköiden päästöjen tarkkailuun kuuluu yksi päästömittaus toiminnan alkaessa tai olennaisen muutoksen yhteydessä.

3 Laskentamenetelmät

Laskentatyökalun avulla voidaan arvioida laitoksen suorat typpioksiduuli- ja metaanipäästöt. Tässä luvussa esitellään laskennan pohjana käytettyä tutkimustietoa sekä korrelaatiot, joihin N_2O - ja CH_4 -päästölaskentamenetelmät perustuvat. Lisäksi esitellään laskentayhtälöt kullekin korrelaatiolle. N_2O - ja CH_4 -päästön laskentamenetelmät on jaettu omiin alalukuihinsa (luvut 3.1., 3.2.).

3.1 Typpioksiduulipäästö

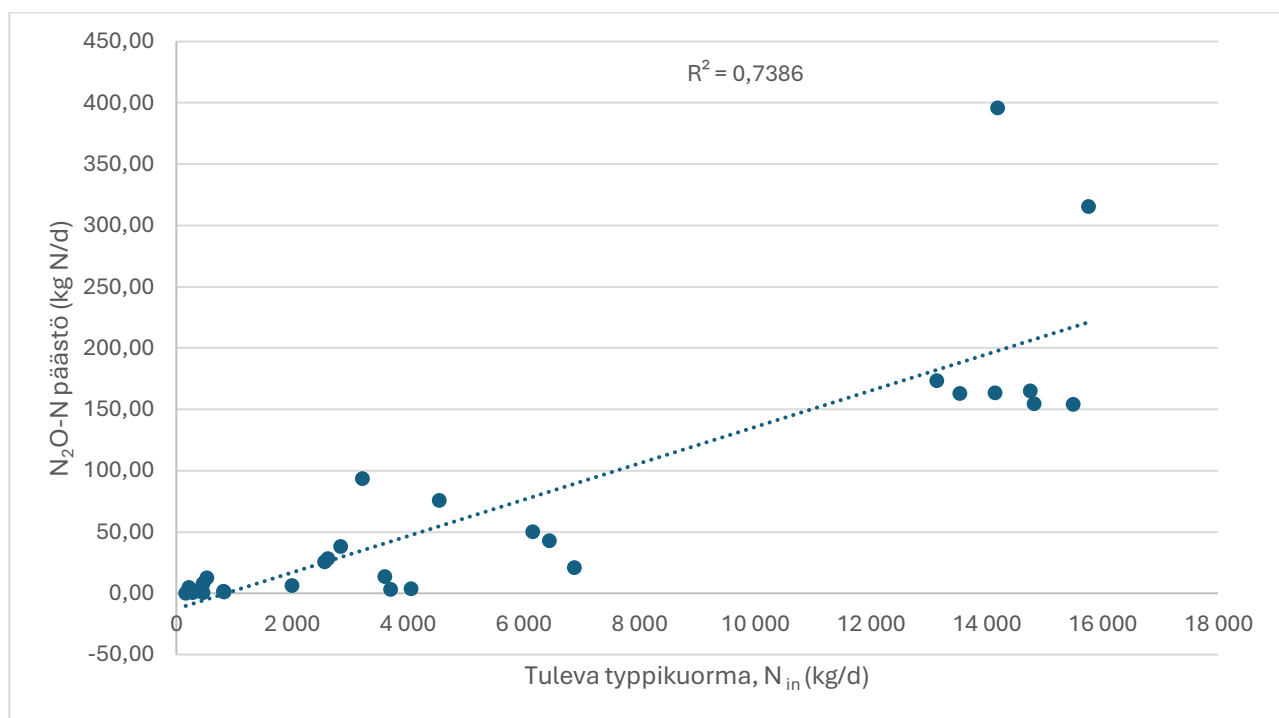
Gruber et al. (2021) ovat esittäneet, että arvioita N_2O -päästöistä voidaan parantaa huomioimalla päästökertoimien laskennassa päästöjen kausittainen vaihtelu, nitriittitypen kertyminen, kokonaistypenpoisto sekä nitrifikaatio. Laskentatyökalun tarkkuuden parantamiseksi N_2O -päästölle valittiin kaksi vaihtoehtoista laskentatapaa: laskenta nitriittitypen ja tulevan typen pitoisuuksien perusteella tai pelkästään tulevan typpikuorman perusteella. Jos laitoksella mitataan aktiivilieteprosessin lopusta (jälkiselkeytetystä vedestä tai ilmastetun vaiheen lopusta) nitriittityppeä, käytetään laskennassa nitriittitypen pitoisuutta, sillä nitriittitypen kertymisen on huomattu korreloivan kohonneen N_2O -päästön kanssa (Gruber et al. 2021; Kuokkanen et al. 2021). Nitriittitypen perusteella laskettaessa käytetään myös tulevaa typpikuormaa, sillä tulevan typen ja nitriittitypen pitoisuuksien sekä N_2O -päästökertoimen välillä huomattiin vahva positiivinen Pearsonin korrelaatio ($r = 0,77$, kuva 1).



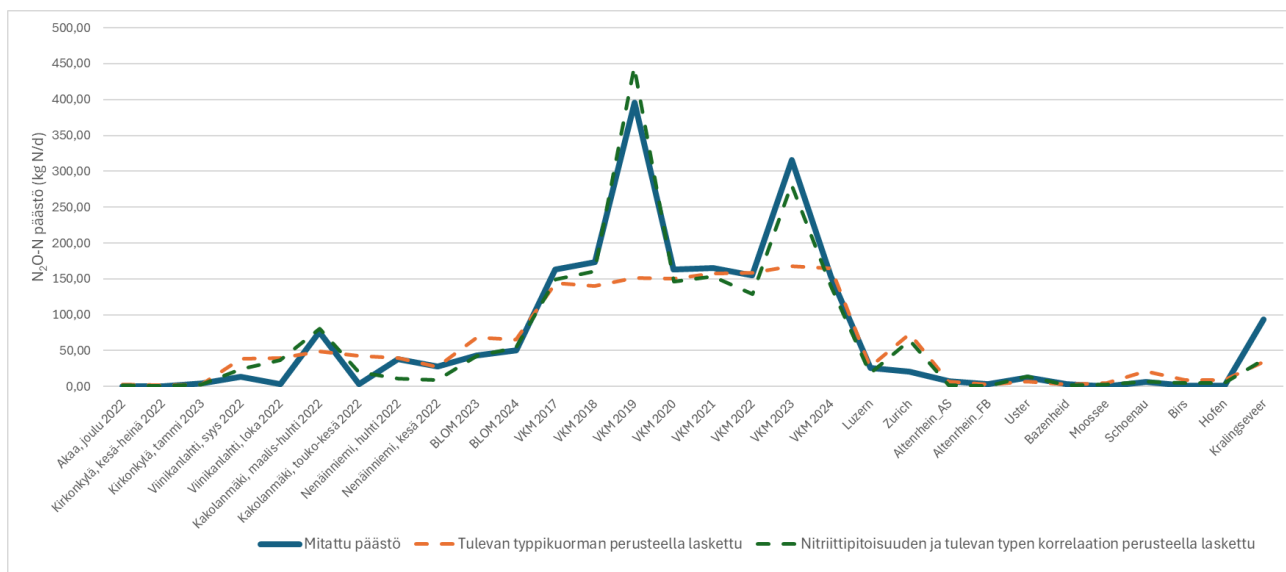
Kuva 1. Aktiivilieteprosessin lopusta mitatun nitriittitypen pitoisuuden ($\text{NO}_2\text{-N}_{\text{out}}$) sekä puhdistamolle tulevan typen pitoisuuden (N_{in}) suhteen korrelaatio N_2O -N päästökertoimen kanssa (Pearsonin korrelaatiokerroin $r = 0,77$, determinaatiokerroin $r^2 = 0,59$).

Nitriittitypen pitoisuuden lisäksi myös tulevan typpikuorman on huomattu korreloivan vahvasti N_2O -päästön kanssa, ja suurimmassa osassa tieteellisissä julkaisuissa N_2O -päästökerroin onkin esitetty tulevan typpikuorman suhteen (Vasilaki et al. 2019). Pelkästään tulevan typpikuorman perusteella laskettaessa käytetään kiinteitä päästökertoimia, riippuen siitä, onko laitoksella kokonaistypenpoisto vai pelkästään nitrifikaatio. Päästökerroin on korkeampi, jos laitoksella ei ole kokonaistypenpoistoa, sillä tehokkaan denitrifikaation on huomattu vähentävän N_2O -päästöjen riskiä. Heterotrofisen denitrifikaation viimeisessä vaiheessa N_2O pelkistyy typpikaasuksi (Chen et al. 2020), joten epätäydellisellä denitrifikaatiolla osa ilmaan päätyvästä tyypestä poistuu N_2O :na. Tehokas denitrifikaatio voi myös toimia N_2O -nieluna nitrifikaation aikana muodostuneelle N_2O :lle (Conthe et al. 2019).

Tulevan typpikuorman huomattiin korreloivan vahvasti N_2O -N-päästön kanssa ($r = 0,86$, kuva 2), mutta laskenta pelkästään typpikuorman perusteella ei kuitenkaan huomioi kohonneiden päästöjen jaksoja yhtä hyvin kuin laskenta nitriittitypen pitoisuuden perusteella (kuva 3). Kuvassa 3 esitetty vaihtelu mitattujen ja laskennallisten kohonneiden päästöjen välillä voidaan huomata myös korrelaatiokertoimissa, sillä tulevan typen perusteella lasketut päästöt korreloivat heikommin ($r = 0,86$, $r^2 = 0,74$) mitattuun päästöön kuin nitriittitypen ja typen pitoisuuksien suhteen lasketut päästöt ($r = 0,98$, $r^2 = 0,96$).



Kuva 2. Tulevan typpikuorman (N_{in}) korrelaatio N_2O -N päästön kanssa (Pearsonin korrelaatiokerroin $r = 0,86$, determinaatiokerroin $r^2 = 0,74$).



Kuva 3. Mitattu N_2O -päästö verrattuna laskennallisiin päästöihin (tulevan typpikuorman sekä nitriittitypen pitoisuuden ja tulevan typen pitoisuuksien korrelaatioiden perusteella laskettuna) aineiston mittausjaksoille esitettynä. * BLOM = Blominmäki, VKM = Viikinmäki.

Jäteveden orgaanisen aineen määrää mitataan yleensä joko kemiallisena hapenkulutuksena (COD, engl. chemical oxygen demand) tai biologisena hapenkulutuksena (BOD, engl. biological oxygen demand). Tekijöistä tarkasteltiin lämpötilaa, BOD-kuormaa, alkaliteettia ja COD:N-suhdetta, mutta näiden välillä ei näkynyt merkittävää korrelaatiota N_2O -päästön kanssa. Vaikka mittausjaksoilla on huomattu myös päästöjen kausittaista vaihtelua muun muassa lämpötilan suhteen, ei kausittaisen vaihtelun sisällyttäminen laskentatyökaluun ollut mielekäästä, sillä korrelaatio jäisi hieman suppeaksi pidempien mittausjaksojen puutteen vuoksi. Toisaalta muutokset esimerkiksi lämpötilassa ja alkaliteetissa johtavat nitriittitypen pitoisuuden kasvuun ja tulevat siten huomioitua laskennassa. Lisäksi E-PRTR raportoinnissa ilmapäästöt ilmoitetaan vuosikeskiarvoina, joten vuosittaisten päästöjen laskeminen tarjoaa riittävän päästötasolaskennan tarkkuuden. Laskentamenetelmät ja -yhtälöt on esitelty tarkemmin seuraavissa alaluvuissa (luvut 3.1.1, 3.1.2).

3.1.1 Laskenta nitriittitypen pitoisuuden perusteella

Aineiston perusteella tutkittiin korrelaatiota aktiivilieteprosessin nitriittitypen pitoisuuden ja N_2O -päästöjen välillä. Todettiin, että nitriittitypen havaitseminen kohonneina pitoisuuksina jälkiselkeytyksessä tai ilmastetun vaiheen lopussa kasvattaa riskiä kohonneista N_2O -päästöistä. Aineiston perusteella arvioitiin 26 mittausjakson nitriittitypen pitoisuuden ja tulevan typpikuorman lineaarista riippuvuutta N_2O -päästökertoimiin, jotka on määritetty tulevaa typpikuormaa kohden. Aineistosta jätettiin 5 mittausjaksoa pois, sillä kyseisillä mittausjaksoilla ei mitattu nitriittitypen pitoisuutta (Nenäinniemi kesäkuu, Altenrhein AS ja FB, Schoenau, Avedere). Aineiston 26 datapisteelle suoritettiin lineaarinen regressioanalyysi, jonka tuloksena saatiin muodostettua yhtälö 1.

$$EF(N_2O)[\%] = 108.09 * \frac{NO_2-N_{\text{lähtevä}} \left[\frac{mg}{l} \right]}{N_{\text{tuleva}} \left[\frac{mg}{l} \right]} + 0.3483 \quad (1)$$

missä EF(N₂O) N₂O-päästökerroin tulevan typen suhteen (%)
 NO₂-N_{lähtevä} nitriittitypen pitoisuus aktiivilieteprosessin lopusta (mg/l)
 N_{tuleva} laitokselle tuleva typpi (mg/l)

N₂O-päästö (kg/a) saadaan laskettua kertomalla yhtälössä 1 esitetty päästökerroin tulevalla typpikuormalla (kg/a) yhtälön 2 mukaisesti.

$$m(N_2O) \left[\frac{kg}{a} \right] = \frac{EF(N_2O)[\%]}{100 [\%]} * N_{\text{tuleva}} \left[\frac{kg}{a} \right] \quad (2)$$

missä EF(N₂O) N₂O-päästökerroin tulevan typen suhteen (%)
 N_{tuleva} laitokselle tuleva typpi (mg/l)

3.1.2 Laskenta tulevan typpikuorman perusteella

Tulevan typpikuorman perusteella laskettiin päästökertoimet erikseen kokonaistypenpoistolle sekä pelkästään nitrifioiville laitoksille. Jos laitoksella on denitrifikaatio eli kokonaistypenpoisto, on päästökerroin pienempi ja siten myös laskennalliset päästöt ovat pienemmät kuin pelkästään nitrifioivilla laitoksilla. Päästökertoimet määritettiin aineiston perusteella tutkimalla laitosten tulevan typpikuorman lineaarista riippuvuutta N₂O-päästöön. Päästökerroin kokonaistypenpoistolle on noin 1,1 % tulevasta tuestä ja pelkästään nitrifioiville laitoksille noin 1,4 % tulevasta tuestä. Laskentatyökalun korrelaatiokertoimissa päästökertoimet on muutettu yksikköön kg/kg tulevan typen suhteen. N₂O-päästö (kg/a) saadaan laskettua kertomalla korrelaatiokerroin (kg/kg) tulevalla typpikuormalla (kg/a) yhtälön 3 mukaisesti. Aineiston perusteella N₂O-päästön kynnsarvo (10 000 kg/a) ylittyy tyypillisesti, kun puhdistamolle tulevan jäteveden typpikuorma ylittää arvon 2 500 kg/d.

$$m(N_2O) \left[\frac{kg}{a} \right] = K * N_{\text{tuleva}} \left[\frac{kg}{a} \right] \quad (3)$$

missä K N₂O-korrelaatiokerroin tulevan typen suhteen (kg/kg)

3.2 Metaanipäästö

Metaanin päästömekanismena huomioidaan jätevedenpuhdistusprosessi sisältäen lietteenkäsittelyn sekä mahdolliset voimatuotannon päästöt. Metaania muodostuu anaerobisissa olosuhteissa jäteveden orgaanisten aineiden mädäntyessä. Fermentatiiviset bakteerit hajottavat orgaanisia aineita ensin rasvahapoiksi ja alkoholeiksi, minkä jälkeen metaania muodostavat bakteerit hajottavat nämä yhdisteet metaaniksi ja hiilidioksidiksi (Smith et al. 2015). Jätevedenpuhdistamon CH₄-päästöjen on huomattu korreloivan laitokselle tulevan orgaanisen kuormituksen sekä biokaasun käytön kanssa (Fred et al. 2008), joten biologisen hapenkulutuksen ja biokaasun suhteen määritettiin omat korrelaatiokertoimet.

3.2.1 Laskenta biologisen hapenkulutuksen perusteella

Biologisen hapenkulutuksen perusteella määritetty CH₄-korrelaatiokerroin kuvaa jätevedenpuhdistusprosessin CH₄-päästöjä sisältäen lietteenkäsittelyn. Laitokselle tulevan BOD:n suhteen määritetty CH₄-korrelaatiokerroin (0,00974 kg CH₄/kg BOD) on laskettu Viikinmäen ja Blominmäen puhdistamoiden vuosikeskiarvoista vuosilta 2017–2024. Blominmäen puhdistamolta mittausdataa on saatavilla vuosilta 2023–2024, sillä puhdistamo on otettu käyttöön vuoden 2022 lopussa. Viikinmäen datasta on jätetty pois vuosi 2022, jolloin päästöt olivat poikkeuksellisen korkeat. CH₄-päästön laskenta perustuu kahdella puhdistamolla suoritettuihin päästömittauksiin, joten tarkempaa korrelaatioanalyysia ei tehty.

CH₄-päästöt mitataan laitosten poistoilmasta, joten korrelaatiokerroin sisältää vesiprosessissa sekä lietteen mädätyksessä syntyvät päästöt. Jos laitoksella ei ole lietteen mädätystä, laskuri voi yliarvioida kyseisen laitoksen päästöt, sillä lietteenkäsittelyssä syntyviä päästöjä ei ole mahdollista eritellä laitosten poistoilmasta tehdyistä mittauksista. Lietteenkäsittelyä pidetään kuitenkin merkittävimpänä CH₄-päästölähteenä jätevedenpuhdistamoilla (Daelman et al. 2012; Schaum et al. 2015), joten HSY:n päästömittauksista laskettu kerroin ei täysin vastaa tilannetta, jossa laitoksella ei mädätetä lietettä.

IPCC (2019) on esittänyt yleisen BOD-päästökertoimen jätevedenpuhdistusprosessille ilman lietteenkäsittelyä, ja tämä päästökerroin on 0,018 kg CH₄/kg BOD. IPCC:n päästökerroin on laskettu keskimääräisellä 0,03 CH₄-korrelaatiokertoimella, jolle on esitetty hajontaa välillä 0,003–0,09. IPCC:n esittämä yleinen päästökerroin on siis korkeampi kuin HSY:n jatkuvatoimisiin mittauksiin perustuva BOD-kerroin, joten muun mittaustiedon puutteessa suomalaisten puhdistamoiden suositellaan käyttävän tässä työssä esitettyä BOD-päästökerrointa, vaikka laitoksella ei mädätettäisi lietettä.

Jätevedenpuhdistusprosessin sekä lietteenkäsittelyn CH₄-päästö (kg/a) saadaan laskettua kertomalla laitokselle tuleva orgaaninen kuorma CH₄-korrelaatiokertoimella yhtälön 4

mukaisesti. Aineiston perusteella CH₄-päästön kynnysarvo (100 000 kg/a) ylittyy laitokselle tulevan BOD-kuorman ollessa noin 30 000 kg/d.

$$m(CH_4, prosessi) \left[\frac{kg}{a} \right] = V_{BOD7} \left[\frac{kg}{a} \right] * K_1 \quad (4)$$

missä V_{BOD7} laitokselle tuleva biologinen hapenkulutus, BOD₇ (kg/a)
 K_1 CH₄-korrelaatiokerroin tulevan BOD:n suhteen (kg/kg)

3.2.2 Laskenta biokaasun perusteella

Biokaasun perusteella määritetyt korrelaatiokertoimet kuvaavat laitoksen voimatuotannon päästöjä. Vaikka laskenta pohjautuu pääosin Fredin et al. (2008) esittämälle laskentamenetelmälle, päivitettiin laskentatyökalua määrittämällä voimatuotannolle laitekohtaiset päästökertoimet kaasumootoreille, kattiloille ja ylijäämäpolttimille. Kaasumootoreiden ja kattiloiden päästökertoimina käytetään IPCC:n vuonna 2006 esittämiä kertoimia 258 mg CH₄/MJ ja 1 mg CH₄/MJ. Viikinmäen jätevedenpuhdistamon vuoden 2018 laitekohtaisen mittauksen vastaavat kertoimet olivat kaasumootoreille 255,25 mg CH₄/MJ ja kattiloille 0,05 mg CH₄/MJ (alle määritysrajan), eli linjassa IPCC:n kertoimien kanssa. Ylijäämäpolttimille IPCC ei ole esittänyt soveltuvaa päästökerrointa biokaasulaitoksille, joten laskentatyökalussa käytetään Viikinmäellä vuonna 2019 mitattua päästökerrointa 451 mg CH₄/MJ. CH₄-korrelaatiokertoimet on muutettu muotoon kg/m³ käytettyä biokaasua kohden käyttämällä Tilastokeskuksen (2024) polttoaineluokituksessa esitettyä tehollista lämpöarvoa jätevedenpuhdistamoiden biokaasulle (23 MJ/m³).

Voimatuotannon CH₄-päästö (kg/a) saadaan laskettua yhtälön 5 mukaisesti. Jos laitoksella ei ole omaa voimatuotantoa, lasketaan päästöt ainoastaan orgaanisen kuormituksen (BOD7) suhteen (yhtälö 4).

$$m(CH_4, voimatuotanto) \left[\frac{kg}{a} \right] = V_{biokaasu, moottoreille} \left[\frac{m^3}{a} \right] * K_2 + V_{biokaasu, kattiloille} \left[\frac{m^3}{a} \right] * K_3 + V_{biokaasu, ylijäämäpolttimille} \left[\frac{m^3}{a} \right] * K_4 \quad (5)$$

missä $V_{biokaasu}$ käytetyn biokaasun määrä kaasumootoreilla, kattiloilla ja ylijäämäpolttimilla (m³/a)

K_2 - K_4 korrelaatiokerroin kaasumootoreilla (K_2), kattiloilla (K_3) ja ylijäämäpolttimilla (K_4) käytetyn biokaasun suhteen (kg/m³)

4 Laskentatyökalun sisältö ja käyttö

Laskentatyökalu on toteutettu Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Excel-laskentapohja on saatavilla VVY:n verkkokaupassa otsikolla ”Jätevedenpuhdistuksen suorien N_2O ja CH_4 -päästöjen laskentatyökalu” (Korhonen et al. 2025).

4.1 Käyttäjän syöttämät tiedot

Käyttäjä syöttää pyydetyt tiedot Laskentataulukko-välilehdelle. Käyttäjää pyydetään syöttämään laitoksen yleistiedot sekä vuosikohtaiset tiedot. Laitoksen yleistietoihin kuuluvat puhdistamon nimi, raportointivuosi sekä seuraavat kyllä/ei -kysymykset:

Onko laitoksella denitrifikaatiota eli kokonaistypenpoistoa, K/E? – Denitrifikaation vaikutus huomioidaan laskettaessa laitoksen N_2O -päästö tulevan typen päästökertoimen perusteella. Kokonaistypenpoiston päästökerroin on pienempi kuin pelkästään nitrifioivilla laitoksilla.

Mitataanko jälkiselkeytetystä vedestä (tai ilmastuksen lopusta) nitriittityppeä, K/E? - Jos aktiivilieteprosessista (jälkiselkeytyksestä tai ilmastetun vaiheen lopusta) mitataan nitriittityppeä, käytetään tätä pitoisuutta ensisijaisesti N_2O -päästön määrittämiseksi. Tällöin denitrifikaation vaikutusta ei huomioida, sillä nitriittityypen kertymisen korrelaatiota kokonaistypenpoiston ja pelkän nitrifikaation välillä ei tutkittu. Nitriittityppipitoisuus suositellaan ilmoitettavan jälkiselkeytetystä vedestä, mutta aineistossa on ollut mukana myös laitoksia, joissa nitriittityppi on mitattu ilmastetun vaiheen lopusta aktiivilieteprosessissa. Laskentatyökalulla voidaan siten huomioida molemmat näytteenottopaikat, vaikka suositellaankin käytettävän jälkiselkeytetystä vedestä mitattuja nitriittityppipitoisuuksia.

Tuotetaanko laitoksella energiaa biokaasusta, K/E? – Jos laitoksella tuotetaan energiaa biokaasusta, lasketaan voimatuotannon laitekohtaiset päästöt tuotetun biokaasun suhteen. Käyttäjän tulee tällöin syöttää laitekohtaisen biokaasun määrä kaasumootoreille, kattiloille ja/tai ylijäämäpolttimille. Jos laitoksella ei ole omaa energiantuotantoa, biokaasun määriä ei tarvitse syöttää. Jos raportointivuonna ei ole esimerkiksi poltettu biokaasua ylijäämäpolttimilla, biokaasun määrän ylijäämäpolttimille voi jättää tyhjäksi tai syöttää arvoksi nollan.

Vuosikohtaisiin tietoihin kuuluvat puhdistamolle tuleva virtaama (m^3/d), tuleva typpi (kg/d), tuleva BOD (kg/d), jälkiselkeytyn tai ilmastetun veden nitriittityppipitoisuus (mg/l) sekä tuotetun biokaasun määrä (m^3/a) ja voimatuotannossa käytetyn biokaasun määrä laitekohtaisesti. Käyttäjän syöttämiä arvoja käytetään päästölaskennassa luvussa 2 esitettyjen laskentakaavojen mukaisesti. Excelin kaavoissa on suoritettu yksikkömuunnokset vastaamaan luvun 2 kaavoja, joten on tärkeää, että käyttäjä syöttää tiedot niissä yksiköissä, joita Excelissä pyydetään. Jos laitoksella on tehty omia päästömittauksia, käyttäjä voi halutessaan muokata lukuarvoja korrelaatiokertoimien taustalla Korrelaatiokertoimet-välilehdellä.

4.2 Tulosten raportointi

Laskentatyökalu ilmoittaa ilmapäästöjen kokonaismäärän vuosikeskiarvona yksikkönä kg/vuosi ja hiilidioksidiekvivalentteina yksikkönä kgCO₂-ekv. /vuosi. Lisäksi laskentatyökalu kertoo, ylittyykö E-PRTR raportointikynnykset kyseisten päästöjen osalta. N₂O-päästön raportointikynnys on 10 000 kg/vuosi ja CH₄-päästön 100 000 kg/vuosi. Kynnysarvot ylittävät laitosteknisen ilmapäästöt on raportoitava. E-PRTR raportointiohjeen mukaan päästöt ilmoitetaan vuosikeskiarvona yksikkönä kg/vuosi kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella. Lisäksi PRTR-rekisterin alaisten laitosten tulee ilmoittaa päästötiedon tuottamismenetelmä, eli perustuvatko tiedot mittauksiin (M), laskelmiin (C) vai arvioihin (E). Jos tietojen on mainittu perustuvan mittauksiin tai laskelmiin, on ilmoitettava käytetty analyysimenetelmä ja/tai laskentamenetelmä. Liitteessä 1 on esitetty esimerkkinä Viikinmäen jätevedenpuhdistamon E-PRTR-ilmapäästöt vuonna 2024. Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla N₂O ja CH₄-päästöt ylittävät kynnysarvot, joten puhdistamon on raportoitava kyseisten yhdisteiden ilmapäästöt. Lisätietoja päästöjen raportoinnista on saatavilla Euroopan komission (2006) julkaisemasta Eurooppalaisen PRTR-rekisterin toteuttamista koskevasta oppaasta.

4.3 Suositukset prosessiparametreille N₂O-päästöjen ehkäisemiseksi

Laskentatyökalussa esitetään suositusarvoja prosessiparametreille N₂O-päästöjen ehkäisemiseksi sekä päästötasolaskennan tarkkuuden parantamiseksi. Suositusarvot on kerätty eri kirjallisuuslähteistä. Suositusparametreiksi valittiin kolme parametriä, joiden tiedetään vaikuttavan N₂O-päästöjen syntymiseen, mutta joita ei ole erikseen huomioitu laskennassa. Riskejä arvioitaessa on huomioitava, että N₂O:n muodostumispolkuja on useita, eikä päästöjen muodostumiselle ole täysin yksiselitteisiä tekijöitä. Suositukset prosessiparametreille onkin tarkoitettu suuntaa antavana tietona yleisistä arvoista sekä huomiona siitä, että laskentatyökalun tulokset ovat luotettavimpia esitetyillä vaihteluväleillä. Suositellut vaihteluvälit on esitetty taulukossa 3. Myös laskennan aineistona käytettyjen puhdistamoiden prosessiparametrit osuivat näille vaihteluväleille.

Taulukko 3. Suositukset prosessiparametreille N₂O-päästötason pienentämiseksi sekä laskentatarkkuuden parantamiseksi.

Parametri	Suosittelun arvo tai vaihteluväli	Lähde
Liuenut happi, aktiivilieteprosessin ilmastetut lohkot	1,5–2,5 mg/l	Peng et al. 2015; Tumendelger et al. 2014
COD:N-suhde, tuleva vesi (suhteen parantaminen lisähiilen annostelulla)	4–10	Henze et al. 2002; Kampschreur et al. 2009; Pan et al. 2013
pH, aktiivilieteprosessi	noin 7–8	Kampschreur et al. 2009; Massara et al. 2017;

4.4 Metaanipäästön hallinta puhdistamoilla

Metaanin kannalta päästömekanismeja ja päästöihin vaikuttavia tekijöitä ei ole tutkittu yhtä laajasti kuin N_2O -päästöä, joten suosituksia prosessiparametreille ei ole esitetty laskentatyökalussa. Toisaalta jopa 72 % jätevedenpuhdistusprosessin CH_4 -päästöistä on arvioitu muodostuvan lietteenkäsittelyssä (Chang et al. 2019), joten lietteenkäsittelyä voidaan pitää pääasiallisena CH_4 -päästölähteenä jätevedenpuhdistamoilla. Suorat päästöt ilmakehään ovat kuitenkin pienemmät, sillä suuri osa tästä kaasusta hyödynnetään biokaasuna.

Jätevedenpuhdistusprosessin anaerobisten olosuhteiden lisäksi metaania muodostuu viemäriverkostoissa, jolloin sitä päätyy puhdistamoille tulevaan jäteveteen liuenneena. Viemäriverkostossa muodostuvan CH_4 -päästön ehkäiseminen ei kuitenkaan varsinaisesti liity jätevedenpuhdistuksen suorien CH_4 -päästöjen vähentämiskeinoin. Lisäksi Daelman et al. (2012) ovat esittäneet, että jopa 80 % tulevaan jäteveteen liuenneesta metaanista hapettuu aktiivilieteprosessin aikana, jolloin prosessi toimii nieluna liuenneelle metaanille. CH_4 -päästöjen hallinta puhdistamoilla perustuukin lähinnä mahdollisten CH_4 -vuotojen hallintaan lietteenkäsittelyn ja biokaasun talteenoton yhteydessä, minkä lisäksi päästöjä voidaan vähentää esimerkiksi tehostamalla lietteenkäsittelytilojen tuuletusilman käsittelyä (Daelman et al. 2012).

5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli päivittää jätevedenpuhdistuksen kasvihuonekaasupäästöjen laskentatyökalu. Työssä päätettiin keskittyä suorien N_2O - ja CH_4 -päästöjen laskentaan, sillä nämä ovat merkittävimmät päästöt suomalaisilla puhdistamoilla. Muiden E-PRTR-rekisterin päästöjen kannalta päästökertoimien päivitystä ei nähty tarpeelliseksi, sillä raportointikynnykset eivät ylity edes suurimmilla suomalaisilla puhdistamoilla.

Työssä tutkittiin päästöihin mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä ja korrelaatioita tuoreimpien päästömittausten kanssa. N_2O -päästön osalta hyödynnettiin mittaustietoa sekä Suomesta että ulkomailta ja päivitettiin päästökertoimet kokonaan uuden tiedon valossa. Kohonneen nitriittityypipitoisuuden huomattiin kasvattavan riskiä kohonneista N_2O -päästöistä, joten ensisijaisesti laskennassa huomioidaan N_2O -päästön korrelaatio laitokselle tulevan typpikuorman sekä jälkiselkeytetyn veden nitriittitypen pitoisuuden kanssa. Jos laitoksella ei mitata jälkiselkeytetyn veden tai ilmastetun vaiheen lopun nitriittitypen pitoisuutta, käytetään laskennassa tulevan typpikuorman suhteen laskettuja päästökertoimia. Tulevan tyypin päästökertoimet huomioivat myös sen, onko laitoksella kokonaistypenpoistoa vai pelkkä nitrifikaatio. Pelkän nitrifikaation suhteen laskettu päästökerroin on korkeampi kuin laitoksilla, joilla on kokonaistypenpoisto, sillä tehokkaan denitrifikaation on huomattu vähentävän N_2O -päästöjen määrää.

CH_4 -päästön huomattiin korreloivan laitokselle tulevan orgaanisen kuormituksen sekä biokaasun käytön kanssa, joten biologisen hapenkulutuksen ja biokaasun suhteen määritettiin omat päästökertoimet. BOD-kerroin kuvaa laitoksen prosessipäästöjä sisältäen lietteenkäsittelyn, kun taas biokaasun suhteen määritetty kerroin kuvaa voimatuotannon päästöjä. Voimatuotannolle määritettiin laitekohtaiset kertoimet biokaasun käytön suhteen. Jos laitoksella ei ole omaa voimatuotantoa, laskennassa huomioidaan ainoastaan BOD-kerroin. BOD-kerroin on määritetty laitoksilla, joissa mädätetään lietettä, joten laskuri voi yliarvioida päästöt laitokselle, jossa ei ole lietteenkäsittelyä. Muun mittaustiedon puutteessa suomalaisten puhdistamoiden suositellaan kuitenkin käyttävän tässä työssä esitettyjä päästökertoimia.

Valmis laskentatyökalu tarjoaa suomalaisille jätevedenpuhdistamoille työkalun suorien N_2O - ja CH_4 -päästöjen arvioimiseksi ja E-PRTR-raportoinnin tueksi. Laskentapohja sisältää myös vuoden 2011 kertoimet ja laskentapohjan, joilla käyttäjä voi halutessaan laskea muita E-PRTR-rekisterin päästöjä. Laskentatyökalu tarjoaa myös suositusarvoja prosessiparametreille N_2O -päästötason pienentämiseksi sekä laskentatarkkuuden parantamiseksi. Tarkimmat arviot N_2O - ja CH_4 -päästöistä saadaan laitokselle, jossa mädätetään lietettä sekä mitataan jälkiselkeytetystä vedestä nitriittitypen pitoisuutta.

Lähteet

- Campos J.L., Valenzuela-Heredia D., Pedrouso A., Val del Río A., Belmonte M. & Moquera-Corral A. (2016).** Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. *Journal of chemistry*. Vol. 2016. s. 1– 12. DOI: 10.1155/2016/3796352
- Chang, S., Guo, W., Hai, F., Liu, Y., Nghiem, L., Nguyen, D., Nguyen T., Ngo, H. & Ni, B. (2019).** Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. *Science of The Total Environment*. Vol. 671. s. 1302–1313. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.386.
- Chen, H., Zeng, L., Wang, D., Zhou, Y. & Yang, X. (2020).** Recent advances in nitrous oxide production and mitigation in wastewater treatment. *Water Research*, 184: Article 116168. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116168
- Conthe, M., Lycus, P., Arntzen, M. Ø., Ramos da Silva, A., Frostergård, Å., Bakken, L. R., Kleerebezem, R. & van Loosdrecht, M. C. M. (2019).** Denitrification as an N₂O sink. *Water Research*, 151: 381–387. DOI: 10.1016/j.watres.2018.11.087
- Daelman, M.R.J., van Voorthuizen, E.M., van Dongen, U.G.J.M., Volcke, E.I.P. & van Loosdrecht, M.C.M. (2012).** Methane emission during municipal wastewater treatment, *Water Research*, Vol. 46. s. 3657–3670. DOI: 10.1016/j.watres.2012.04.024
- Euroopan komissio. (2006).** Eurooppalaisen PRTR-rekisterin toteuttamista koskeva opas. Saatavissa:
<https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Eurooppalaisen%20PRTR-rekisterin%20toteuttamista%20koskeva%20opas.pdf>
- Fred, T., Heinonen, M. Sundell, L. & Toivikko, S. (2008).** Modeling total air emissions at large municipal wastewater treatment plant. *Water Environment Federation*.
- Fred, T., Heinonen, M., Sundell, L. & Toivikko, S. (2009).** Air emissions at large municipal wastewater treatment plants in Finland for national E-PRTR reporting register. *Water Practice & Technology* 4(2).
- Gruber, W., von Känel, L., Vogt, L., Luck, M., Biolley, L., Feller, K., Moosmann, A., Krähenbühl, N., Kipf, M., Loosli, R., Vogel, M., Morgenroth, E., Braun, D. & Joss, A. (2021).** Estimation of countrywide N₂O emissions from wastewater treatment in Switzerland using long-term monitoring data. *Water Research* X, 13: Article 100122. DOI: 10.1016/j.wroa.2021.10012
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. L. C. & Arvin, E. (2002).** Wastewater treatment: Biological and Chemical Processes. Berlin, Germany: Springer. ISBN: 978-3-642-07590-2

IPCC. (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy. Saatavissa: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf

IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5. Waste. Saatavissa: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Ch06_Wastewater.pdf

Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M. & van Loosdrecht, M. C. M. (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43(17): 4093–4103. DOI: 10.1016/j.watres.2009.03.001

Korhonen, K., Kuokkanen, A. & Mikola, M. (2025). Jätevedenpuhdistuksen suorien N₂O- ja CH₄-päästöjen laskentatyökalu. Excel-laskentataulukko. Saatavissa: <https://www.vesilaitosyhdistys.fi/verkkokauppa/tuotteet/jatevedenpuhdistuksen-suorien-n2o-ja-ch4-paastojen-laskentatyokalu/>

Kuokkanen, A., Blomberg, K., Mikola, M. & Heinonen, M. (2021). Unwanted mainstream nitrification–denitrification causing massive N₂O emissions in a continuous activated sludge process. *Water Science and Technology*. 83.9, s. 2207–2217.

Massara, T. M., Malamis, S., Guisasola, A., Baeza, J. A., Noutsopoulos, C. & Katsou, E. (2017). A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Science of the Total Environment*, 596–597: 106–123. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.191

Pan, Y., Ni, B.-J., Bond, P. L., Ye, L. & Yuan, Z. (2013). Electron competition among nitrogen oxides reduction during methanol-utilizing denitrification in wastewater treatment. *Water Research*, 47(10): 3273–3281. DOI: 10.1016/j.watres.2013.02.054

Peng, L., Ni, B.-J., Ye, L. & Yuan, Z. (2015). The combined effect of dissolved oxygen and nitrite on N₂O production by ammonia oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge. *Water Research*, 73: 29–36. DOI: 10.1016/j.watres.2015.01.021

Schaum, C., Fundneider, T. & Cornel, P. (2015). Analysis of methane emissions from digested sludge. *Water Science and Technology*. 73. DOI: 10.2166/wst.2015.644.

Sieranen, M., Hilander, H., Haimi, H., Larsson, T., Kuokkanen, A. & Mikola, A. (2024) Seasonality of nitrous oxide emissions at six full-scale wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*. 89.3. s. 603-612.

Smith, P., Reay, D. and Van Amstel, A. (2015). Methane And Climate Change. London: Taylor & Francis Ltd.

Tilastokeskus. (2024). Polttoaineluokitus 2024. Saatavissa: <https://stat.fi/fi/luokitukset/polttoaineet>

Tumendelger, A., Toyoda, S. & Yoshida, N. (2014). Isotopic analysis of N₂O produced in a conventional wastewater treatment system operated under different aeration conditions. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 28: 1883–1892. DOI: 10.1002/rcm.6973

Valtioneuvosto. (2017). Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista (1065/2017). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2017/1065#OTO>

Vasilaki, V., Massara, T. M., Stanchev, P., Fatone, F. & Katsou, E. (2019). A decade of nitrous oxide (N₂O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: A critical review. *Water Research*, 161: 392–412. DOI: 10.1016/j.watres.2019.04.022

Liite 1 E-PRTR-ilmapäästöt Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla vuonna 2024

Yhdiste	CAS-numero	Ilmapäästö, kg/a	Raportointikynys, kg/a	Päästö suhteessa raportointikynnykseen, %	Menetelmä, M/C/E *
Metaani, CH₄	74-82-8	294 043	100 000	294 %	M/C
Hiilimonoksidi, CO	630-08-0	83 899	500 000	17 %	C
Hiilidioksidi, CO _{2bio}	124-38-9	60 430 365	100 000 000	60 %	M/C
Hiilidioksidi, CO _{2fossil}	124-38-9	306 300	100 000 000	0,3 %	C
Dityppioksidi, N₂O	10024-97-2	88 411	10 000	884 %	M
Ammoniakki, NH ₃	7664-41-7	2 097	10 000	21 %	M
NM VOC		3 459	100 000	3 %	C
Typen oksidit, NO _x		33 231	100 000	33 %	M/C
Rikin oksidit, SO _x		15 930	150 000	11 %	C
1,2-dikloorietaani, EDC	107-06-2	0,7	1 000	0,1 %	C
Dikloorimetaani, DCM	75-09-2	2,9	1 000	0,3 %	C
Heksaklooribentseeni, HCB	118-74-1	0,009	10	0,1 %	C
Pentaklooribentseeni, PCB	608-93-5	0,009	1	0,9 %	C
Tetrakloorieteeni, PER	127-18-4	22	2 000	1,1 %	C
Tetrakloorimetaani, TCM	56-23-5	0,7	100	0,7 %	C
1,1,1-trikloorietaani	71-55-6	0,8	100	0,8 %	C
Trikloorieteeni, TRI	79-01-6	19	2 000	1,0 %	C
Trikloorimetaani	67-66-3	2,3	500	0,5 %	C
Bentseeni	71-55-6	12	1 000	1,2 %	C

* Tiedot perustuvat mittauksiin (M), laskelmiin (C) tai arvioihin (E). Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla prosessipäästöistä mitataan jatkuvatoimisesti seuraavia yhdisteitä: CH₄, CO_{2bio}, N₂O, NH₃, NO_x.

Voimatuotannon ja muiden päästöjen osalta ilmapäästöjen arvot perustuvat Viikinmäen puhdistamon aiempiin mittauksiin. Jatkuvatoimiset mittaukset (M) ja aiempien mittausten perusteella lasketut (C) on eritelty taulukossa. Merkintä M/C tarkoittaa, että yhdisteen prosessipäästöä mitataan jatkuvatoimisesti, mutta voimatuotannon päästö perustuu aiempiin mittauksiin.