



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 31 | 2023

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi

Suvi Lehtoranta, Vuokko Laukka, Kiia Mölsä,
Jarmo Linjama, Janne Pesu, Jyrki Laitinen



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi

Suvi Lehtoranta, Vuokko Laukka, Kiia Mölsä,
Jarmo Linjama, Janne Pesu, Jyrki Laitinen



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 31 | 2023

Suomen ympäristökeskus

Yhdyskuntaratkaisut

Kirjoittajat: Suvi Lehtoranta, Vuokko Laukka, Kiia Mölsä, Jarmo Linjama, Janne Pesu,
Jyrki Laitinen

¹⁾ Suomen ympäristökeskus

Vastaava erikoistoimittaja: Petrus Kautto

Rahoittaja/toimeksiantaja: Ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto, Joensuun Vesi liikelaitos, Kouvolan Vesi Oy, Kymen Vesi Oy sekä Tampereen Vesi Liikelaitos

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (Syke)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Vuokko Laukka ja Pirkko Väänänen

Kannen kuva: Suvi Lehtoranta

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke

ISBN 978-952-11-5599-4 (PDF)

ISSN 1796-1726 (verkoj.)

Julkaisuvuosi: 2023

Tiivistelmä

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi

Vesihuollolle on asetettu kunnianhimoinen tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Laitoskohtaisia vesihuollon päästötarkasteluja jätevedenpuhdistuksen ja lietteenkäsittelyn osalta on jo tehty, mutta ajantasainen käsitys koko vesihuoltosektorin kokonaispäästöistä ja päästöjen vähentämispotentiaalista valtakunnallisella tasolla on puuttunut. Tässä tutkimuksessa arvioitiin Suomen vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä nykytilassa sekä päästövähennystoimien vaikuttavuutta vuoteen 2030 mennessä.

Aineiston keruussa hyödynnettiin tietojärjestelmiä (YLVA ja Veeti), tilastoja sekä aiemmissa tutkimuksissa ja yksittäisiltä vesihuoltolaitoksilta kerättyjä tietoja. Laskenta käsitti vesihuollon eri osa-alueiden suorat kasvihuonekaasupäästöt sekä niiden kuluttaman energian, kemikaalien ja polttoaineiden tuotannosta, kuljetuksesta ja käytöstä aiheutuvat päästöt. Käytön aikaisten päästöjen lisäksi laskentaan sisällytettiin verkostoinfran uudisrakentaminen ja saneeraus sekä kaukolämmön tuotanto jätevedestä.

Tulosten mukaan vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 0,8 miljoonaa tonnia CO₂-ekv/vuosi ja vastaavat siten noin 1,6 % Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa raportoiduista päästöistä. Suurin osa elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu jäteveden- sekä lietteenkäsittelyssä muodostuvista päästöistä (noin 56 %). Suurin yksittäinen kasvihuonekaasupäästöjen lähde on jätevedenkäsittelyssä muodostuvat typpioksiduuli- ja metaanipäästöt (30 %). Muita merkittäviä päästöjen lähteitä ovat energiankulutus (20 %), kemikaalien kulutus (10 %) ja viemäriverkostossa muodostuvat päästöt (9 %).

Päästövähennysskenaarioissa tarkasteltiin toimia, joilla voitaisiin vähentää kasvihuonekaasupäästöjä valtakunnallisella tasolla ja jotka voisivat olla realistisia toteuttaa laajassa mittakaavassa vuoteen 2030 mennessä. Työssä tarkastellut toimet vähensivät päästöjä noin 14–29 %. Merkittävimpiä vesilaitoksia koskevia toimia olivat ravinteiden talteenotto ja kierrätys, kaukolämmön tuotanto jätevesien hukkalämmöstä, energiatehokkuuden kasvattaminen ja energiankäytön sekä kemikaalien käytön optimointi ja kompostoinnin vähentäminen. Suurin päästöjä vähentävä vaikutus oli kuitenkin tarkasteluun sisällytetyllä oletuksella, jonka mukaan kansallinen sähkön ja kaukolämmön päästökerroin pienenee nykyisten politiikkatoimien perusskenaarion (WEM-skenaarion) mukaisesti.

Työssä tarkastellut toimet todettiin riittämättömiksi vesihuollon hiilineutraaliuden saavuttamiseksi vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan merkittäviä toimia lyhyessä ajassa. Eri-tyisesti tulee keskittyä jätevedenpuhdistamojen ja lietteenkäsittelyn typpioksiduuli- sekä metaanipäästöjen vähentämiseen. Lisää tutkimustietoa tarvitaan muun muassa viemäriverkostojen metaanipäästöistä sekä erilaisten ravinteiden talteenottomenetelmien ja lietteenkäsittelymenetelmien ilmastovaikutuksista.

Asiasanat: hiilineutraalius, elinkaariarvio, kiertotalous, päästövähennysskenaario

Sammandrag

Växthusgasutsläpp från vattentjänsterna i Finland och utvärdering av effekterna av åtgärderna för utsläppsminskning

Man har ställt upp det ambitiösa målet att vattentjänsterna ska vara kolneutrala före 2030. Anläggningsspecifika utsläppsgranskningar har redan gjorts i fråga om avloppsreningen och slamhanteringen, men en aktuell uppfattning om de totala utsläppen inom hela vattentjänstsektorn och potentialen att minska utsläppen har saknats på det riksomfattande planet. I denna undersökning utvärderades de nuvarande livscykelutsläppen av växthusgaser inom Finlands vattentjänster och effekterna av åtgärderna för utsläppsminskning fram till 2030.

I datainsamlingen utnyttjades informationssystem (YLVA och Veeti), statistik, data från tidigare undersökningar och från enskilda vattentjänstverk. Beräkningarna omfattade de direkta växthusgasutsläpp från de olika delområdena inom vattentjänsterna samt utsläpp från energianvändning, produktion, transport och användning av kemikalier och bränslen. I beräkningen inkluderades utöver utsläppen under driften även nybyggnad och sanering av nätinfrastrukturen samt produktion av fjärrvärme från avloppsvatten.

Enligt resultaten är vattentjänsternas livscykelutsläpp av växthusgaser cirka 0,8 miljoner ton CO₂-ekv/år och motsvarar därmed cirka 1,6 % av de rapporterade utsläppen i Finlands växthusgasinventering. Största delen av livscykelutsläppen av växthusgaser orsakas av utsläpp som uppstår vid behandling av avloppsvatten och slam (cirka 56 %). Den största enskilda källan till växthusgasutsläpp är de kväveoxidul- och metanutsläpp som bildas vid avloppsvattenbehandling (30 %). Andra betydande utsläppskällor är energiförbrukning (20 %), kemikalieförbrukning (10 %) och utsläpp i avloppsnätet (9 %).

I scenarierna för utsläppsminskningen granskades åtgärder som skulle kunna minska växthusgasutsläppen på riksnivå och som skulle kunna vara realistiska att genomföra i stor skala före 2030. De åtgärder som granskades minskade utsläppen med cirka 14–29 %. De viktigaste anläggningsspecifika åtgärderna var tillvaratagande och återvinning av näringsämnen, produktion av fjärrvärme från spillvärme i avloppsvatten, ökning av energieffektiviteten, optimering av energianvändningen och kemikalieförbrukningen samt minskning av komposteringen. Den största utsläppsminskande effekten hade dock antagandet om att den nationella utsläppskoefficienten för el och fjärrvärme minskar i enlighet med grundscenariot för de nuvarande politiska åtgärderna (WEM-scenariot).

De åtgärder som granskades konstaterades vara otillräckliga för att uppnå kolneutralitet i vattentjänsterna före 2030. För att uppnå målet krävs betydande åtgärder inom en kort tid. Man bör särskilt koncentrera sig på att minska kväveoxidul- och metanutsläppen från avloppsreningsverken och slambehandling. Mer forskningsdata behövs bland annat om avloppsnätens metanutsläpp samt om klimatkonsekvenserna av olika metoder för tillvaratagande av näringsämnen och slambehandling.

Nyckelord: kolneutralitet, livscykelbedömning, cirkulär ekonomi, utsläppsminskningsscenario

Abstract

Greenhouse gas emissions from water services in Finland and evaluating effectiveness of emission reduction measures

An ambitious target of achieving carbon neutrality by 2030 has been set for water management. Emission surveys have already been carried out at individual wastewater treatment and sludge processing plants, but there is no up-to-date data of total emissions in the water management sector and the potential for reducing emissions at the national level. In this study life-cycle greenhouse gas emissions from water services in Finland in the present situation, and the effectiveness of emission reduction measures by 2030 have been evaluated.

Data systems (Ylva and Veeti), statistics, as well as information from previous studies and from individual water utilities were used in the collection of data. The calculations involved the direct greenhouse gas emissions from the different sub-areas of water management as well as emissions from energy use, the production, transport and use of chemicals and fuels. In addition to the emissions caused by the use of the facilities, the calculations included emissions from new construction and renovation of existing network infrastructure, as well as the production of district heat from wastewater.

The results indicate that the life-cycle greenhouse gas emissions from water services are about 0.8 million tons CO₂ eq./year, corresponding to about 1.6 % of the emissions reported in Finland's greenhouse gas inventory. Most of the life-cycle greenhouse gas emissions come from wastewater and sludge processing (about 56 %). Nitrous oxide and methane emissions from wastewater processing form the greatest single source of the greenhouse gases (30 %). Other significant emission sources are energy consumption (20 %), chemical consumption (10 %), and emissions from the sewer network (9 %).

In the emission reduction scenarios, measures that could be used to reduce greenhouse gas emissions on the national level, and that could be realistically implemented on a large scale by 2030 were examined. The measures examined in the study reduced emissions by approximately 14–29 %. The most substantial measures concerning water utilities were the recovery and recycling of nutrients, production of district heat from wastewater heat, increasing energy efficiency, and optimizing the use of energy and chemicals, as well as reducing composting. However, the largest emission-reducing effect was based on the assumption included in the assessment, according to which the national emission factor for electricity and district heating will decline in accordance with the basic scenario of the policy measures (the WEM scenario).

The measures assessed were found to be insufficient to achieve carbon neutrality in water services sector by 2030. In order to reach the target, significant actions are needed in a short period of time. In particular, the focus should be on reducing nitrous oxide and methane emissions from wastewater treatment plants and sludge processing. More research is needed on matters such as methane emissions from sewage networks and the climate effects of different nutrient recovery and sludge processing methods.

Keywords: carbon neutrality, life-cycle assessment, circular economy, emission reduction scenario

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi

Suvi Lehtoranta, Vuokko Laukka, Kiia Mölsä,
Jarmo Linjama, Janne Pesu, Jyrki Laitinen

Tämän raportin ydinviestit:

- Vesihuollolle on asetettu kunnianhimoinen tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä.
- Tutkimuksessa arvioitiin Suomen vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä ja päästövähennysmahdollisuuksia kokonaisuudessaan ensimmäistä kertaa.
- Vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt vastaavat noin 1,6 % Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa raportoiduista päästöistä. Kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää työssä laadittujen skenaariotarkastelujen mukaan 14–29 % vuoteen 2030 mennessä.
- Keskeisiä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen keinoja skenaarioissa olivat ravinteiden talteenotto ja kierrätys, energiankäyttöön ja tuotantoon liittyvät toimet, kemikaalinkäytön optimointi sekä mädätyksen tehostaminen.
- Olemassa olevat päästövähennyskeinot eivät ole riittäviä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi vuoteen 2030 mennessä. Keskeinen ratkaistava kysymys on jätevedenpuhdistuksen suorien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Lisää tutkimustietoa tarvitaan esimerkiksi viemäriverkostojen metaanipäästöistä.

Esipuhe

Suomen kansallisena tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2035. Kunnilla sekä eri sektoreiden toimijoilla on lisäksi omia, osin tiukempiakin tavoitteita. Vesilaitosyhdistys (VVY) on strategiassaan asettanut vesihuollolle tavoitteen olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi maa- ja metsätalousministeriön vesitalousstrategia linjaa, että vesihuoltoa kehitetään hiilineutraaliksi ja toimintavarmaksi muuttuvassa ilmastossa. Tavoite luo painetta yksittäisille laitoksille. Toisaalta kunnallisille vesihuoltolaitoksille motivaatiota päästöjen vähentämiseen voi tulla myös omistajan suunnasta. Vesihuoltolaitokset ovatkin viimevuosina enenevässä määrin tarkastelleet hiilijalanjälkeään ja suunnitelleet erilaisia päästövähennystoimia.

Jotta vesihuollon hiilineutraaliustavoitteeseen voidaan päästä, tarvitaan kokonaisvaltainen kansallisen tason arvio vesihuollon nykytilasta, eli tämänhetkisistä kasvihuonekaasupäästöistä sekä suunnitelma päästöjen vähentämisen keinoista. Tämä tutkimus vastaa tarpeeseen ja esittää kattavan arvion Suomen vesihuollon elinkaarisista kasvihuonekaasupäästöistä sekä tarkastelee päästövähennyskeinojen avulla potentiaalisia päästövähennystoimia koko vesihuollon osalta. Työssä esitetään myös suositukset vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen edistämiseksi.

Tarkastelu tehtiin kaksivuotisessa Vesihuki-tutkimushankkeessa (vesihuollon hiilineutraaliuden ja kiertotalouden edistäminen), jonka rahoittivat ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto sekä neljä hankkeessa mukana ollutta pilottilaitosta: Joensuun Vesi liikelaitos, Kouvolan Vesi Oy, Kymen Vesi Oy sekä Tampereen Vesi Liikelaitos.

Vesihuki-hankkeessa tehtiin pilottilaitoksille hiilijalanjälkeen ja ravinteiden kierrätykseen liittyviä tarkasteluja, joita hyödynnettiin tässä raportissa esitettyyn koko Suomen vesihuoltoa koskevan työn tekemiseen. Pilottikohteille tehtyjen tarkasteluiden tulokset raportoitiin yksityiskohtaisesti vain kyseisille laitoksille, sillä tässä raportissa keskityttiin kansallisen tason tarkastelun esittelyyn. Tässä raportissa on kuitenkin lyhyesti avattu Joensuun Vedelle tehtyä laskentaa, jossa tarkasteltiin vuotovesien vähentämisen vaikutusta Kuhasalon puhdistamon energiataseeseen sekä muodostuviin kasvihuonekaasupäästöihin. Lisäksi Vesihuki-hankkeessa tuotettiin kaikille avoin laskuri, jonka avulla vesihuoltolaitokset voivat helposti laskea suuntaa antavan hiilijalanjäljen laitokselle ja tarkastella erilaisten päästövähennystoimien vaikutuksia.

Vesihuki-hankkeessa tietoa kerättiin pilottikohteiden ohella muilta yksittäisiltä vesihuoltolaitoksilta ja tehtiin useita asiantuntijahaastatteluita, sähköpostikyselyitä ja tiedusteluja. Haluamme kiittää kaikkia taustatietoja antaneita henkilöitä ja tahoja.

Erityisesti haluamme kiittää seuraavia tutkimuksen kannalta merkittävän tietopanostuksen antaneita henkilöitä: pilottikohteiden yhteyshenkilöt ja tiedonkeruussa mukana olleet Emmi-Maria Ukko ja Jukka Mäkitalo (Kymen Vesi), Tiiu Vuori (Tampereen Vesi), Sanna Sorjonen ja Pasi Kakkonen (Joensuun Vesi), Virpi Jääskeläinen, Aleksi Pääki ja Teija Suutari (Kouvolan Vesi); YLVA- ja Veeti-tietojärjestelmien tiedonkeruusta vastanneet Johanna Mikkola-Pusa, Kirsi Merilehto ja Teemu Hynönen (Syke); biokaasutuotannon yksikköaineistosta vastaava Jouko Petäjä (Syke); yksittäisissä asiantuntijakysymyksissä autaneet ja ravinteiden talteenottomenetelmiin liittyen tietoa toimittaneet Anna Mikola ja Milla Siiranen (Aalto-yliopisto) sekä Anna Kuokkanen ja Sini Reuna (HSY) sekä Viljami Kinnunen (Gasum), Anna Virolainen-Hynnä (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry), Juha Grönroos (Syke); skenaariotarkastelun luonnosta kommentoineet Riina Liikanen (VVY) sekä VVY:n jätevesiasiantuntijaryhmän jäsenet; asiantuntijahaastattelun antaneet Riitta Kettunen (Tampereen Vesi), Eelis Kähkönen, Jaakko Hiltunen ja Marko Laakkonen (Kemira), Henri Haimi ja Jarmo Antikainen (FCG), Ritva Britschgi ja Sirkku Tuominen (Syke), Jarkko Laanti ja Esa Malmikare (Turun seudun puhdistamo Oy), Heli Härkki (HSY), Jari Kaukonen

(FiSTT), Petteri Särkiniemi ja Markus Paukkunen (Flowplus Oy), Kalle Pakarinen (Xylem Oy), Minna Nevalainen (Nordkalk); laitoskohtaisiin kyselyihin vastanneet Lasse Sampakoski (Lempäälän Vesi Oy), Maiju Happonen (HSY), Samppa Lallukka (HSY), Mikko Kaartinen (Helen Oy), Mikael Väisänen (Fortum Oy), Osmo Puurunen (Turun Seudun Vesi Oy), Riitta Moisio (Lappeenrannan Lämpövoima Oy), Katri Sippola (Porin Vesi liikelaitos), Sari Rajajärvi (Porvoon Vesi), Reijo Turkki (Mikkelin vesilaitos), Sanna Heinonen (Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy), Jarmo Lahtinen (Oulun Vesi liikelaitos), Sofia Risteelä (Oulun Vesi liikelaitos), Sami Kinnunen (Kymen Vesi Oy), Martin Alm (Porvoon Vesi).

Lopuksi haluamme kiittää ohjausryhmän jäseniä arvokkaista kommentteista koko hankkeen aikana: Riikka Malila (ympäristöministeriö), Petri Nissinen (ympäristöministeriö ja AFRYn vesihuoltolaitosten ilmastotyökalut -hankkeen vetäjä), Johanna Kallio (maa- ja metsätalousministeriö), Saijariina Toivikko (VVY) sekä Jyrki Laitinen ja Jyrki Tenhunen (Syke).

Sisällys

Tiivistelmä.....	3
Sammandrag.....	4
Abstract	5
Esipuhe	7
1 Johdanto.....	13
2 Vesihuollon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen arviointi	16
2.1 Menetelmäkuvaus.....	16
2.2 Tarkasteltavat elinkaarivaiheet ja laskennan rajaukset	17
3 Vesihuollon nykytila Suomessa – elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetty aineisto, laskentaoletukset ja rajaukset.....	19
3.1 Käytetty aineisto	19
3.2 Päästökertoimet.....	20
3.3 Talousveden tuotanto	21
3.3.1 Laskennan rajausta.....	21
3.3.2 Vedentuotannon jakautuminen.....	21
3.3.3 Energiankulutus	21
3.3.4 Kemikaalien kulutus	22
3.3.5 Prosessipäästöt	24
3.4 Vedenjakelu.....	24
3.4.1 Laskennan rajausta.....	24
3.4.2 Energiankulutus	24
3.5 Jäteveden siirto	25
3.5.1 Laskennan rajausta.....	25
3.5.2 Energiankulutus	25
3.5.3 Verkostopäästöt.....	26
3.6 Jätevedenkäsittely.....	26
3.6.1 Laskennan rajausta.....	26
3.6.2 Jätevedenpuhdistamot Suomessa	26
3.6.3 Prosessipäästöt	27
3.6.4 Energiankulutus	29
3.6.5 Kemikaalien kulutus	30
3.6.6 Päästöt vesistöissä	32
3.6.7 Välpejäte	32
3.7 Lämmön talteenotto	32

3.8	Lietteenkäsittely.....	33
3.8.1	Laskennan rajausta.....	33
3.8.2	Lietteen määrät ja ominaisuudet.....	33
3.8.3	Mädätys ja kaasun hyödyntäminen	35
3.8.4	Kompostointi.....	36
3.8.5	Kemiallinen käsittely (Kemicond-menetelmä).....	36
3.8.6	Terminen kuivaus.....	37
3.8.7	Poltto.....	37
3.8.8	Lietteen varastointi	37
3.8.9	Lietteen hyödyntäminen.....	38
3.8.10	Lietteen kuljetukset.....	38
3.9	Verkostojen saneeraus ja uudisrakentaminen.....	39
3.9.1	Aineisto, päästökertoimet ja laskennan rajausta	39
3.9.2	Saneeraus- ja uudisrakennusmäärät.....	40
3.9.3	Putkimateriaalit ja putkien kokojakauma	40
4	Päästövähennysskenaariot ja niissä käytetyt laskentaoletukset ja rajaukset	42
4.1	Skenaarioiden muodostaminen	42
4.2	Skenaario 1: Nykytilan optimointi.....	43
4.2.1	Talousveden tuotanto.....	43
4.2.1.1	Aktiivihiiilen ja antrasiitin käytön optimointi.....	43
4.2.1.2	Kalkin korvaaminen kalkkikivialkaloinnilla.....	45
4.2.1.3	Pintaveden korvaaminen tekopohjavedellä	46
4.2.1.4	Energiatehokkuus ja optimointi.....	46
4.2.2	Vedenjakelun ja jäteveden siirron energiatehokkuus ja optimointi.....	47
4.2.3	Jätevedenkäsittely.....	47
4.2.3.1	Kemikaalin käytön optimointi.....	47
4.2.3.2	Kemikaalivalinnat.....	48
4.2.3.3	Energiatehokkuus ja optimointi.....	49
4.2.4	Lietteenkäsittelyn tehostaminen	50
4.2.5	Energiantuotanto	51
4.2.5.1	Lämmön talteenotto (LTO)	51
4.2.5.2	Aurinkosähkö	52
4.3	Skenaario 2: Ravinteet talteen	53
4.3.1	Ravinteiden talteenotto jätevesistä.....	53
4.3.2	Typen talteenotto	53
4.3.3	Fosforin talteenotto	54
4.4	Skenaario 3: Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen	55
4.5	Substituutiot ja vältettyjen päästöjen määrittäminen.....	55

4.6 Muut mahdolliset skenaariot	56
4.6.1 Käsittelyvaatimukset tiukentuvat	56
4.6.2 Vuotovedet hallintaan	57
5 Tulokset ja tulosten tarkastelu	59
5.1 Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt.....	59
5.1.1 Yhteenveto	59
5.1.2 Talousveden tuotanto	61
5.1.3 Vedenjakelu	64
5.1.4 Jäteveden siirto	65
5.1.5 Jätevedenkäsittely.....	66
5.1.6 Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto	68
5.1.7 Lietteenkäsittely.....	69
5.1.8 Jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn energiatase	72
5.1.9 Verkostojen saneeraus ja uudisrakentaminen.....	73
5.2 Päästövähennysskenaariot.....	74
5.2.1 Yhteenveto	74
5.2.2 Talousveden tuotanto	80
5.2.3 Vedenjakelu ja jäteveden siirto.....	83
5.2.4 Jätevedenkäsittely.....	83
5.2.5 Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto	85
5.2.6 Lietteenkäsittely.....	86
5.2.7 Ravinteiden talteenotto ja kierrätys	88
5.3 Tulevaisuuden tutkimustarpeita hiilineutraaliuden saavuttamiseksi	90
5.3.1 Metaani- ja typioksiduulipäästöjen hallinta	90
5.3.2 Siirtymä kohti energianeutraalia jätevesihuoltoa	90
5.3.3 Lietteenkäsittelyn tutkimustarpeita.....	91
5.3.4 Kiertotalous vesihuollossa	91
6 Johtopäätökset ja suositukset	93
6.1 Tutkimuksen johtopäätökset	93
6.2 Suositukset vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi	94
Lähteet.....	96
Liite 1. Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt	107

1 Johdanto

Vesihuolto vastaa arvioiden mukaan noin 1,8 %:sta maailman kasvihuonekaasupäästöistä. Tässä tutkimuksessa arvioidaan Suomen vesihuollon ilmastovaikutuksia sekä tarkastellaan päästöjä vähentävien toimien vaikutuksia kansallisella tasolla.

Suomessa vesihuollon tavoitteeksi on asetettu hiilineutraalius vuoteen 2030 mennessä. Tavoite on asetettu Vesilaitosyhdistyksen (VVY) strategiassa (VVY 2021). Lisäksi maa- ja metsätalousministeriön vesitalousstrategia linjaa, että vesihuoltoa kehitetään hiilineutraaliksi ja toimintavarmaksi muuttuvassa ilmastossa (MMM 2022). Strategiat eivät kuitenkaan täsmennä, miten hiilineutraalius vesihuollossa määritellään. Molemmissa on lisäksi mainittu vesihuoltoalan edelläkävijyys kiertotaloudessa. Koska vesihuoltolaitokset ovat pääasiassa kunnallisia toimijoita, motivaatio ilmasto- ja kiertotaloustoimien edistämiseen tulee myös suoraan kuntien hiilineutraaliustavoitteista: noin 2/3 kunnista on asettanut ilmastotavoitteen ja jo 29 suurta kuntaa tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2030 mennessä (Sitra 2021). Lisäksi EU:n uutta yhdyskuntajätevesidirektiiviä koskevassa luonnoksessa on esitetty yli 10 000 asukasvastineluvun (AVL) laitoksille tavoite energianeutraalista jätevedenkäsittelystä vuoteen 2040 mennessä (European Commission 2022).

Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelmassa tavoitteeksi asetettiin hiilineutraali Suomi 2035 (Valtioneuvosto 2019). Hallitusohjelmassa todetaan, että päästövähennystoimet toteutetaan sosiaalisesti ja alueellisesti oikeudenmukaisesti ja niin, että kaikki yhteiskunnan osa-alueet ovat mukana. Petteri Orpon hallituksen ohjelmassa todetaan, että Suomi on sitoutunut ilmastolain tavoitteisiin (Valtioneuvosto 2023). Vuonna 2022 voimaan astuneen ilmastolain (423/2022) keskeisenä tavoitteena on varmistaa, että Suomi saavuttaa hiilineutraaliuden viimeistään vuonna 2035. Ilmastolaissa hiilineutraaliudella tarkoitetaan, että ihmisen toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ja nieluja aikaansaavat poistumat ovat yhtä suuret viimeistään vuonna 2035 ja siitä eteenpäin nieluja vaikutus tulee olla päästöjä suurempi.

Hiilineutraaliutta voidaan tarkastella eri ajanjaksoilla ja tasoilla, kuten globaalisti, alueittain tai eri toimijoiden kuten yritysten ja yksilöiden tai tuotteiden ja palveluiden näkökulmasta (Alhola & Seppälä 2014). Ilmastopaneelin selvityksen (Seppälä ym. 2018) mukaan hiilineutraalius-termi voi tarkoittaa tilanteen mukaan melko erilaisia asioita eikä yhtä yhtenäistä ja vakiintunutta käytäntöä toistaiseksi ole. Ilmastopaneeli suosittelee, että väärinymmärrysten välttämiseksi hiilineutraalius tulisi aina määritellä erikseen asiayhteydessä (Seppälä ym. 2019).

Yksinkertaisimmillaan hiilineutraalius voi tarkoittaa sitä, että tarkasteltava toimintojen kokonaisuus aiheuttaa vain sen verran hiilidioksidipäästöjä kuin niitä pystytään sitomaan tietyllä ajanjaksolla. Laajimmillaan hiilineutraalius kattaa kaikki kasvihuonekaasupäästöt ja aiheutettujen kasvihuonekaasupäästöjen nettovaikutus ilmastomuutokseen on nolla valitulla ajanjaksolla. Tästä syystä hiilineutraali-termin rinnalla käytetään myös termiä ilmastoneutraali. Hiilineutraaliuteen pyrkimiseen liittyy usein päästöjen vähentämisen lisäksi päästöjen kompensointi erilaisin keinoin. (Seppälä ym. 2018). Hiilineutraaliuden mittaaminen voi perustua joko inventaariolaskentaan tai elinkaariarviointiin. Kansallisella tasolla hiilineutraaliutta mitataan inventaariolaskentaan perustuen ja kansallinen päästölaskenta rajautuu kattamaan vain maan sisällä tapahtuvat kasvihuonekaasupäästöt.

Arviot vesihuollon kasvihuonekaasupäästöistä vaihtelevat. Menetelmät kasvihuonekaasupäästöjen arvioimiseksi eivät ole yhtenäisiä eivätkä vakiintuneita. Joidenkin arvioiden mukaan, maailmanlaajuisesti vesihuollon päästöt muodostaisivat noin 1,8 % globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä (Ritchie

ym. 2020; GWI 2022). Pohjoismaisissa tarkasteluissa (Tanska, Ruotsi, Norja) päästöjen on arvioitu muodostavan noin 0,4 % kansallisista kasvihuonekaasuinventaariossa raportoiduista päästöistä (EnviDan 2022). Pohjoismaiset tarkastelut eivät kuitenkaan ole menetelmiltään yhtenäisiä, sillä osa arvioista perustuu vain kansalliseen kasvihuonekaasuinventaarioon tai muuten rajattuun arvioon. Myöskään Suomessa vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä ei raportoida omana kokonaisuutenaan valtakunnallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa, vaan päästöt sisältyvät eri sektorien päästölaskentoihin. Esimerkiksi jätevedenpuhdistuksen päästöt sisältyvät jätteiden käsittelyn päästöihin. (Statistics Finland 2022). Tietävästi kattavia, elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä vesihuollolle ei ole Pohjoismaissa eikä muualla Euroopassa laskettu ennen tämän työn valmistumista.

Kiertotalous ja hiilineutraalius linkittyvät vahvasti toisiinsa. VVY:n julkaisussa (Tihinen ym. 2023) on tunnistettu vesihuollon kiertotalouden toimenpiteitä neljän teemakokonaisuuden avulla: materiaalit- ja ravinnekierrot, energiankäyttö, prosessien kehittäminen sekä kiertotalousosaaminen ja yhteistyö. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan seuraavia kiertotaloustoimenpiteitä: jätevesien typen ja fosforin talteenotto ja kierrätys, biokaasun tuotanto ja hyödyntäminen, teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen prosessikemikaaleina, energiatalouden optimointi, lämmön ja jäähdytyksen tuotanto jätevedestä. Lisäksi tarkasteltiin aurinkoenergian tuotantoa ja kemikaalien käytön optimointia sekä jäteveden ilmastuksen optimointia.

Yhdyskuntajätevedet sisältävät paljon hyödyntämätöntä ravinnepotentiaalia (Lehtoranta ym. 2022a; 2022b). Jätevesien ravinteiden kierrätystä on edistetty ja tutkittu useissa ympäristöministeriön RAKI-ohjelman hankkeissa (Ympäristöministeriö 2022). Laajoja eri talteenottotekniikoita kokoavia tutkimuksia ovat tehneet Suomen ympäristökeskus NORMA-hankkeessa (Lehtoranta ym. 2021) sekä Ramboll Finland Oy:n (2023) ravinteiden talteenoton menetelmäselvityksessä. Jätevesien ravinteiden tehokkaampi ja turvallisempi talteenotto mahdollistaa ravinteiden palauttamisen takaisin kiertoon, jolloin voidaan vähentää vesihuollosta aiheutuvia ympäristövaikutuksia ja tehostaa resurssien käyttöä. Jätevesiliikkeen kiertotalouden toimintamalleja ja käytäntöjä on kartoitettu Kumlinin ym. (2021) selvityksessä. Yleisellä tasolla vesihuollon kiertotaloutta on tarkasteltu Vesiviisas kiertotalous -julkaisuissa (Salminen ym. 2020; 2022).

Erilaisia päästövähennystoimia on tarkasteltu VVY:n Vesihuoltolaitoksen ilmastotyökalut -julkaisussa, jossa on annettu myös suositukset vesihuoltolaitoksen hiilijalanjäljen laskentaan (Nissinen ym. 2023). Suuntaviivoja vesihuollon ilmastovaikutuksien arvioimiseen työstetään myös yhteistyössä pohjoismaiden kesken (EnviDan 2022). Viime aikoina on tuotettu yksittäisiä vesihuollon päästötarkasteluja erityisesti jätevedenpuhdistuksen ja lietteenkäsittelyn osalta (Mölsä 2019; Awaitey 2020; AFRY Finland Oy 2021; Havukainen ym. 2022; Maktabifard ym. 2022; Lehtoranta ym. 2022b). VVY:n (2020) julkaisuun on koottu arvioita talousveden tuotantoon, -jakeluun ja -käyttöön liittyvistä kasvihuonekaasupäästöistä Suomessa ja Norjassa. Talousveden puhdistusprosessia on tarkasteltu elinkaariarvion avulla esimerkiksi Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) osalta Salon (2017) diplomityössä. Verkostojen ja laitosten uudisrakentaminen ja saneeraus on myös tunnistettu merkittäväksi päästölähteeksi (Turun Vesihuolto 2021; Haapakoski 2022). Vesihuollon kokonaispäästöjä on tarkasteltu vuonna 2009 tehdyssä diplomityössä (Tukiainen 2009), mutta ajantasainen käsitys kokonaispäästöistä ja päästöjen vähentämispotentiaalista koko vesihuollolle puuttuu.

Tässä työssä arvioidaan vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä kokonaisuutena ensimmäisen kerran Suomessa. Lisäksi tarkastellaan päästöjä vähentävien toimien vaikutuksia skenaariotarkastelujen avulla. Kiertotaloutta tarkastellaan osana vesihuollon hiilineutraaliuden edistämistä. Tässä työssä hiilineutraaliudella tarkoitetaan tilaa, jossa ihmistoiminnan aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen nettopäästöt hiilidioksidiekvivalentteina ovat nolla vuoden tarkastelujaksolla. Hiilineutraaliuden määritelmään sisällytetään tässä työssä myös substitutioiden kautta muodostuvat vältetyt päästöt.

Raportti koostuu kuudesta osasta: johdannon jälkeen luvussa 2 esitellään tutkimusmenetelmät, käytetty aineisto sekä tarkasteltavat elinkaarivaiheet ja tutkimuksen rajausta yleisellä tasolla; luvussa 3 kuvataan laskennassa tarkasteltu vesihuollon nykytila ja tarkennetaan vesihuollon eri osa-alueiden tarkastelussa käytettyä aineistoa, laskentaoletuksia ja rajausta; luvussa 4 esitellään päästövähennysskenaariot ja niissä käytetyt laskentaoletukset ja rajaukset; luvussa 5 esitellään tulokset ja niiden tarkastelu sekä nykytilan että päästövähennysskenaarioiden osalta; luvussa 6 esitetään tutkimuksen johtopäätökset ja suositukset.

2 Vesihuollon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen arviointi

Tutkimuksessa arvioitiin Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt sekä tarkasteltiin mahdollisia päästövähennystoimia elinkaariarviointiin perustuvalla menetelmällä. Työ rajattiin koskemaan vain vesihuoltoverkostojen piirissä olevaan vesihuoltoon. Tarkastelu kattoi vesihuollon keskeiset osa-alueet talousveden tuotannosta jäteveden- ja lietteenkäsittelyyn.

2.1 Menetelmäkuvaus

Vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin elinkaariarviointiin (Life Cycle Assessment, LCA) perustuvalla standardoidulla menetelmällä (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006). Elinkaariarviointimenetelmän avulla voidaan eritellä vesihuollon eri elinkaarivaiheiden kasvihuonekaasupäästöjä ja tunnistaa tekijöitä tai vaiheita, joiden kasvihuonekaasupäästöt ovat toiminnan elinkaaren aikana merkittävimpiä. Tässä työssä vesihuollon elinkaari määriteltiin sisältävän useita toisiinsa kytkeytyviä toimintoja (luku 2.2.), joilla kaikilla on oma elinkaarensa. Elinkaariarviointi koostuu ISO 14040-standardissa neljästä vaiheesta:

- Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely: määritetään tarkasteltava ajanjakso, systeeminrajaus sekä tarkasteltavat ympäristövaikutusluokat.
- Inventaarioanalyysi: tiedon keruu ja päästölaskenta.
- Vaikutusarviointi: päästöt yhteismitallistetaan ympäristövaikutuksiksi. Ympäristövaikutuksia voidaan myös normalisoida ja painottaa.
- Tulosten tulkinta: arvioidaan kerätyt tiedot ja saadut tulokset. Herkkyysanalyysi tulosten tulkinnan tukena.

Haitanjaollista elinkaariarviointia (Attributional Life Cycle Assessment, ALCA) käytetään tyypillisesti hiihijalanjälkilaskennassa, kun määritetään toiminnan aiheuttamaa ilmastokuormaa. Laskennalla kuvataan staattista tilaa ja laskentaan sisällytetään ns. absoluuttiset päästöt, eli ne todelliset tai todelliseksi oletetut päästöt, jotka voidaan mitata tai todentaa. Sen sijaan, seurausvaikutuksellista elinkaariarviointia (Consequential Life Cycle Assessment, CLCA) voidaan käyttää tilanteissa, joissa kuvataan jonkin tietyn päätöksen seurausvaikutuksia ympäristöön. Tällöin laskentaan voidaan sisällyttää myös vältettyjä päästöjä, jotka muodostuvat substituutioista, eli tuotteen tai palvelun korvaamista toisella tuotteella tai palvelulla. Vältettyjä päästöjä ei voida mitata, todentaa tai valvoa, vaan ne perustuvat aina oletuksilla mallintamiseen.

Ilmastovaikutusten arvioinnissa vertailutilanteen määrittäminen on keskeistä, jotta voidaan johdonmukaisesti arvioida tarkasteltavan toiminnon vaikutusta ilmastoon. Ihmisen toiminta aiheuttaa kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin ja metaanin päästöjä. Koska päästöjen lähteet ovat suurempia, kuin niitä poistavat nielut, lisääntyy kasvihuonekaasujen pitoisuus ilmakehässä. Tämä aiheuttaa maapalloa lämmittävän säteilypakotteen. Ilmastovaikutus tarkoittaa ihmisen toiminnasta muodostuvien suorien ja epäsuorien kasvihuonekaasupäästöjen (ml. nielujen muutokset) aiheuttamaa

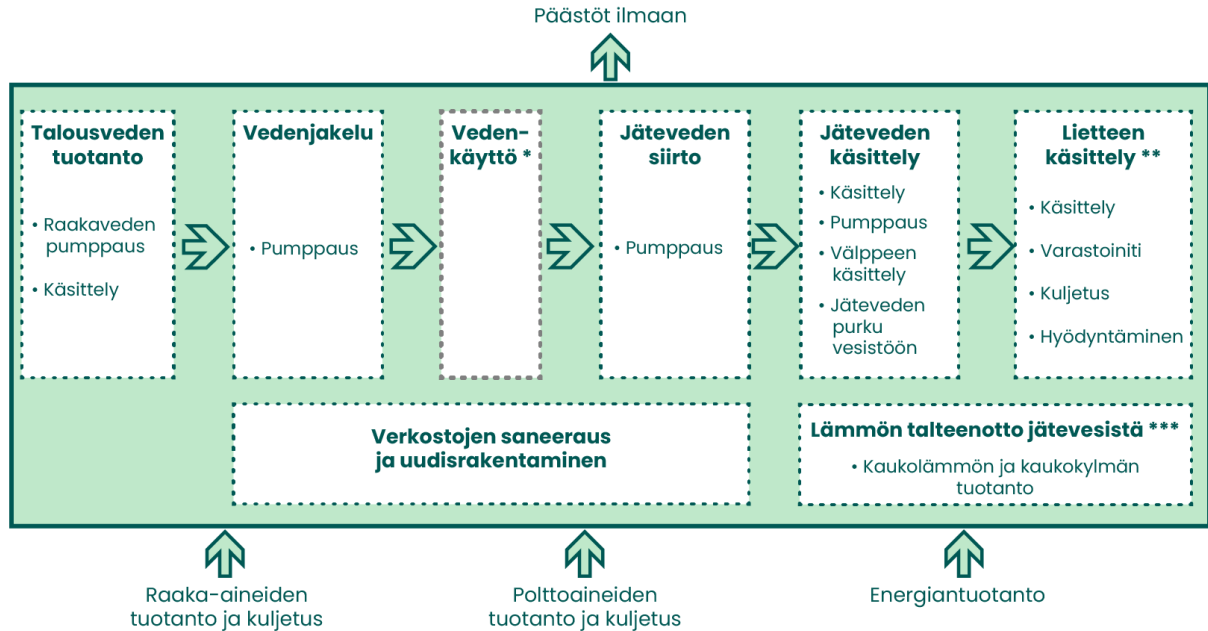
säteilypakotteen muutosta. Varsinainen ilmastovaikutus muodostuu siis tarkastelun kohteena olevan yksikön ja sen vertailutilanteen kasvihuonekaasutaseiden erotuksesta. Koska haitanjaollisessa elinkaariarvioinnissa pyritään arvioimaan ihmisen toiminnan vaikutuksia ympäristöön, johdonmukainen vertailutilanne on tilanne, jossa tarkasteltavaa toimintoa ei ole. Näin ollen vesihuollon ilmastovaikutuksia arvioitaessa, johdonmukainen valinta vertailutilanteeksi olisi tilanne, jossa ei ole vesihuoltoa. Tämä johtaa haastavaan tilanteeseen, jossa tulisi esimerkiksi määrittää, mitä jätevedeen päätyvälle orgaaniselle ainekselle ja ravinteille tapahtuisi tai miten vedenotto tapahtuisi ilman nykyistä vesihuoltoa. Koska vertailutilanteen määrittäminen vesihuollon nykytilanteelle on käytännössä hyvin haasteellista eikä tämän tutkimuksen kannalta tarpeenmukaista, päädyttiin tässä tutkimuksessa rajaamaan tarkastelu koskemaan nykytilassa vain vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä haitanjaolliseen elinkaariarviointiin (ALCA) perustuen. Lisäksi työssä tehtiin skenaariotarkasteluja (luku 4) vesihuollon ilmastovaikutusten pienentämiseksi seurausvaikutuksellista elinkaariarviointia soveltaen (CLCA). Skenaariotarkastelujen yhteydessä tarkasteltiin, miten päästöt muuttuvat, kun käyttöön otetaan päästöjä vähentäviä toimenpiteitä. Samalla tarkasteltiin, miten päästöjä vähentävät toimenpiteet vaikuttavat mahdollisiin substituutioihin ja niistä muodostuviin vältettyihin päästöihin (luku 4.5).

Ilmastovaikutuksia aiheuttavista kasvihuonekaasuista tyypillisimmät ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja typpioksiduuli (N_2O). Kasvihuonekaasujen ominaislämmitysvaikutus sekä elinikä ilmakehässä vaihtelevat. Esimerkiksi hiilidioksidipäästöt poistuvat ilmakehästä lyhytikäisiä kasvihuonekaasupäästöjä, kuten metaania, hitaammin, mikä lisää niiden ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Metaani puolestaan on voimakas, mutta suhteellisen lyhytikäinen kasvihuonekaasu, jonka lämmittävä vaikutus ilmakehässä säilyy noin kymmenen vuotta. Ilmastovaikutuksia mitataan tyypillisesti elinkaariarvioinnissa GWP-menetelmällä (Global Warming Potential), joka muuntaa eri kasvihuonekaasujen yksikköpäästöjen lämmitysvaikutuksen hiilidioksidiekvivalenteiksi ottaen huomioon lämmitysvaikutuksen valitun ajanjakson aikana. Tyypillinen tarkasteltu ajanjakso on 100 vuotta (GWP100), koska se on yhdenmukainen YK:n ilmastositomuksen ja sen alaisen Kioton pöytäkirjan kanssa. Myös tässä tutkimuksessa tarkasteltavana ajanjaksona käytettiin 100 vuotta. Päästöjen karakterisoinnissa käytettiin kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion vuoden 2022 (Statistics Finland 2022) laskentakäytäntöjen mukaisesti IPCC:n (Forster ym. 2007) asettamia GWP-kertoimia metaanille ja typpioksiduulille (metaani 25, typpioksiduuli 298). Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan ei sisällytetty orgaanisen aineksen hajoamisessa muodostuvia hiilidioksidipäästöjä vallitsevien laskentaohjeistusten mukaisesti (mm. ISO 14067 2018; Nissinen ym. 2023).

2.2 Tarkasteltavat elinkaarivaiheet ja laskennan rajaukset

Työ rajattiin kattamaan vesihuollon keskeiset osa-alueet; talousveden tuotannon (sisältää vedenhankinnan), vedenjakelun, jäteveden siirron, jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn sekä kaukolämmön – ja kaukokylmän tuotannon puhdistetusta jätevedestä (kuva 1). Laskennassa huomioitiin sekä vesilaitoksilla tapahtuva lietteenkäsittely että ulkoistettu, keskitetyn lietteenkäsittelyn piirissä tapahtuva lietteenkäsittely. Työ rajattiin koskemaan vain vesihuoltoverkostojen piirissä olevaa vesihuoltoa, eikä tarkastelu sisältänyt kiinteistökohtaista vesihuoltoa tai muutaman kiinteistön kattavia järjestelmiä. Laskenta käsitti jokaisen tarkastellun vesihuollon osa-alueen toiminnoista aiheutuvat suorat kasvihuonekaasupäästöt sekä niiden kuluttaman energian, kemikaalien ja polttoaineiden tuotannosta, kuljetuksesta ja käytöstä aiheutuvat päästöt. Käytönaikaisten päästöjen lisäksi laskentaan sisällytettiin verkostoinfran uudisrakentaminen ja saneeraus. Verkostoinfran rakentamisen ja saneeraamisessa laskennassa huomioitiin materiaalien valmistus sekä asennukseen kuluva konetyö.

Riittämättömien lähtötietojen vuoksi työn ulkopuolelle rajattiin olemassa olevan infran rakentamisen päästöt, laitosten uudisrakentaminen ja -saneeraus, huolto ja ylläpitotyöt, jätehuolto, henkilöauto-liikenne sekä sakokaivolietteen pumppaus ja kuljetus. Tarkastelun ulkopuolelle rajattiin myös teollisuu-
dessa käsiteltävät jätevedet ja lietteet, hulevedet, vedenkäyttö kiinteistöillä (esim. vedenlämmitys), kiinteistökohtainen vesihuolto sekä Ahvenanmaan vesihuolto.



*Vedenkäyttö ei sisälly tarkasteluun

**Huomioitu vesihuoltolaitosten oma lietteenkäsittely sekä ulkoistettu lietteenkäsittely esim. yhteiskäsittelylaitoksilla

***Huomioitu vesihuoltolaitosten oma lämmön talteenotto jätevesistä ja muista toimista sekä energiyhtiöiden kaukolämmön ja kaukokylmän tuotanto jätevesistä

Kuva 1. Laskennan rajausta kattaa vesihuoltoverkostojen piirissä olevan vesihuollon eri osa-alueet. Laskennan ulkopuolelle rajatut seikat on kuvattu luvussa 2.2.

3 Vesihuollon nykytila Suomessa – elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetty aineisto, laskentaoletukset ja rajaukset

Valtakunnallisessa vesihuollon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskennan lähtöaineiston koonnissa hyödynnettiin Veeti- ja YLVA-tietojärjestelmien tietoja sekä kirjallisuudesta löytyviä valtakunnallisia tilastoja. Aineistoa täydennettiin yksittäisten vesihuoltolaitosten tiedoilla. Jokaista vesihuollon osa-aluetta tarkasteltiin erikseen.

3.1 Käytetty aineisto

Vesihuollon tietojärjestelmän (Veeti) mukaan Suomessa on yhteensä noin 1 800 vesihuolto-organisaatiota, joista 1 131 on vesihuoltolain (119/2001) mukaisia vesihuoltolaitoksia (kunnan määrittämä toiminta-alue on vahvistettu) ja 649 on laitoksia, joille ei ole määritelty toiminta-aluetta. Suurin osa talousvedentuotannon ja jätevesien käsittelyn volyyymista on keskittynyt suuriin laitoksiin: 20 suurinta laitosta käsittää noin 80 % palveluista. Toisaalta verkosto-omaisuus on keskittynyt pienille laitoksille, sillä 23 suurinta laitosta omistaa vain 20 % vedenjakeluverkostosta ja 30 % viemäriverkostosta (Laakso ym. 2018). Toisin sanoen, harvaan asutuilla alueilla verkostokilometrien määrä on suuri suhteessa asukkaiden, toimitetun talousveden ja käsitellyn jäteveden määrään. Vesihuoltoverkoston ulkopuolelle jäävillä kiinteistöillä vedenhankinta ja jätevesihuolto toteutetaan kiinteistökohtaisilla ratkaisuilla. Arviot verkoston liittyjämääristä suhteessa asukasluukuun vaihtelevat: vesijohtoverkon osalta välillä 86–94 % ja viemäriverkon osalta välillä 78–85 % (ROTI 2019; Kuulas ym. 2020; Lapinlampi 2021). Tässä työssä tarkastellaan vain vesihuoltoverkoston piiriin kuuluvaa vesihuoltoa.

Suomen keskitetyn vesihuollon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa päästöt laskettiin hyödyntäen saatavilla olevaa aineistoa joko yhdeltä tai useammalta vuodelta, eivätkä tulokset siten kuvaa tiettyä tarkasteluvuotta. Lähtöaineiston keruussa keskeisiä lähteitä olivat vesihuollon tietojärjestelmä Veeti ja ympäristönsuojelun tietojärjestelmä YLVA. Lisäksi hyödynnettiin kirjallisuudesta löytyviä valtakunnallisia tilastoja (mm. Lahti ym. 2011; Laitinen ym. 2014; Kuulas ym. 2020; Lapinlampi 2021) sekä Tilastokeskuksen tilastoja (Tilastokeskus 2014; 2021a; 2021b; 2022; 2023a; 2023b). Tietoja täydennettiin Vesihuki-hankkeessa mukana olleiden pilottilaitosten sekä muiden yksittäisten vesihuoltolaitosten tiedoilla. Tiedot koottiin pääasiassa sähköpostikyselyillä. Aineiston kokoamisen yhteydessä lähtötiedon todettiin olevan hajanaista ja puutteellista. Myös tutkimustieto eri vaiheiden päästövaikutuksista vaihtelee. Näin ollen laskennassa otettiin huomioon myös arvio päästöjen vaihteluväleistä, joiden avulla lähtötietojen epävarmuutta voitiin havainnollistaa.

Tässä työssä on käytetty Lapinlammen (2021) julkaisuun kerättyjä valtakunnallisia tilastoja vuodelta 2014: talousveden tuotantomuotojen osuudet, verkostoon pumpatun talousveden kokonaismäärä sekä verkoston kokonaispituudet. Lapinlammen tilastot arvioitiin saatavilla olevista tilastoista kattavimmiksi. Tilastot on kerätty Vesihuoltolaitostietojärjestelmä Velvet:stä, joka poistui käytöstä vuonna 2015. Velvet-järjestelmään tiedot kerättiin ELY-keskusten toimesta. Lapinlampi (2021) on täydentänyt ja verrannut Velvet-järjestelmästä kerättyjä vuoden 2014 tilastoja tietokannan vuosien 2010–2013

tilastoihin. Lisäksi tilastoja on täydennetty vesihuollon kehittämissuunnitelmista sekä vesihuoltolaitosten toimintakertomuksista ja verkkosivuilta löytyvillä tiedoilla.

Velvet-järjestelmän korvasi Syken ylläpitämä Veeti-järjestelmän vuonna 2016. Vesihuoltolain (119/2001) mukaiset vesihuoltolaitokset on velvoitettu vesihuoltolain nojalla tallentamaan vuosittaiset operatiiviset tiedot Veeti-järjestelmään. Järjestelmää täyttävät vesihuollosta vastaavat organisaatiot itse ja etenkin pienten organisaatioiden osalta täyttöaste on heikko. Järjestelmän täyttöaste on kuitenkin kasvanut, ja liittyjämääriin ja vesimääriin suhteutettuna se on jo kohtalaisen korkea. Järjestelmä tarkistaa tietoja verrattuna edelliseen vuoteen, mutta kaikkia virheitä ei ole saatu eliminoidua automaattisesti. Tässä tutkimuksessa Veeti-järjestelmästä poimitut energiatiedot tarkistettiin käsin ja selvästi virheellisiksi todetut tiedot poistettiin tarkastelusta. Veeti-järjestelmästä kerättiin tietoja vuosilta 2018–2021. Veeti-järjestelmän täyttöaste kyseisinä vuosina oli vesihuoltolaitosten osalta 50 ja 60 prosentin välillä, mutta kokonaisvesimääristä täyttöaste kattaa noin 80 %.

Veeti-järjestelmästä kerättiin vesihuoltolaitosten energiankulutus- ja virtaamatietoja. Energiankulutuksen osalta Veeti-järjestelmästä poimittiin sähkön- ja lämmönkulutus käyttökohteittain; vedentuo- tanto, vedenjakelu, jäteveden siirto, jäteveden- ja lietteenkäsittely sekä muu energiankulutus. Tämän lisäksi laitoksia tarkasteltiin kokoluokittain siten, että sähkönkulutus kWh/m³ laskettiin erikseen laitosten kokoluokille: 50–999, 1 000–1 999, 2 000–9 999, 10 000–99 999 ja yli 100 000 m³ verkostoon pum- pattua talousvettä tai puhdistamolle tulevaa jätevettä vuorokaudessa. Veeti-järjestelmään on tallen- nettu myös energian tuottotietoja, jos laitoksella on mädättämö oman jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Tällöin on tieto siitä, paljonko vuosittain käytetään biokaasua omaan käyttöön ja paljonko tuotettua biokaasua myydään ulkopuolelle. Tietoja hyödynnettiin energiatuotannon kokonaisuuden laskennassa muiden tietolähteiden ohella.

YLVA-järjestelmästä kerättiin jätevedenpuhdistamoiden virtaamatiedot, kemikaalien kulutus, välppeen määrä ja käsittelymenetelmät sekä lietetiedot. Lietemäärien ja biokaasun tuotannon arvioin- nissa hyödynnettiin myös kansallisia tilastotietoja ja niiden tausta-aineistoja (Tilastokeskus 2021a; 2021b) sekä VVY:n selvitystä aiheesta (Vilpanen & Seppälä 2021). Tässä tutkimuksessa käytetty ai- neisto on kuvattu yksityiskohtaisemmin jokaisen alaluvun yhteydessä.

3.2 Päästökertoimet

Päästökerroin tarkoittaa päästön määrää suhteutettuna nimettyä suuretta kohti (Tilastokeskus 2023b). Päästökerroin siis määrittää, kuinka paljon päästöjä aiheutuu esimerkiksi kutakin tuotantopanosta kohden, kuten käytettyä polttoainetta tai kemikaalia. Käytännössä päästökertoimet samalle tuotanto- panokselle voivat vaihdella erilaisista laskutavoista, mm. valitusta allokointimenetelmästä tai systeemi- rajauksesta johtuen. Valtakunnallisessa tarkastelussa päästökertoimien valintaan lisähaasteita aiheut- taa mm. vaihtelu eri tuotteiden alkuperässä ja tuotantotavassa. Esimerkiksi samaa kemikaalia voi valmistaa useat eri toimittajat, jotka käyttävät raaka-aineita eri lähteistä ja kuljettavat niitä eri mat- koja. Tässä työssä käytetyt päästökertoimet ovat yksinkertaistus monimutkaisemmasta kokonaisuus- desta.

Tässä työssä päästökertoimia hyödynnettiin useista eri lähteistä. Sähkön ja lämmön päästökertoi- mena käytettiin hyödynjakomenetelmään perustuvia elinkaarisia päästökertoimia vuodelle 2020 (Soi- makallio 2020). Käytetyt kertoimet olivat 0,153 kg CO₂-ekv/kWh sähkölle ja 147 kg CO₂-ekv/kWh läm- mölle. Kuljetuksien päästökertoimina käytettiin VTT:n Lipasto-tietokantaan perustuvaa tietoa. Kemikaalien, polttoaineiden tuotannon ja muiden tuotantopanosten päästökertoimet perustuvat

pääasiassa ecoinvent-tietokantaan (ecoinvent 2021). Muut laskennassa käytetyt päästökertoimet ja niiden lähteet on esitetty alla olevissa luvuissa.

3.3 Talousveden tuotanto

3.3.1 Laskennan rajaus

Laskennassa huomioitiin energian ja kemikaalien kulutus ja tuotanto sekä vedentuotannossa muodostuvat suorat kasvihuonekaasupäästöt (prosessipäästöt). Laskennan ulkopuolelle rajattiin vedentuotannossa kuluvat materiaalit (esim. RO-kalvot, UV-lamput ja pumput) sekä puhdistusprosessissa muodostuvan sakan jatkokäsittely. Allasimeytystä käyttävien tekopohjavesilaitosten täyttöhiekan osuus jätettiin laskelmista pois puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Lisäksi erillinen Kouvolan Vedelle tehty laskelma osoitti, että täyttöhiekan osuus hiilijalanjäljessä on hyvin pieni.

3.3.2 Vedentuotannon jakautuminen

Talousvedentuotannon (sisältäen vedenhankinnan) elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt laskettiin kunkin vedentuotantomuodon suhteellinen osuus huomioiden. Vuonna 2014 verkostoon pumpatun talousveden kokonaismäärä oli 409 739 797 m³ ja raakavesilähteiden osuudet olivat seuraavat (Lapinlampi 2021):

- pohjavesi 200 289 576 m³/v eli 48,9 %
- pintavesi 142 774 700 m³/v eli 34,8 %
- tekopohjavesi 66 675 521 m³/v eli 16,3 %

Kokonaismäärät eivät oletettavasti ole paljoa muuttuneet vuodesta 2014, sillä trendit tuotantomuotojen osuuksien ja talousveden kokonaismäärän osalta ovat pysyneet melko tasaisena vuosina 2000–2014 (Lapinlampi 2021).

3.3.3 Energiankulutus

Talousvedentuotannossa energiaa kuluu veden pumppaamiseen, eli raakaveden pumppaamiseen käsittelylaitokselle sekä käsittelylaitoksella tapahtuvaan käsittely-yksiköiden väliseen pumppaukseen. Energiaa kuluu myös käsittelyprosessien pyörittämiseen sekä käsittelylaitosten ja muiden rakennusten lämmittämiseen ja valaistukseen.

Talousveden tuotannon sähkönkulutustietoina käytettiin pilottilaitoksilta ja muilta yksittäisiltä vesi-huoltolaitoksilta koottua tietoa, sillä Veeti-järjestelmän aineiston pohjalta ei ollut mahdollista eritellä sähkönkulutusta talousveden eri tuotantomuodoille. Laskennassa käytettiin mediaanilukua Tampereen, Kouvolan ja Tuusulan pinta- ja pohjavesilaitoksilta sekä yhdeksältä tekopohjavesilaitokselta taulukon 1 mukaisesti (sähköpostikysely lähetettiin suurimmille tekopohjavesilaitokselle). Talousveden tuotannon kokonaissähkönkulutukseksi saatiin noin 270 GWh, josta pintavesilaitoksien osuus oli noin 40 %, pohjavesilaitoksien 45 % ja tekopohjavesilaitoksien 15 %. Mediaaniluvun lisäksi tarkasteltiin sähkönkulutuksen vaihteluväliä hyödyntämällä minimi- ja maksimiarvoja (taulukko 1).

Taulukko 1. Vesilaitosten sähkönkulutus vedentuotantomuodoittain. Datapisteiden lukumäärä kertoo, kuinka monen laitoksen tiedoista arvot on laskettu

Sähkönkulutus kWh/m ³	Minimi	Maksimi	Mediaani	Keskiarvo	Datapisteiden lkm.
Pintavesi	0,19	6,64	0,75	1,74	6
Pohjavesi	0,23	11,31	0,61	1,58	15
Tekopohjavesi	0,38	0,88	0,6	0,62	11

Vesilaitosten lämmöntarve ja -tuotanto arvioitiin Veeti-järjestelmään raportoituhiin tietoihin perustuen. Veeti-järjestelmään raportoitu fossiilisten polttoaineiden kulutus oli yksinomaan kevyttä polttoöljyä ja raportoidut tiedot kattoivat talousvesilaitosten kokonaisvirtaamasta 39 %. Laskennassa oletettiin, että fossiilisten polttoaineiden kulutus liittyi lämmön tuotantoon. Veeti-järjestelmän tiedot ekstrapoloitiin koko virtaamalle saaden kevyen polttoöljyn kulutukseksi yhteensä noin 4 740 MWh. Lämmön tarve allokoitiin eri tuotantomuotojen välille huomioiden niiden osuus talousveden tuotannosta (luku 3.3.1). Lämmönkulutuksen vaihteluväliä ei tarkasteltu.

3.3.4 Kemikaalien kulutus

Yleisimmät Suomessa käytetyt talousveden käsittelymenetelmät ovat kemiallinen saostus, hiekkasuo-datus, aktiivihiehuoatus, otsonointi, desinfiointi, alkalointi ja kovuuden säätö (Lahti ym. 2011). Useimmat näistä perustuvat kokonaan tai osittain kemikaalien käyttöön. Pintavesilaitoksilla kemikaaleja kuluu enemmän kuin pohjavesi- tai tekopohjavesilaitoksilla. Kemikaalien tarve riippuu raakaveden laadusta, joten laitospkohtaiset erot voivat olla merkittäviä.

Kemikaalien kulutus laskettiin pääasiassa Lahti ym. (2011) julkaisussa esitettyjen kulutusmäärien pohjalta ja tietoja tarkennettiin muiden kirjallisuudesta löytyvien arvojen (Kontinen 2013; Lemos ym. 2013; Salo 2017; Huoltovarmuusorganisaatio 2020) sekä yksittäisten laitosten (Tampereen Vesi, Kouvolan Vesi, HSY) kemikaalinkulutuksen perusteella. Vaihteluvälejä kemikaalien kulutukselle ei muodostettu. Laskennassa huomioidut kemikaalien käyttömäärät on esitetty taulukossa 2. Vaikka Lahti ym. (2011) on jo vanha selvitys, se oli saatavilla olevista ainoastaan, joka on tarkastellut kemikaalien käyttöä valtakunnallisesti, kattaen 71 % Suomen talousvedentuotannosta. Laskenta erottelee kemikaalien käyttömäärien erot vedentuotantomuodoittain. Tekopohjavesilaitosten osalta kemikaalinkulutusta tarkennettiin lähettämällä sähköpostikysely isoimmille laitoksille. Vastaus saatiin yhdeksältä laitokselta, joiden verkostoon pumpattu vesimäärä oli 2–22 Mm³/v ja vedentuotanto kattaa yhteensä noin 78 % Suomessa tekopohjavesilaitoksilla tuotetusta talousvedestä. Lisäksi tehtiin arvio pienten tekopohjavesilaitosten (alle 2 Mm³/v) käyttämästä kalkista ja kalkkikivirouheesta isompien laitosten kulutuksen pohjalta. (Taulukko 3)

Kemiallista saostusta käytetään kaikilla pintavesilaitoksilla ja joillakin tekopohjavesilaitoksilla esikäsittelyvaiheessa. Kemiallisen saostuksen tehtävänä on poistaa raakavedestä orgaaninen aines (natural organic matter, NOM). Pintavesilaitoksista suurin osa käyttää ferrisulfaattia saostuskemikaalina, kun taas tekopohjavesilaitoksilla käytetään tyypillisesti polyalumiinikloridia (Huoltovarmuusorganisaatio 2020). Alkalointi on käytössä useimmilla sekä pintavesi-, pohjavesi- että tekopohjavesilaitoksilla. Alkaloinnilla nostetaan veden pH:ta ja lisätään alkaliteettia eli puskurikykyä hapoille (kykyä vastustaa pH:n laskua). Kalsiumia tai magnesiumia sisältävät alkalointikemikaalit nostavat lisäksi veden kovuutta. Taroituksena on vähentää vesijohtoverkoston ja kiinteistöjen vesilaitteiden korroosiota. Alkaloinnissa voidaan käyttää useita eri kemikaaleja (kalkki, lipeä, sooda, rikkihappo) sekä ilmastusta.

Kalkkialkaloinnissa voidaan käyttää sammutettua- tai poltettua kalkkia tai kalkkikivirouhetta. Pintavesilaitoksista vain HSY:llä käytetään poltettua ja muilla sammutettua kalkkia. Kalkin käytössä huomioitiin HSY:n ja Tampereen Veden käyttämät määrät sellaisenaan ja loput laskettiin Lahti ym. (2011) julkaisun tietojen perusteella.

Aktiivihiiisuodatus käytetään lähinnä pintavesilaitoksilla ja joillakin pohjavesilaitoksilla (noin 88 % käsitellystä pintavedestä ja 4 % käsitellystä pohjavedestä, Lahti ym. (2011)). Se poistaa orgaanisia epäpuhtauksia, haju- ja makuhaittoja sekä desinfiointin haitallisia sivutuotteita. Käytetyimmät aktiivihiiisuodatusmenetelmät ovat rakeinen aktiivihiihi (granular activated carbon, GAC) ja jauhemainen aktiivihiihi (powdered activated carbon, PAC) (Vilén 2021). Rakeinen aktiivihiihi reaktivoidaan noin neljän vuoden välein. Lisäksi uutta, useimmiten kivihiilipohjaista aktiivihiihiä, lisätään prosessiin. Laskennassa oletettiin Oulun Vedeltä ja Tampereen Vedeltä saadun tiedon pohjalta, että vuosittain laitosten käyttämästä aktiivihiihiestä 73 % (vaihteluväli 63–83 %) on reaktivoitua aktiivihiihiä ja loput uutta aktiivihiihiä. Antrasiittia käyttää Lahti ym. (2011) julkaisun perusteella 14 % pohjavesilaitoksista. Koska antrasiitin päästökerrointa ei ollut saatavissa, pohjautui antrasiitin elinkaarin kasvihuonekaasupäästö kivihiileen.

Desinfointi on käytössä kaikilla pintavesilaitoksilla, mutta pohjavesi voidaan jättää desinfioimatta, jos kyseessä on hyvin suojattu ja valvottu pohjavesiesiintymä. Yleisimmät desinfiointimenetelmät ovat klooraus, otsonointi ja UV-säteilyn käyttö (Kontinen 2013). Tässä työssä tarkasteltiin desinfointia Lahti ym. (2011) julkaisussa kartoitettujen kemikaalien osalta. Kemikaalien käytön vaihteluväliä ei tarkasteltu.

Kemikaalien kuljetusmatkat vesilaitoksille arvioitiin pilottilaitoksilta saatuun tietoon pohjautuen. Kuljetusmatkana käytettiin 150 km sekä lisäksi tarkasteltiin kuljetusmatkan vaihteluväliä 50–300 km.

Taulukko 2. Talousveden tuotannon kemikaalin- ja suodatushiekan kulutus (t/v)

vedentuotantomuodoittain (pohjavesi ja pintavesi). Prosenttiosuudet kertovat kuinka suuri osa pohjavedestä tai pintavedestä käsitellään ko. kemikaalilla. (Lahti ym. 2011, osa tiedoista päivitetty).

Käyttömäärät	Pohjavesi (t/v)	Kemikaalilla käsitelty pohjavesi (%)	Pintavesi (t/v)	Kemikaalilla käsitelty pintavesi (%)
Sammutettu kalkki	15 825	26 %	1 558	33 %
Poltettu kalkki	-	-	720	67 %
Kalkkikivi (rouhe)	13 645	43 %	2 788	68 %
Dolomiitti	94,8	0,5 %	-	-
Lipeä	1 697	55 %	330	15 %
Sooda	262	20 %	-	-
Hiilidioksidi	404	13 %	2 125	96 %
Rikkihappo	48,3	2 %	224	13 %
Ferrisulfaatti	-	-	12 302	92 %
Polyalumiinikloridi (PAC)	-	-	646	8 %
Saostuspolymeeri	-	-	9,3	12 %
Kloori	8,3	4 %	31,2	21 %
Natriumhypokloriitti	262	34 %	434	79 %
Otsonointi (happi)	-	-	704	44 %
Ammoniakki	-	-	51,2	58 %
Ammoniumkloridi	0,1	0,2 %	8,7	24 %
Vetyperoksidi	0,5	0,1 %	-	-
Suodatushiekka	9 754	36 %	17 382	90 %

Taulukko 3. Tekopohjavesilaitosten kemikaalinkulutus (t/v) vuonna 2021. Mukana yhdeksän isointa laitosta (talousvedentuotanto yhteensä 52 067 270 m³/v), joiden perusteella on tehty arvio pienten laitosten (talousvedentuotanto yhteensä 14 608 251 m³/v) kalkin kulutuksesta.

	Isot laitokset	Pienet laitokset	Yhteensä
Kalkki (t/v)	300	154	454
Kalkkikivi (t/v)	249	163	412
Lipeä (t/v)	252	-	252
Hiilidioksidi (t/v)	99	-	99
Rikkihappo (t/v)	13	-	13
Polyalumiinikloridi (t/v)	1 207	-	1 207
Natriumhypokloriitti (t/v)	224	-	224
Ammoniumsulfaatti (t/v)	6	-	6

3.3.5 Prosessipäästöt

Jotkin alkalointikemikaalit talousveden tuotannossa vapauttavat hiilidioksidia reagoidessaan veden karbonaattien kanssa. Kemiallisessa saostuksessa käytetyt ferrisulfaatti ja polyalumiinikloridi reagoivat vedessä vapauttaen veteen sitoutunutta hiilidioksidia. Käsitellystä vedestä vapautuvan hiilidioksidin määrä arvioitiin Kyung ym. (2013) julkaisussa esitettyihin päästökertoimiin perustuen, jonka mukaan kemikaalin käyttömäärää kohden päästökerroin on polyalumiinikloridilla 0,131 g/CO₂-ekv/g ja ferrisulfaatilla 0,66 g CO₂-ekv/g. Prosessipäästöjen vaihteluväliä ei tarkasteltu.

3.4 Vedenjakelu

3.4.1 Laskennan rajaus

Vedenjakelun elinkaariset kasviuonekaasupäästöt sisältävät tässä työssä vain verkostoon pumpattavan veden energiankulutuksen. Tarkastelun ulkopuolelle rajattiin oletetun vähäisen käytön ja puutteellisten tilastotietojen vuoksi kemikaalinkäyttö, eli vedenjakeluun liittyvä verkostojen desinfiointi. Desinfiointikemikaalien käyttö verkostoissa vaihtelee ja joissakin tapauksissa verkostoja desinfioidaan varmuuden vuoksi, mutta esimerkiksi Kouvolassa verkostodesinfiointia on tehty viimeksi 90-luvulla.

3.4.2 Energiankulutus

Vedenjakelun energiankulutus koostuu verkostoon pumpattavan veden pumppauksen sähkönkulutuksesta. Energiankulutuksessa huomioitiin laitosten kokojakauma, virtaama ja energiankulutus. Energiankulutus arvioitiin Veeti-järjestelmästä saatujen sähkönkulutustietojen pohjalta. Tiedot kerättiin vuosilta 2018–2020 ja tarkastelua tehtiin viiden eri laitokseen mukaan (vesihuolto-organisaation koko määritettiin verkostoon pumpatun talousveden määrän perusteella). Perusoletuksena käytettiin tarkasteltujen vuosien keskiarvoa ja vaihteluvälinä tarkasteluvuosien minimi- ja maksimiarvoja. Sähkönkulutuksen keskiarvot on esitetty taulukossa 4. Verkostoon pumpatun talousveden kokonaismääränä käytettiin vuoden 2014 tilastoa 409 739 797 m³/v (Lapinlampi 2021). Kokonaissähkönkulutus oli 67 072 MWh (vaihteluväli 65 609–68 446 MWh).

Taulukko 4. Vedenjakelun sähkönkulutus eri laitostokojen (vesihuolto-organisaatio) mukaan

Laitostokoko m ³ /vrk	%-osuus tuotetusta talousvedestä	Keskiarvo (kWh/m ³)	Minimi (kWh/m ³)	Maksimi (kWh/m ³)
0–49	0,2	0,498	0,498	0,521
50–999	5,2	0,498	0,498	0,521
1 000–1 999	6,5	0,214	0,189	0,246
2 000–9 999	24,3	0,270	0,259	0,287
10 000–99 999	38,9	0,104	0,103	0,105
≥100 000	24,8	0,066	0,058	0,071

3.5 Jäteveden siirto

3.5.1 Laskennan rajaus

Jäteveden siirron kasvihuonekaasupäästöjen laskenta sisälsi jäteveden siirrossa aiheutuvan energiankulutuksen sekä arvion verkostosta muodostuvista kasvihuonekaasupäästöistä. Laskennan ulkopuolelle rajattiin viemäriverkostojen ylläpitotyö sekä sakokaivolietteen pumppaus ja kuljetus puutteellisten lähtötietojen vuoksi.

3.5.2 Energiankulutus

Jäteveden siirron energiankulutus koostuu lähes yksinomaan jäteveden pumppauksen sähkönkulutuksesta. Tässä tutkimuksessa jäteveden siirron sähkönkulutus arvioitiin Veeti-järjestelmästä saatujen tietojen perusteella vuosilta 2018–2020 huomioiden laitostokojakauma (vesihuolto-organisaation koko määritettiin puhdistamoille tulevan jätevesivirtaaman perusteella). Perusoletuksena käytettiin tarkasteltujen vuosien keskiarvoa ja vaihteluvälinä tarkasteluvuosien minimi- ja maksimiarvoja. Sähkönkulutuksen keskiarvot on esitetty taulukossa 5. Kokonaissähkönkulutus oli 170 039 MWh (vaihteluväli 151 425–180 201 MWh). Jäteveden siirron fossiilisten polttoaineiden kulutus oli Veeti-järjestelmään raportoitujen tietojen perusteella ekstrapoloiden arvioituna 385 MWh. Tästä 99 % oli kevyttä polttoöljyä ja 1 % raskasta polttoöljyä. YLVA-järjestelmään raportoitu siirrettävän jäteveden kokonaismäärä oli 485 448 402 m³ (ks. luku 3.6.1).

Taulukko 5. Jäteveden siirron sähkönkulutus eri laitostokojen (vesihuolto-organisaatio) mukaan

Laitostokoko m ³ /vrk	Sähkönkulutuksen ka (kWh/m ³)	%-osuus käsitellystä jätevedestä	Minimi (kWh/m ³)	Maksimi (kWh/m ³)
50–999	0,853	4	0,762	0,944
1 000–1 999	0,511	4	0,468	0,532
2 000–9 999	0,537	19	0,451	0,642
10 000–99 999	0,329	44	0,301	0,369
≥100 000	0,160	29	0,146	0,170

3.5.3 Verkstopäästöt

Jäteveden orgaaninen aines alkaa hajota jo viemäriverkostossa ja anaerobisissa olosuhteissa hajoamisessa muodostuu metaanipäästöjä. Myös tyyppä haihtuu mm. ammoniakkinä ja typpioksiduulina. Metaanipäästöjen muodostumiseen vaikuttavat mm. jäteveden laatu, viipymä verkostossa sekä lämpötila (Eijo-Río ym. 2015; Liu ym. 2015; Gutierrez ym. 2022). Jäteveden sisältämä kiintoaines voi sedimentoitua putkistoon, jossa metaania voi myös muodostua orgaanisen aineen hajotessa. Päästöjä voi vapautua suuria määriä erityisesti jäteveden pumppauksen yhteydessä, kun vesimassa sekoittuu (Gutierrez ym. 2022). Tutkimustietoa verkstopäästöistä ja niihin vaikuttavista tekijöistä on toistaiseksi vain vähän saatavilla. Viimeaikaiset kansainväliset tieteelliset tutkimukset kuitenkin osoittavat, että viemäriverkostosta haihtuvat kasvihuonekaasupäästöt voivat olla suurempia kuin aiemmin on arvioitu (esim. Jin ym. 2019; Defratyka ym. 2021; Ye ym. 2022; de Foy ym. 2023; Moore ym. 2023, Song ym. 2023).

Mittaustietoa Suomen tai muiden Pohjoismaiden olosuhteista ei kuitenkaan ollut saatavilla tätä työtä tehdessä. Viemäriverkostossa kulkevasta jätevedestä haihtuvat kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin näin ollen tieteellisen kirjallisuuden perusteella. Päästöt laskettiin Liu ym. (2015) ja Clemens ja Haas (1997) tutkimuksiin perustuen. Laskennassa huomioitiin keskimääräiset päästöt ja lisäksi tarkasteltiin metaanipäästöjen vaihteluväliä Liu ym. (2015) mukaisesti. Liu ym. (2015) tutkimus perustuu kirjallisuuskatsaukseen viemäriverkostosta mitatuista metaanipäästöistä erilaisissa ympäristöissä. Metaanipäästöt vaihtelivat katsauksen mukaan välillä 0,12–0,38 kg CO₂-ekv/m³ jätevettä, keskimääräisen päästön ollessa 0,21 kg CO₂-ekv/m³ (kun GWP-kerroin CH₄-päästölle 25). Typpioksiduulipäästöjen muodostumista viemäriverkostoissa on tutkittu vähemmän. Clemens ja Haas (1997) tutkimuksen mukaan typpioksiduulia vapautuu viemäriverkostosta keskimäärin 3,5 g vuodessa henkeä kohden.

3.6 Jätevedenkäsittely

3.6.1 Laskennan rajaus

Jätevedenkäsittelyn elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan sisältyivät jätevedenpuhdistuksessa muodostuvat suorat kasvihuonekaasupäästöt (prosessipäästöt), energian ja kemikaalien kulutus ja tuotanto, päästöt vesistöissä sekä välippeen käsittely. Energian ja kemikaalien kulutuksen ja tuotannon päästöjen laskennassa huomioitiin jätevedenpuhdistamojen koot ja niiden virtaamat sekä lietteenkäsittelyssä tuotettu energia jätevedenpuhdistamoille. Jätevedenkäsittelyprosessissa muodostuvia biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä ei sisällytetty tarkasteluun (luku 2.1).

3.6.2 Jätevedenpuhdistamot Suomessa

Vuonna 2014 yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla käsiteltiin 497 174 758 m³ jätevettä. Lasketun jäteveden osuus oli 307 227 631 m³ ja vuotovesimäärä oli 189 947 127 m³. Vuosittain käsiteltävän jäteveden määrä vaihtelee etenkin sateiden ja sitä kautta vuotovesien määrän vaihtelun vuoksi. Vuosina 2000–2014 kokonaismäärä on vaihdellut 500 Mm³ molemmin puolin, mutta trendi on ollut tasainen. (Lapinlampi 2021) Tässä tutkimuksessa on käytetty jätevesimäärien osalta YLVA-järjestelmän tietoja vuodelta 2021. YLVA-järjestelmän mukaan kokonaisjätevesimäärä oli tuolloin 485 448 402 m³. YLVA-järjestelmästä puuttuu pienimmät puhdistamot, mikä myös vaikuttaa siihen, että kokonaisjätevesimäärä jää pienemmäksi kuin Lapinlammen (2021) esittämä arvio.

YLVA-järjestelmän mukaan vuonna 2021 jätevedenpuhdistamoita oli 353 kappaletta (pääasiassa ympäristöluvanvaraisia puhdistamoita, AVL vähintään 100). Eri kokoluokkien puhdistamoiden lukumäärä jakautui seuraavasti:

- pienet laitokset ($< 1\,000\text{ m}^3/\text{vrk}$), 233 kpl, yhteensä n. $21,6\text{ Mm}^3/\text{v}$
- keskiuuret laitokset ($1\,000\text{--}9\,999\text{ m}^3/\text{vrk}$), 94 kpl, yhteensä n. $111,1\text{ Mm}^3/\text{v}$
- suuret laitokset ($\geq 10\,000\text{ m}^3/\text{vrk}$), 26 kpl, yhteensä n. $352,6\text{ Mm}^3/\text{v}$.

Kokonaisjätevesimäärästä noin 73 % käsiteltiin suurilla, 23 % keskiuurilla ja 4 % pienillä puhdistamoilla. Tässä tutkimuksessa on käytetty samaa kokoluokkajaottelua kuin Laitinen ym. (2014) julkaisussa.

3.6.3 Prosessipäästöt

Jätevedenkäsittelyprosessissa muodostuu suoraa kasvihuonekaasupäästöjä. Huomattava osa päästöistä koostuu lähes yksinomaan typenpoistoprosessissa muodostuvista typpioksiduulipäästöistä. Niiden lisäksi jätevedenkäsittelyssä muodostuu epäsuoria typpioksiduulipäästöjä (ammoniakista ja typen oksideista muodostuva sekundäärinen typpioksiduuli) ja metaanipäästöjä.

Typpioksiduulipäästöt jätevedenpuhdistamolla muodostuvat hyvin kompleksisten muuttujien ja riippuvuussuhteiden kautta. Useat eri muuttujat vaikuttavat päästöjen suuruuteen, esimerkiksi hiili–typpi-suhde (Chen ym. 2020), liuenneen hapen määrä (Peng ym. 2015; Chen ym. 2020), nitriitin kertyminen prosessiin (Gruber ym. 2021; Kuokkanen ym. 2021), ammoniumtyppikuorma (Kosonen ym. 2016), mikrobipopulaation koostumus (Kinnunen 2021) ja pH (Su ym. 2019; Chen ym. 2020). Myös mittausmenetelmät vaikuttavat typpioksiduulin päästökertoimien arviointiin (Vasilaki ym. 2019). Typpioksiduulipäästöjen ennustaminen muuttujien avulla on toistaiseksi hyvin vaikeaa, vaikkakin tarkempia simulointeja ja mallintamista ollaan kehittämässä (Spérandio ym. 2022; Sieranen 2023).

Suomessa jätevedenpuhdistamon typpioksiduulipäästöjä mitataan jatkuvasti vain HSY:n Viikinmäen puhdistamolla. Lyhyitä mittausjaksoja on tehty viime aikoina myös Turun ja Jyväskylän puhdistamoilla (Hilander 2022), sekä Tampereen, Mäntsälän ja Akaan puhdistamoilla (Sieranen 2023). Typpioksiduulipäästöt vaihtelevat sekä puhdistamoiden välillä, että yhden puhdistamon sisällä. Jopa samanlaisen puhdistusprosessin omaavien puhdistamoiden välillä päästökerroin voi vaihdella merkittävästi (Gruber ym. 2021). Typpioksiduulikonsentraatioiden suurta ajallista vaihtelua kuvaa hyvin esimerkiksi Kakolanmäen ja Nenäinniemen puhdistamoiden mittaukset, joissa tuntikeskiarvot vaihtelivat 6–432 % suoritettujen 11 ja 15 päivän mittausajanjaksojen keskiarvoista (Hilander 2022).

Kansainvälisissä tutkimuksissa on havaittu muodostuvissa päästöissä selkeää kausivaihtelua: päästöt ovat tyypillisesti korkealla keväällä maaliskokuussa ja laskevat kunnes minimi saavutetaan syksyllä syys-lokakuussa (Gruber ym. 2021). Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. jäteveden lämpötila sekä sadanta ja sitä kautta hulevesien sekoittuminen jätevesiin (Adouani ym. 2015; Vasilaki ym. 2019). Lämpötilan ja typpioksiduulipäästöjen korrelaatiota ei kuitenkaan ole löydetty Viikinmäen mittauksissa (Kosonen ym. 2016). Typpioksiduulipäästöt vaihtelevat eri käsittelyprosessin osien välillä, mutta tyypillisesti aktiivilieteprosessin ilmastusosuudet vapauttavat noin 80 % typpioksiduulipäästöistä (Chen ym. 2019). Vaihtelua saattaa esiintyä myös saman prosessiyksikön eri osissa, esimerkiksi Sieranen (2023) havaitsi selkeää vaihtelua saman ilmastusaltaan eri osien välillä sekä kahden samalla tavalla operoidun ilmastuslohkon välillä. Mikola ym. (2014) tutkivat jälkiselkeytyksen aikana syntyviä typpioksiduulipäästöjä. Päästöjen paikallisesta vaihteluvuudesta on kuitenkin saatu ristiriitaisia tuloksia ja tästäkin tarvitaan lisää tutkimustietoa, jotta optimaaliset näytteenottopisteet voidaan määrittää (Vasilaki ym. 2022).

Typpioksiduulipäästöjen suuren ajallisen ja paikallisen vaihtelun vuoksi mittausajanjaksojen pituudella, mittausajankohdalla ja mittauspaikalla on suuri merkitys. Vasilaki ym. (2019) havaitsi laajassa kirjallisuuskatsauksessaan, että lyhyet mittausjaksot eivät pääse käsiksi suuriin ajallisiin vaihteluihin, ja ne tuottivat tyypillisesti pienempiä arvioita typpioksiduulipäästöille. Alle kuukauden kestävien mittausjaksojen päästökertoimien keskiarvo oli 0,7 %, kun taas yli vuoden mittauksilla keskiarvoksi saatiin 1,7 %. Myös mittaustiheys vaikuttaa päästöjen arviointiin. Jaksottaisilla mittauksilla saatiin keskiarvoksi 0,44 % ja jatkuvatoimisilla mittauksilla 1,2 %. Jaksottaiset mittaukset, kuten kertanäytteet, eivät todennäköisesti tavoita päivittäisiä keskiarvoja.

Kokonaistypen poiston on havaittu vaikuttavan typpioksiduulipäästöihin. Gruber ym. (2021) havaitsi, että puhdistamoilla, joilla oli kokonaistypen poisto, päästökerroin oli keskimäärin pienempi (ka 0,9 %) kuin puhdistamoilla, joilla oli käytössä vain nitrifikaatio (ka 1,8 %). Jyväskylän Nenäinniemen puhdistamolla tehtyjen lyhyiden mittausjaksojen aikana, typpioksiduulipäästöt olivat 23 % pienemmät kokonaistypen poiston aikaan kuin pelkän nitrifikaation aikaan (Hilander 2022). Sekä Hilander (2022) että Sieranen (2023) havaitsivat tutkimuksissaan, että typpioksiduulipäästöt syntyvät pääasiassa nitrifikaation aikana. Tämän lisäksi suuremmat typpikuormat vesistöissä aiheuttavat enemmän typpioksiduulipäästöjä. Aiheesta ei kuitenkaan vielä ole riittävästi tutkittua tietoa, jotta päästökertoimessa voitaisiin huomioida typenpoistotehokkuus, vaan typpioksiduulipäästöt lasketaan puhdistamolle tulevan typpikuorman mukaan (Gruber & Joss 2021).

Tässä työssä prosessista aiheutuvat typpioksiduulipäästöt arvioitiin yli vuoden kestäneiden ja jatkuvatoimisten mittausjaksojen perusteella: HSY:n Viikinmäen puhdistamon mittaukset vuosina 2012–2013 (Kosonen ym. 2016), ja vuosina 2017–2021 (HSY 2018; 2019; 2021; 2022) sekä sveitsiläisen tutkimuksen 14 puhdistamon päästömittauskoonti (Gruber ym. 2021) (taulukko 6). HSY:n vuosien 2017–2021 jätettiin pois vuoden 2019 päästöt, jotka olivat poikkeavan suuret. Päästökertoimeksi tuli näin ollen 1,57 % N_2O -N/tuleva typpikuorma (vaihteluväli 1,2–1,9 %). Muut kasvihuonekaasupäästöt (metaani ja sekundäärinen typpioksiduuli) arvioitiin HSY:n Viikinmäen ja Suomenojan vuosien 2018–2021 vuosien mittauksiin perustuen, tulokuormaan suhteuttaen. Metaanin päästökertoimeksi saatiin siten 0,0083 kg CH_4 /kg BOD (vaihteluväli 0,0069–0,0125 kg CH_4 /kg BOD), ammoniakille 0,00041 kg NH_3 /kg N (vaihteluväli 0,00025–0,00058 kg NH_3 /N) ja typen oksideille 0,00046 kg NO_x /kg N (vaihteluväli 0,00023–0,000814 kg NO_x /kg N).

Taulukko 6. Typpioksiduulipäästökertoimia kirjallisuudesta. Mukana jatkuvatoimiseen mittaukseen perustuvat, pitkän aikavälin mittauskampanjat Suomesta, Sveitsistä, Hollannista ja Tanskasta, sekä lyhyen aikavälin mittausjaksot Suomesta. Lyhyet mittausjaksot ovat pituudeltaan 4–19 päivää ja ne sijoittuvat eri vuodenaikoihin, jolloin jäteveden lämpötila on merkitty. Pitkät mittausjaksot olivat minimissään yhden vuoden mittaisia.

Päästökerroin (% tulevasta typpikuormasta)	Puhdistamo	Mittausjakson pituus ja lämpötila	Prosessityyppi	Lähde
0,2	Akaa	Lyhyt, $T < 12^\circ\text{C}$	Nitrifikaatio ja osittainen de-nitrifikaatio	Sieranen 2023
0,04 1,8	Kirkonkylä, Mäntsälä	Lyhyt, $T > 12^\circ\text{C}$ Lyhyt, $T < 12^\circ\text{C}$	Kokonaistypen poisto	Sieranen 2023
0,08 0,4	Viinikanlahti, Tampere	Lyhyt, $T > 12^\circ\text{C}$	Nitrifikaatio	Sieranen 2023
0,09 1,7	Kakolanmäki, Turku	Lyhyt, $T > 12^\circ\text{C}$ Lyhyt, $T < 12^\circ\text{C}$	Kokonaistypen poisto	Hilander 2022

Päästökerroin (% tulevasta typpikuormasta)	Puhdistamo	Mittausjakson pituus ja lämpötila	Prosessityyppi	Lähde
1,0 1,3	Nenäinniemi, Jyväskylä	Lyhyt, T > 12°C Lyhyt, T < 12°C	Kokonaistypen poisto (ke- vät), nitrifikaatio (kesä)	Hilander 2022
1,9	Viikinmäki, Helsinki	Pitkä (v. 2012– 2013)	Kokonaistypen poisto	Kosonen ym. 2016
1,2	Viikinmäki, Helsinki	Pitkä (2017– 2021, pl. 2019 ¹⁾)	Kokonaistypen poisto	HSY 2018; 2019; 2021; 2022
1,6	14 puhdistamon ka ²⁾	Pitkä	Kokonaistypen poisto, nitrifi- kaatio ja hiilen poisto	Gruber ym. 2021

¹⁾ Vuoden 2019 päästöt jätettiin pois, koska keskiarvo oli poikkeuksellisen korkea

²⁾ Mukana oli 11 puhdistamoa Sveitsistä, Avedore Tanskasta, Kralingseveer Hollannista ja Viikinmäki Suomesta. Puhdistamoista kolmessa oli käytössä pelkkä nitrifikaatio, kymmenessä denitrifikaatio ja yhdessä hiilenpoisto

3.6.4 Energiankulutus

Jätevedenkäsittelyn energiankulutus, sekä sähkön ja lämmön osuudet vaihtelevat suuresti laitoksittain. Energiankulutukseen vaikuttaa muun muassa laitoksen koko sekä puhdistamon sijainti (erityisesti maanalainen vai maanpäällinen puhdistamo) ja maantieteellinen sijainti, mutta esimerkiksi typenpoistovaatimuksella ei ole selvää vaikutusta puhdistamon energiankulutukseen (Laitinen ym. 2014). Veeti-järjestelmään raportoitujen energiankulutustietojen hyödyntämistä tässä työssä hankaloitti se, että jätevedenpuhdistuksen ja lietteenkäsittelyn energiankulutusta ei järjestelmässä erotella. Näin ollen organisaatioilla, joiden toimintoihin sisältyy sekä jätevedenpuhdistamo että lietteenkäsittely, järjestelmään raportoiduista tiedoista ei ole erotettavissa pelkästään jätevedenkäsittelyn tai lietteenkäsittelyn energiankulutustietoja. Myös muuta omaa energiantuotantoa on raportoitu vaihtelevin käytännöin. Energiankulutustietojen keskiuurten ja pienten laitosten kohdalla voidaan olettaa olevan kuitenkin melko luotettavia, sillä näillä laitoksilla ei yleensä ole lietteenkäsittelyä.

Tässä tutkimuksessa jätevedenkäsittelyn energiankulutus arvioitiin Veeti-järjestelmään raportoitujen kokonaisenergiankulutustietoihin perustuen. Koska Veeti-järjestelmään raportoidut tiedot sisältävät myös lietteenkäsittelyn energiankulutuksen, arvioinnissa hyödynnettiin Laitinen ym. (2014) julkaisua sekä yksittäisten vesihuoltolaitosten julkaisemia tietoja. Kokonaisenergiankulutuksessa huomioitiin laituskoot (vesihuolto-organisaation koko määritettiin puhdistamoille tulevan jätevesivirtaaman perusteella). Virtaamaltaan alle 10 000 m³/vrk olevien laitosten kokonaisenergiakulutustietona käytettiin Veeti-järjestelmästä saatua arvoa, ja sähkön ja lämmön jakaumana laitosten antamista tiedoista laskettua arviota. Virtaamaltaan 10 000–99 999 m³/vrk olevien laitosten kokonaisenergiankulutus arvioitiin Veeti-järjestelmän tietojen perusteella. Koska tässä kokoluokassa joillakin laitoksilla on myös lietteenkäsittelyä, keskiarvosta vähennettiin oletettu lietteenkäsittelyyn kuluva energia. Sähkön ja lämmön jakaumana käytettiin Kymen Vedeltä saatua jakaumaa. Virtaamaltaan yli 100 000 m³/vrk olevia laitoksia on Suomessa vain kaksi: HSY:n Viikinojan ja Suomenojan puhdistamot (Blominmäen puhdistamo valmistui vasta tutkimushankkeen aikana, joten sitä ei olla huomioitu laskennassa). Näiden kokonaisenergiankulutus sekä sähköntuotannon ja lämmön tuotannon osuus laskettiin laitosten julkaisemien tietojen perusteella. Laskennassa käytetyt energiankulutustiedot on koottu taulukkoon 7. Energiankulutuksen vaihteluväliä ei tarkasteltu.

Taulukko 7. Laskennassa käytetyt oletukset energiankulutuksesta laitoskokoluokittain.

Vesihuolto-organisaation koko määritetty puhdistamoille tulevan jätevesivirtaaman perusteella.

Laitoskoko	Energiankulutus kWh/m ³	Sähkön osuus	Lämmön osuus	Energiankulutus MWh/v
Pienet laitokset (< 1 000 m ³ /vrk)	1,99	95 %	5 %	43 300
Keskisuuret laitokset (1 000–1 999 m ³ /vrk)	1,01	95 %	5 %	20 300
Keskisuuret laitokset (2 000–9 999 m ³ /vrk)	0,89	95 %	5 %	81 400
Suuret laitokset (10 000–99 999 m ³ /vrk)	0,65	89 %	11 %	138 300
Suuret laitokset (≥ 100 000 m ³ /vrk)	0,45	70 %	30 %	62 900
Yhteensä				346 200

Lietteenkäsittelyn energiankulutus ja -tuotanto eriytettiin laskennassa jätevedenkäsittelystä. Kuitenkin sekä jätevedenkäsittelyn että lietteenkäsittelyn energiatasetta tarkasteltiin kokonaisuutena (energia-tase esitetty luvussa 5.1.8). Jätevedenpuhdistamojen yhteydessä toimivien biokaasulaitosten tuottama sähkö ja lämpö huomioitiin jätevedenpuhdistamojen energianlähteenä. Lisäksi lämmön lähteenä huomioitiin puhdistamoiden mahdollinen lämmön talteenotto. Se osuus sähköstä, jota ei oma biokaasuntuotanto riittänyt kattamaan, oletettiin olevan Suomen keskimääräistä verkkosähköä. Siltä osin, kun biokaasutuotannolle oletettiin vaihteluväli, heijastui se myös puhdistamoiden käyttämän ostoenergian määrään ja energiankulutuksen päästöihin. Näin ollen ostetulle sähkölle ja lämmölle muodostui vaihteluväli. Ostetun sähkön määrä biokaasutuotannon jälkeen arvioitiin taselaskelman mukaan olevan siten 230 554 MWh/vuosi (vaihteluväli 229 189–237 989 MWh/vuosi).

Biokaasun lisäksi laitokset tuottavat tarvitsemaansa lämpöä fossiilisilla polttoaineilla (kevyt polttoöljy, maakaasu) sekä jätevedestä ja muista toiminnoista talteen otetulla lämmöllä. Fossiilisten polttoaineiden käyttömäärinä hyödynnettiin Veeti-järjestelmään raportoituja tietoja, joiden osalta täyttöaste kattoi Suomen jätevesivirtaamasta 53 %. Polttoaineiden määrät ekstrapoloitiin vastaamaan koko jätevesivirtaamaa. Fossiilisia polttoaineita käytettiin näin arvioituna noin 8 700 MWh, josta kevyttä polttoöljyä oli 83,5 %, raskasta polttoöljyä oli 15,6 % ja maakaasua 0,9 %. Fossiilisten polttoaineiden käytön päästöt arvioitiin Tilastokeskuksen polttoaineluokitusta (2023) käyttäen sekä polttoaineiden valmistuksen päästöjen tietoina hyödynnettiin ecoinvent-tietokantaa (ecoinvent 2021).

3.6.5 Kemikaalien kulutus

Suomessa yleisimmin käytössä oleva jätevedenkäsittelyn prosessi on rinnakkaissaostuksella varustettu aktiivilieteprosessi (Laitinen ym. 2014). Kemiallisen fosforinpoiston yleisimmin käytössä oleva saostuskemikaali on ferrosulfaatti, mutta myös ferrisulfaattia käytetään nykyisin paljon. Laitinen ym. (2014) tutkimuksessa todetaan, että kemikaalien ominaiskulutuksissa on suurta vaihtelua. Tämä selittyy ainakin osittain sillä, että saostuskemikaaleja voidaan käyttää laitoksesta riippuen esi-, rinnakkais- ja jälkisaostuksessa sekä tertiäärikäsittelyssä ja jonkin verran myös ohitusvesien käsittelyssä. Näihin prosesseihin käytetään usein useampaa kuin yhtä saostuskemikaalia, jolloin keskimääräiset ominaiskulutukset vaihtelevat suuresti.

Saatavilla olevista kemikaalien käyttöä koskevista tilastoista ei pysty erottamaan, kuinka suuri osa kemikaaleista kuuluu lietteenkäsittelyyn. Polymeereja käytetään erityisesti lietteenkäsittelyssä kuivausta tehostamassa, mutta jonkin verran myös jätevedenkäsittelyssä jälkisuodatuksessa tai jälkiselkeytyksessä. Koska erottelua jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn kemikaalinkulutuksessa ei pystytty tekemään, kaikki kemikaaleista aiheutuvat päästöt on allokoitu jätevedenkäsittelylle. Poikkeuksena kemiallinen lietteenkäsittely, jossa huomioitiin vetyperoksidin ja natriumhydroksidin kulutus (ks. luku 3.8.5).

Kemikaalien kulutusmäärät arvioitiin Laitinen ym. (2014) julkaisun tietojen sekä YLVA-järjestelmään tallennettujen tietojen pohjalta. YLVA-järjestelmästä kerättiin vuoden 2021 kemikaalien kulutustiedot suurille puhdistamoille (yli 10 000 m³/vrk, 25 kpl, yhden laitoksen kemikaalitietoja ei löytynyt YLVA-järjestelmästä). Suurten puhdistamoiden kemikaalinkulutus huomioitiin laskelmassa sellaisenaan. Keski suurten ja pienten puhdistamoiden osalta käytettiin Laitinen ym. (2014) kerättyjä tietoja ja laskettiin puhdistamoiden (37 kpl) kemikaalien kulutuksen mediaanit sekä kemikaalin käytön yleisyys puhdistamoilla. Näiden tietojen pohjalta arvioitiin kemikaalinkulutuksen kokonaismäärä keski suurilla ja pienillä puhdistamoilla. (Taulukko 8.) Kemikaalien kulutuksen vaihteluväliä ei tarkasteltu.

Tietoa kemikaalien kuljetusmatkoista ei ollut saatavilla kootusti. Näin ollen työssä käytettiin arviota kuljetusmatkoista sekä niille asetettua vaihteluväliä. Perusoletuksessa kemikaalien kuljetusmatkaksi asetettiin 150 km, ja vaihteluvälinä tarkasteltiin 50–300 km.

Taulukko 8. Jätevedenpuhdistamoiden kemikaalin kokonaiskulutus puhdistamoiden kokoluokat huomioiden. Prosenttiosuudet kertovat kuinka suuri osa Suomen jätevesien kokonaismäärästä käsitellään ko. kemikaalilla.

Kemikaali	Isot laitokset (yli 10 000 m ³ /vrk) t/v	Keski suuret laitokset (2000–9 999 m ³ /vrk) t/v	Pienet laitokset (alle 2000 m ³ /vrk) t/v	Yhteensä t/v	%-osuus
Ferro	23 538	7 958	4 075	35 571	65 %
Ferri	24 835	5174	765	30774	39 %
Alumiinisulfaatti	420	1914	942	3277	6 %
PAC	2 253	653		2906	16 %
Kalkki	10 575	494	847	11916	47 %
Kalsiumkarbonaatti	2 125	-	-	2125	10 %
Sooda	5 366	313	-	5679	22 %
Lipeä	156	1432	-	1588	3 %
Metanoli	6 299	436	-	6735	46 %
Rikkihappo	792	91	-	883	5 %
Polymeeri	751	115	46	912	93 %
Modifioitu tarkkelys	25	-	-	25	8 %
Aktiivihiili	8	-	-	8	8 %
Muurahaishappo	8,5	-	-	9	2 %
Glyseroli	207	-	-	207	1 %
Natriumhypokloriitti	603	-	-	6	1 %
Polyamiini	15	-	-	15	1 %

3.6.6 Päästöt vesistöissä

Purkuvesien mukana vesistöön päätyy typpeä. Typestä muodostuu typpioksiduulipäästöjä, joiden määrä laskettiin IPCC:n (2006) asettaman oletuskertoimen mukaisesti (0,005 kg N₂O-N/kg typpeä). Purkuvesien typpikuormitustietona käytettiin YLVA-järjestelmän vuoden 2019 tietoa (10 470 t N). Typpioksiduulipäästöjen vaihteluväliä ei tarkasteltu.

3.6.7 Välpejäte

Välpeen määrän arvioinnissa hyödynnettiin YLVA-järjestelmään raportoituja tietoja. YLVA-järjestelmän mukaan välpejätettä muodostui noin 5 788 tonnia vuonna 2021. Tietoja jouduttiin korjaamaan, sillä osa laitoksista oli syöttänyt tiedot kilogrammoina tonnien sijaan. Kokonaismäärästä 46 % poltettiin energiatehokkuusvaatimukset täyttävissä laitoksissa, 15 % poltettiin laitoksissa, jotka eivät täydy energiatehokkuusvaatimuksiin ja 15 % sijoitettiin kaatopaikalle. Loput 24 % välpeestä käsiteltiin muilla tavoin (mm. mädätys ja kompostointi). Välpeen käsittelyn pienen vaikutuksen ja laskennan yksinkertaistamisen vuoksi sisällytettiin muulla tavoin käsitelty välpe kaatopaikalle sijoittamiseen ja polttamiseen. Näin ollen laskennassa 19 % kaikesta välpeestä oletettiin sijoitettavan kaatopaikalle, ja 80 % päätyvän polttoon. Välpejätteen ominaisuustietoina hyödynnettiin kirjallisuutta (Barillon ym. 2009).

Välpeen käsittelyn päästöt arvioitiin polttamisen osalta hyödyntäen Tilastokeskuksen polttoaine-luokitusta (Tilastokeskus 2023a). Kaatopaikkasijoituksen kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin kansallises-
sassa kasvihuonekaasuinventaariossa käytetyllä menetelmällä (Statistics Finland 2022). Koska tietoa välpeen kuljetusmatkoista käsiteltäväksi ei ollut, käytettiin kuljetusmatkana 100 km sekä vaihteluvälinä 50–300 km. Välpeen käsittelyyn liittyviä vaihteluvälejä ei tarkasteltu.

3.7 Lämmön talteenotto

Lämpöä voidaan ottaa talteen puhdistetusta jätevedestä, ilmanvaihdesta, ilmastuskompressoreista ja lämpöpumppujen hukkalämmöstä puhdistamon tarpeisiin. Lisäksi puhdistetusta jätevedestä talteen otettua lämpöä voidaan hyödyntää kaukolämmön ja kaukokylmän tuotannossa. Lämmöntalteenoton määrä arvioitiin kartoittamalla 23 suuren puhdistamon (käsitelty jätevesimäärä yli 10 000 m³/vrk) lämmön talteenotto jätevesistä sekä muista toiminnoista. Joissakin tapauksissa lämmön talteenotto muista toiminnoista täytyi laskea osaksi lämmön talteenottoa jätevesistä, sillä näitä kahta tuotantolukua ei ollut eroteltu. Lämmön talteenottoa tehdään jossain määrin myös keskisuurilla puhdistamoilla, mutta niitä ei ole kartoitettu tähän tutkimukseen.

Lämmön talteenottomäärät on esitetty taulukossa 9. Huomioitavaa on, että puhdistamolla tapahtuva energiantuotanto on oletettu hyödynnettävän puhdistamon omassa käytössä (esim. rakennusten lämmitykseen, lietteenkäsittelyyn). Kaukolämpöä jätevesien hukkalämmöstä tuotetaan tällä hetkellä Turussa (Turun Seudun Energia, Kakolanmäki), Helsingissä (Helen, Viikinmäki) ja Espoossa (Fortum, Suomenoja). Lisäksi useita laitoksia on suunnitteilla. Tuotannosta vastaa energiayhtiö, eikä tuotettu energia mene laitoksen omaan käyttöön. Kaukolämmön ohella tuotetaan myös kaukokylmää. Kaukolämmön tuotannon kuluttama sähköenergia arvioitiin tuottajien arvioiman COP-luvun (Coefficient Of Performance) perusteella. COP-luku kertoo, kuinka paljon lämpöä lämpöpumppu tuottaa suhteessa pumpun kuluttamaan sähköön. Arvion mukaan kaukolämpö tuottaa noin 2,95 kertaa enemmän lämpöä kuin se kuluttaa sähköä. Sähkönkulutuksen osalta tarkasteltiin myös COP-luvun vaihteluvälillä 2,8–

3.1. Kaukolämmön ja kaukokylmän tuotannon substituutiota ja vältettyjä päästöjä on tarkastelu skenaarioiden yhteydessä (ks. luvut 4.2.5.2 ja 5.2.5).

Taulukko 9. Lämmön talteenotto (LTO) suurilla jätevedenpuhdistamoilla vuonna 2021

Lämmön talteenotto (LTO)	GWh
Kaukolämmön tuotanto (LTO jätevesistä, energiayhtiöt)	746
Kaukokylmän tuotanto (LTO jätevesistä, energiayhtiöt)	36
LTO jätevesistä omaan käyttöön	4
LTO muista toiminnoista omaan käyttöön	12
Yhteensä	798

3.8 Lietteenkäsittely

3.8.1 Laskennan rajaus

Lietteenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt määritettiin käsittelymenetelmittäin. Laskennassa huomioitiin kussakin käsittelyssä muodostuvat suorat kasvihuonekaasupäästöt sekä käsittelyn kuluttaman energian-, kemikaalien- sekä muiden syötteiden tuotannon ja käytön päästöt. Lisäksi huomioitiin lietteen varastoinnissa, hyödyntämisessä ja kuljetuksissa muodostuvat kasvihuonekaasupäästöt. Laskennassa ei huomioitu lietteenkäsittelyssä ja lietteen hyödyntämisessä vapautuvia biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä (luku 2.1).

3.8.2 Lietteen määrät ja ominaisuudet

Lietteen määrästä ja ominaisuuksista kerätään tietoa YLVA-järjestelmään, mutta tieto on paikoin hyvinkin puutteellista. Valtakunnallisista lietteiden määrästä ja ominaisuuksista onkin tehty erilaisia, päivitettyjä arvioita myös viime aikoina (Kinnunen ym. 2023; Ramboll Finland Oy 2023). Lietteen määrän ja sen ominaisuuksien, sekä käsittelytapojen jakauma vaikuttavat keskeisesti lietteenkäsittelyn elinkaarisiin kasvihuonekaasupäästöihin.

Tässä työssä lietteenkäsittelyn päästöt laskettiin lietteenkäsittelymenetelmittäin. Kokonaislietteen määränä käytettiin Tilastokeskuksen Sykelle lietedirektiiviraportointia varten tuottamaa aineistoa, jonka mukaan lietettä muodostuu 154 411 t TS/vuosi (TS = total solids eli kuiva-aine) (Tilastokeskus 2021b). Lietteen märkäpainoksi oletettiin VVY:n julkaisun (Vilpanen & Seppälä 2021) mukaan miljoona tonnia ja käsittelymenetelmien jakaumana käytettiin julkaisussa esitettyä jakaumaa (taulukko 10). Lietteen ravinnepitoisuudet laskettiin massataseen avulla käsittelymenetelmittäin hyödyntämällä OnSite-hankkeessa (Lehtoranta ym. 2022a) tehtyä massataselaskentaa (julkaisematon). Laskentaa päivitettiin sekä muokattiin vastaamaan koko Suomen jätevedenpuhdistamojen ravinnekuormitusta (tiedot YLVA-järjestelmästä) ja lietteen nykyisiä käsittelytapoja (Vilpanen & Seppälä 2021). Massataselaskennan avulla lasketut lietteen ravinteiden määrät sekä muut ominaisuustiedot ja niiden jakauma käsittelymenetelmittäin on esitetty taulukossa 10. Taulukossa 11 on esitetty yksityiskohtaisemmin, miten tyyppien oletettiin säilyvän lietteenkäsittelyn eri vaiheissa. Lietteen sisältämien ravinteiden substituutioita ja vältettyjä päästöjä tarkasteltiin skenaarioiden yhteydessä.

Lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat orgaanisen aineksen pysyvyyteen eri tavoin. Esimerkiksi poltossa orgaanista ainesta ei jää lopputuotteeseen lainkaan ja mädätyksessä osa orgaanisesta

aineesta muuttuu biokaasuksi. Näin ollen loppukäyttöön päätyvä hiilen määrä ja sen laatu vaihtelevat. Kun puhdistamolietettä hyödynnetään viherrakentamisessa tai maataloudessa, orgaaninen aines alkaa hajota vapauttaen hiiltä. Orgaanisen aineen hajoamisnopeuteen vaikuttaa sen laatu; osa hiilestä vapautuu ilmakehään nopeammin ja osa hitaammin (Heikkinen ym. 2021). Tietopohja lietteenkäsittelymenetelmien vaikutuksista hiilen pysyvyyteen ja menetelmät vaikutusten arviointiin ovat kuitenkin vielä kehitteillä ja epävarmoja (esim. Brandão ym. 2011; Celestina ym. 2019; Chenu ym. 2019; Lam ym. 2020). Tässä työssä lietteenkäsittelymenetelmien vaikutuksia hiilen pysyvyyteen ja biogeenisiin hiilidioksidipäästöihin ei arvioitu.

Taulukko 10. Laskennassa käytetyt lietteetiedot käsittelymenetelmittäin. Käsittelymenetelmien jakauma perustuu VVY:n selvitykseen (Vilpanen ja Seppälä 2021). Kokonaistyyppi ja kokonaisfosfori ovat laskennalliset arvot laskeutetun lietteen ravinnemääristä, ennen lietteen kuivausta.

Käsittelymenetelmä	Käsittelyn osuus	† TS/vuosi	† VS/vuosi (68 %)	Ntot/vuosi	Ptot/vuosi
Mädätys ja kompostointi	42 %	64 850	44 100	3 861	1 544
Mädätys	30 %	46 320	31 500	2 758	1 103
Kompostointi	17 %	26 250	17 850	1 563	625
Kemiallinen käsittely	5 %	7 720	5 250	460	184
Mädätys ja terminen käsittely	4 %	6 180	4 200	368	147
Poltto	2 %	3 090	2 100	184	74
Yhteensä	100 %	154 410	105 000	9 193	3 677

Taulukko 11. Laskennassa käytetyt oletukset typen säilymisestä lietteenkäsittelyn eri vaiheissa. Arvot perustuvat Lehtoranta ym. (2022a) työssä tehtyyn massataselaskentaan (julkaisematon), jota on päivitetty kyseistä työtä varten.

Käsittelyvaihe	% talteen puhdistamolle tulevasta typpikuormituksesta
Kuormitus puhdistamolle	100 %
Lietteeseen pidättyy	33 %
Lietteen kuivauksessa lietteeseen	29 %
Kuivatun lietteen kompostoinnissa kompostiin	9 %
Kuivattuun mädätteeseen (puhdistamalla tapahtuva mädätys)	17 %
Kuivattuun mädätteeseen (keskitetty mädätys)	12 %
Mädätettyyn ja kompostoituun lietteeseen (puhdistamalla tapahtuva mädätys)	5 %
Mädätettyyn ja kompostoituun lietteeseen (keskitetty mädätys)	4 %
Varastoituun mädätteeseen (puhdistamalla tapahtuva mädätys)	15 %
Varastoituun mädätteeseen (keskitetty mädätys)	11 %
Mädätettyyn ja termisesti kuivattuun lietteeseen	3 %
Kemiallisesti käsiteltyyn lietteeseen	9 %
Poltettuun lietteeseen (tuhka)	0 %

3.8.3 Mädätys ja kaasun hyödyntäminen

Suurin osa lietteestä (76 %) käsitellään tällä hetkellä mädättämällä ja osa ohjautuu mädätyksen jälkeen muuhun jatkokäsittelyyn. Osa lietteestä mädätetään jätevedenpuhdistamojen yhteydessä toimivilla biokaasulaitoksilla ja osa lietteestä kuljetetaan keskitetyille mädättämöille, joissa käsitellään yleensä myös muita jäte- ja sivuvirtabiomassoja. Lietteen mädätyksessä osa lietteen sisältämästä orgaanisesta aineesta hajoaa anaerobisissa olosuhteissa ja vapautuu biokaasuna (sis. metaania ja hiilidioksidia). Biokaasu voidaan hyödyntää energianlähteenä esimerkiksi sähkön ja lämmön tuotantoon tai siitä voidaan tuottaa liikennepolttoainetta.

Valtakunnallisissa tilastotiedoissa jätevedenkäsittelylaitoksilla tapahtuva lietteen mädätyksen raportointi ei erottele yhdyskuntien jätevesilietteen ja teollisuusjätevesien mädätyksen tietoja. Raportoidut tiedot eivät myöskään erottele yhteiskäsittelylaitoksilla käsitellyn jätevesilietteen osuutta biokaasun tuotannosta. Tietopuutteiden vuoksi, tässä työssä käytettiin laskennallista arviota jätevesilietteen biokaasun kokonaistuotannosta, hyödyntäen Tilastokeskuksen, Syken ja Luken tekemää biokaasukyselyn yksikköaineiston tietoja biokaasun tuotantomääristä ja sen jakautumisesta (Tilastokeskus 2021a). Yksikköaineiston tiedoista johdettiin tarkempi arvio yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä toimivien biokaasulaitosten biokaasun tuotantomääristä sekä arvioitiin yhteiskäsittelylaitoksella tuotetun biokaasun osuus.

Laskennan oletusarvoihin liittyy suurta vaihtelua eikä kattavia tietoja mädätykseen päätyvän lietteen ominaisuuksista ole saatavilla. Kirjallisuudessa puhdistamolietteen metaanintuottopotentiaali vaihtelee arvioiden mukaan välillä 200–400 m³ CH₄/tonni orgaanista ainetta (Lehtomäki ym. 2007). Metaanintuottopotentiaali on ns. teoreettinen maksimituotto, josta realisoituva osuus voi vaihdella prosessin tehokkuuden mukaan. Tässä työssä metaanintuoton oletettiin olevan keskimäärin 300 m³ CH₄/tonni orgaanista ainetta (vaihteluväli 270–330 m³ CH₄/tonni orgaanista ainetta). Koska käytännössä myös lietteen laatu (sekä kuiva-ainepitoisuus että orgaanisen aineksen osuus) vaihtelee, orgaanisen aineen osuutena käytettiin 68 % (64–74 % vaihteluväli) kuiva-aineesta Järkki-hankkeen (Kinnunen ym. 2023) tekemään arvioon perustuen. Jätevesilietteen metaanintuotto laskettiin huomioiden vaihtelut sekä lietteen VS-pitoisuudessa (VS = volatile solids), että metaanintuotossa. Näin laskettuna puhdistamolietettä käsittelevien laitosten metaanintuotoksi saatiin 239 399 MWh (202 784–286 574 MWh). Laskennallinen arvio biokaasun kokonaistuotosta vastaa hyvin vuosina 2018–2020 raportoituja tuotantomääriä (Tilastokeskus 2021a) sekä muita laskennallisia arvioita biokaasun tuotannosta (mm. Kinnunen ym. 2023).

Jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä toimivien biokaasulaitosten biokaasu hyödynnetään pääasiassa sähkön ja lämmön tuotantoon. Yhteiskäsittelylaitoksilla osa tuotannosta ohjautuu myös liikennepolttoaineen tuotantoon. Koska käytettävissä olevasta aineistosta ei ollut erotettavissa yhteiskäsittelylaitoksilla jätevesilietteestä liikennepolttoaineeksi tuotetun biokaasun osuutta, arvioitiin yhteiskäsittelylaitoksien tuottamasta liikennepolttoaineesta viidesosan olevan jätevesilietteellä tuotettua. Myydyn biokaasuenergian muodostamia substituuutioita ja vältettyjä päästöjä tarkasteltiin skenaarioiden yhteydessä. Mädätysprosessi kuluttaa myös itsessään energiaa, sekä sähköä että lämpöä. Sähköä tarvitaan mm. pumppauksiin, sekoitukseen ja mädätteen kuivaukseen ja lämpöä puolestaan lietteen lämmitykseen mädätyksen vaatimaan lämpötilaan ja mahdolliseen hygienisointiin. Mädätyksen energiankulutus arvioitiin KEBIO-hankkeen (Luostarinen ym. 2023) tietoihin perustuen.

Mädätyksen yhteydessä muun muassa laitoksen rakenteista, säiliöistä sekä venttiileistä voi vuotaa biokaasua ilmakehään. Mittaustietoa puhdistamolietteen mädätyksen metaanipäästöistä on niukasti saatavilla, erityisesti pohjoismaisista olosuhteista. Päästöjen suuruus voi vaihdella huomattavasti myös operointikäytännöistä riippuen. Tässä työssä mädätyksen ja kaasun hyödyntämisen

kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vaihteluvälit arvioitiin hyödyntämällä KEBIO-hankkeesta johdettuja arvioita, joiden mukaan metaanipäästöjen määrä on 5 % laitoksen tuottamasta metaanista (vaihteluväli 3–10 %).

Mädätyksessä muodostuvaa biokaasua ei aina ole mahdollista hyödyntää energiantuotannossa ja vaihteleva osuus kaasusta joudutaan polttamaan ylijäämäpolttimessa. Tilastokeskuksen (2021c) mukaan soihdutuksen osuus jätevesilaitosten yhteydessä toimivilla laitoksilla oli 12 % ja yhteiskäsittelylaitoksilla 20 % tuotetusta biokaasusta. Soihdutuksesta aiheutuvat metaanipäästöt arvioitiin IPCC:n (2006) oletuskertoimeen (0,1 g CO₂-ekv/MJ) pohjautuen. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (CHP) sekä liikennepolttoaineeksi jalostamisessa että liikennepolttoainekäytössä biokaasusta aiheutuu myös pieniä metaanipäästöjä epätäydellisen palamisen seurauksena sekä typpioksiduulipäästöjä kaasun sisältämästä typpipitoisuudesta johtuen. Metaanipäästöt arvioitiin olevan 1,5 % (vaihteluväli 0,1–3 %) biokaasun sisältämästä metaanista ja typpioksiduulipäästöt 0,17 g N₂O/kWh (vaihteluväli 0,002–0,3 g N₂O/kWh) (Luostarinen ym. 2023).

Lietteen kuivauksessa käytetään polymeeriä tehostamaan nesteen ja kuiva-aineen erotusta. Polymerin käyttömäärät jätevesilaitosten yhteydessä olevissa mädättämöissä sisältyvät jätevesilaitosten ilmoittamiin kemikaalitietoihin (luku 3.6.4). Yhteiskäsittelylaitoksilla polymerin käyttömäärä arvioitiin Lehtoranta ym. (2022b) perustuen.

3.8.4 Kompostointi

Osa lietteestä kompostoidaan joko sellaisenaan tai mädätyksen jälkeen. Kompostoinnissa muodostuu metaani-, typpioksiduuli- sekä ammoniakkipäästöjä. Arviot päästöjen suuruuksista vaihtelevat. Päästöjen suuruuteen vaikuttavat mm. kompostoinnin olosuhteet sekä käytettävät seosaineet. Kompostoinnissa käytettävät seosaineet vaihtelevat eikä tarkkaa tilastotietoa käytetyistä seosaineista ole saatavilla. Lietettä saatetaan sekoittaa myös muuhun orgaaniseen jätteeseen, kuten kotieläinten lantaan tai elintarviketeollisuuden sivuvirtoihin. Lisäksi kompostiin voidaan sekoittaa esimerkiksi turvetta, haketta ja hiekkaa. Käyttömäärät riippuvat materiaalien saatavuudesta ja kompostin koostumuksesta. Liette kompostoidaan pääasiassa aumakompostointimenetelmällä.

Mädätyksessä tapahtuvat muutokset puhdistamolietteen ominaisuuksissa arvioitiin massataselaskentaa apuna käyttäen. Mädätyksen jälkeisiä ominaisuustietoja hyödynnettiin mädätteen kompostoinnin ja termisen kuivauksen päästöjen laskennassa. Mädättämättömälle ja mädätetylle lietteellä käytettiin samoja lähtöoletuksia päästöjen muodostumiselle, koska tarkempaa ja vertailukelpoista tietoa ei ollut saatavilla. Kompostoinnin suorat kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin IPCC:n (2006) asettamien oletuskertoimien ja niiden vaihteluvälien avulla (10 kg CH₄/t TS (vaihteluväli 0,08–20 kg CH₄/t TS) ja 0,6 kg N₂O/t TS (vaihteluväli 0,2–1,6 kg N₂O/t TS)). Käytettävien tukiaineiden määrät sekä kompostin kääntämiseen kuluva konetyö ja energiankulutus arvioitiin Mölsä (2019) perustuen. Tukiaineena oletettiin käytettävän turvetta ja sen päästökertoimenä käytettiin Lehtoranta ym. (2021a) muodostamaa kerrointa, joka huomioi myös turpeen hajoamisesta muodostuvat kasvihuonekaasupäästöt.

3.8.5 Kemiallinen käsittely (Kemicond-menetelmä)

Lietteen Kemicond-käsittelymenetelmässä liete hapotetaan käyttämällä rikkihappoa ja hapetetaan käyttämällä vetyperoksidia. Käsittelyn jälkeen liete kuivataan ja kompostoidaan. Tutkimustietoa Kemicond-menetelmästä aiheutuvista ilmapäästöistä ei ollut saatavilla, joten sen oletettiin vastaavan

kompostoinnista aiheutuvia päästöjä. Kemikaalien kulutus (vetyperoksidi ja natriumhydroksidi) huomioitiin YLVA-järjestelmään raportoitujen tietojen perusteella.

3.8.6 Terminen kuivaus

Termisessä kuivauksessa mädätettyä tai mädättämätöntä lietettä kuivataan lämmön avulla, jolloin lietteestä haihtuu vettä. Kuivauksen toteutustapoja on useita: mm. kontaktikuivain, konvektiokuivain, säteilykuivain, aurinkokuivain ja erilaiset yhdistelmäkuivaimet. Lopuksi termisesti kuivattu liete voidaan jatkokäsitellä esimerkiksi pelletöimällä tai rakeistamalla käsiteltävyyden ja varastoinnin helpottamiseksi. (Lehtoranta ym. 2021.)

Mädätteen terminen kuivaus kuluttaa sähköä ja lämpöä. Sähköä oletettiin kuluvan 0,0375 kWh/kg haihdutettavaa vettä ja lämpöä 0,8 kWh/kg haihdutettavaa vettä (VVY 2019; Huber Technology 2023). Energianlähteenä oletettiin käytettävän biokaasua, eikä näin ollen ulkoista sähköä tai lämpöä huomioitu prosessin energianlähteenä. Termisessä kuivauksessa kuluva biokaasu huomioitiin energiata- seessa (luku 5.1.8) ja substituutioissa (luku 4.5).

Kuivauksessa haihtuu typpeä, josta osa haihtuu ammoniakkinä. Termisen kuivauksen ammoniakkipäästöt ja siitä muodostuvat sekundääriset typpioksiduulipäästöt arvioitiin perustuen Horttanainen ym. (2017) julkaisuun. Ammoniakin poistoa hajupäästöjen vähentämiseksi ei huomioitu laskennassa. Metaanipäästöjä ei oletettu muodostuvan termisessä kuivauksessa (Awiszus ym. 2018), mutta sitä edeltävän mädätyksen metaanipäästöt huomioitiin (luku 3.8.2). Lopputuotteen varastoinnista ei oletettu muodostuvan enää ilmapäästöjä. Termiseen kuivaukseen liittyviä vaihteluvälejä ei tarkasteltu.

3.8.7 Poltto

Suomen ensimmäinen pelkästään lietettä syötteenä käyttävä polttolaitos sijaistaa Rovaniemellä. Prosessi perustuu erillispolttoon, jossa syötteenä voidaan käyttää sekä mekaanisesti kuivattua lietettä että mädätettyä lietettä. Prosessissa lietteen sekaan sekoitetaan hiekkaa. (Lehtoranta ym. 2021). Mädättämättömän lietteen polton inventaariotiedot (ilmapäästöt, energiankulutus, kemikaalikulutus, hiekka) arvioitiin perustuen Havukainen ym. (2022) julkaisuun. Havukainen ym. (2022) julkaisussa savukaasuista on oletettu stripattavan talteen typpeä ammoniumsulfaattina. Tällä hetkellä typpeä ei kuitenkaan oteta talteen Rovaniemen laitoksella. Tässä työssä laskentaan ei siten sisällytetty typen stripausta, savukaasujen käsittelyä eikä tuhkan loppukäyttöä sisällytetty polton puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Myöskään orgaanisen aineen menetyksiä ja sen vaikutusta polton aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin ei tässä työssä tarkastelu (luku 2). Polttoon liittyviä vaihteluvälejä ei myöskään huomioitu tietopuutteiden takia.

3.8.8 Lietteiden varastointi

Lietettä voidaan varastoida ennen sen käsittelyä sekä käsittelyn jälkeen. Tässä työssä huomioitiin ainoastaan varastointi käsittelyn jälkeen laskennan yksinkertaistamiseksi. Tiedossa ei ollut, kuinka suuri osa puhdistamolietteestä varastoidaan ennen mitään käsittelyä ja kuinka kauan. Lisäksi varastoinnin päästöjen arviointi on haasteellista vaihtelevien olosuhteiden vuoksi. Käytännössä varastoinnissa muodostuvat metaanipäästöt ovat riippuvaisia useista seikoista, kuten varastoinnin kestosta ja olosuhteista sekä varastoitavan jakeen laadusta. Joissain tapauksissa varastoinnissa muodostuvia kaasuja voidaan

kerätä talteen, mikäli varastointi tapahtuu suljetussa tilassa. Näiden tekijöiden vaikutuksia ei ollut mahdollista tässä työssä arvioida.

Laskennassa oletettiin, että kompostoitavasta mädätteestä, kemiallisesti käsitellystä, termisesti kuivatusta tai poltetusta lietteestä eli tuhkasta ei muodostu varastoinnin aikana enää metaanipäästöjä. Näiden käsittelyjen kohdalla oletettiin, että prosessoinnissa muodostuvat metaanipäästöt sisältävät myös varastoinnin päästöt. Metaanipäästöjä oletettiin muodostuvan varastoitavasta mädätetystä lietteestä. Päästöjen suuruus mädätysprosessin jälkeen kytkeytyy mädätysprosessin viipymäaikaan ja päästöjen vaikutus voi olla merkittävä biokaasutuotannon elinkaareissa (Luostarinen ym. 2023). Tässä työssä mädätteen varastoinnin päästö arvioitiin huomioiden lietteen metaanintuottopotentialiaali ja tuotettu biokaasu. Näiden erotuksesta muodostuvasta jäännöspotentialista oletettiin haihtuvan metaanina varastossa 10 % (vaihteluväli 5–15 %) KEBIO-hankkeessa tehtyihin arvioihin perustuen (Luostarinen ym. 2023).

Varastoinnin aikana lietteen sisältämästä typestä osa muodostaa typpioksiduulipäästöjä. Typpioksiduulipäästöjen arvioinnissa hyödynnettiin IPCC (2006) päästökertoimia kuivalannalle, sillä puhdistamolietteelle vastaavia kertoimia ei ollut saatavilla. Sen mukaan 0,005 % varastoitavan kuivalannan (tässä tapauksessa puhdistamolietteen) typestä haihtuu typpioksiduulipäästöinä. Varastoinnin ammoniakkipäästöistä ja niistä sekundäärisesti muodostuvia epäsuoria typpioksiduulipäästöjä ei huomioitu laskennassa. Varastointiin liittyviä vaihteluvälejä ei tarkasteltu typpioksiduulille.

3.8.9 Lietteen hyödyntäminen

Lietteen hyödyntämisessä huomioitiin lietteen levityksessä muodostuvat typpioksiduulipäästöt. Typpioksiduulipäästöt laskettiin hyödynnettäväksi päätyvän puhdistamolietteen kokonaistypestä IPCC:n (2006) laskentaohjeen mukaisesti. Sen mukaan 1 % levitetystä kokonaistypestä haihtuu typpioksiduulina. Lietteen hyödyntämiseen liittyviä vaihteluvälejä ei tarkasteltu.

3.8.10 Lietteen kuljetukset

Lietettä kuljetetaan keskitettyihin käsittelylaitoksiin. Koottua tietoa lietteen kuljetusmatkoista ei ollut työtä tehdessä saatavilla, joten kuljetusten osuudet ja etäisyydet arvioitiin taulukon 12 mukaisesti. Kompostointiin ja kemialliseen käsittelyyn liittyvät lietteen kuljetusmatkat on arvioitu muita pienemmäksi koska ne oletettiin tapahtuvan lähellä laitosta. Vaihteluväleinä käytettiin minimi- ja maksimiarvoja.

Taulukko 12. Arvioidut lietteen kuljetusmatkat sekä kuljetettava osuus lietteestä

Lietteenkäsittelymenetelmä	Kuljetettava osuus lietteestä	Etäisyys (km)	minimi (km)	maksimi (km)
Kompostointi	70 %	100	20	200
Mädätys	50 %	150	30	300
Mädätys ja kompostointi	50 %	150	30	300
Kemiallinen käsittely ja kompostointi	100 %	50	20	80
Mädätys ja terminen kuivaus	50 %	150	30	300
Poltto	50 %	150	30	300

3.9 Verkostojen saneeraus ja uudisrakentaminen

3.9.1 Aineisto, päästökertoimet ja laskennan rajaus

Vesihuoltoverkostojen uudisrakentamisen ja saneerausten elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen kannalta olennaista on huomioida kuinka pitkä käyttöikä rakenteille ja niiden eri osille arvioidaan. Infrarakentamisessa käyttöikä voi vaihdella huomattavasti ja sisältää myös elinkaaren aikana erilaisia ylläpito- tai huoltotoimia. Tässä työssä tavoitteena oli tarkastella vesihuollon vuosittaisia elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä. Verkostojen infrarakentamista tapahtuu käytännössä vuosittain. Tässä työssä tarkasteltiin infrarakentamisen päästöjä ensisijaisesti elinkaarinäkökulmasta ilman käyttöiän huomioimista. Lisäksi tarkasteltiin päästöjä huomioiden arvio käyttöiästä (50 vuotta).

Vesihuoltoverkostojen uudisrakentamisen ja saneerausten laskennassa käytettiin pohjana ”Vesihuollon verkostosaneerausten hiilijalanjäljen pienentäminen”-diplomityön (Haapakoski 2022) laskentatapaa ja tuloksia, soveltaen niitä tämän laskelman tarpeisiin. Laskentaan sisällytettiin, Haapakosken (2022) työn mukaisesti, putkien, kaivojen ja venttiilien lisäksi tarvittavat maamassat, materiaalien ja massojen kuljetukset, konetyön osuus, henkilöstön työmatkat, työmaan aikana odottavan liikenteen päästöt sekä käytettävien polttoaineiden valmistus. Putkien asennus- ja siten myös kaivantosyvyydessä on todellisuudessa paljonkin vaihtelua. Tässä laskelmassa oletussyvyytenä käytettiin Haapakosken (2022) työssä käytettyjä kaivantosyvyyksiä. Lopputäytössä ja jakavassa kerroksessa oletettiin käytettävän kierrätettyjä maamassoja. Kaivannolle ei laskettu mukaan tuentaa. Uudisrakentamis- ja saneerausmenetelmistä tarkasteltiin Haapakosken (2022) työn mukaisesti aukikaivuuta, sekä sujutusta (sis. sukka- ja pitkäsujutuksen). Työn ulkopuolelle rajattiin muut kaivamattomat saneeraus- ja uudisrakennustekniikat.

Laskennan ulkopuolelle infran osalta rajattiin vesitornit, jätevedenpumppaamot ja paineenkorotus-asetat. Lisäksi rajattiin ulkopuolelle verkoston huoltotoimenpiteet, käytöstä poistettavan verkoston hävittäminen sekä maankäytön muutoksen vaikutukset.

Haapakosken (2022) työssä esimerkkikokoiset vesijohto- ja jätevesiviemärit rakennetaan yhtäaikaista samaan kaivantoon. Tässä laskelmassa vesijohdon ja viemäriin osuudet kaivantoihin liittyvistä päästöistä on kuitenkin huomioitu toisistaan erillään: Kun putket oletettiin saneerattavan yhtäaikaista aukikaivumenetelmällä, vesijohdon tarvittava kaivantotilavuus ja täyttömassojen määrä laskettiin putken koon mukaan, kuten vesijohto saneerattaisiin jätevesiviemäristä erillään. Loppu Haapakosken (2022) työssä käytetystä kaivannon ja massojen kokonaistilavuudesta oletettiin kuuluvan jätevesiviemäriin. Mikäli putket oletettiin saneerattavan toisistaan erillään, oletettiin jätevesiviemäriin sen erillään tarvitsema kaivantotilavuus. Sujuttamalla tehdyissä saneerauksissa kaivannon massat jyvitetään vesijohdolle ja viemäriin puoliksi. Sekä aukikaivuulla että sujuttamalla tehdyissä töissä henkilöstön työmatkojen ja odottavan liikenteen aiheuttama päästö jaettiin vesijohdolle ja viemäriin puoliksi.

Työssä käytetyt päästökertoimet päivitettiin infrarakentamisen päästötietokannasta (CO2data 2023) kerätyillä arvoilla, niiltä osin kuin kertoimia oli saatavilla. Vastaavasti kaivu- ja asennustyön vaatimat konetyötunnit päivitettiin IHKU-järjestelmän (Infrahankkeiden kustannuslaskentajärjestelmä ja -palveluallianssi) työsaavutusten perusteella. Verkostojen saneerauksen ja uudisrakentamisen lähtöaineiston ollessa puutteellinen tarkasteltujen materiaalien ja putkikokojen osalta, tarkasteltiin kokonaisuudelle päästöjen vaihteluväliä yksinkertaistettusti siten, että päästöjen oletettiin olevan joko 20 % pienemmät tai suuremmat.

3.9.2 Saneeraus- ja uudisrakennusmäärät

Vuonna 2014 vesijohtoverkoston kokonaispituus Suomessa oli 113 711 kilometriä ja jätevesiviemäri-verkoston kokonaispituus oli 59 845 kilometriä (Lapinlampi 2021). VVY (Kuulas ym. 2020) arvioi Veeti-järjestelmän ja vesihuoltolaitosten tunnuslukujärjestelmä Venlan tietojen perusteella, että vuosien 2016–2018 vastaavat luvut olisivat 111 887 ja 52 639 km. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin käytetty Lapinlammen (2021) lukuja, sillä ne arvioitiin kattavimmiksi siitä huolimatta, että arvio perustuu vuoden 2014 tietoihin. Sekä vesijohto- että viemäriverkostojen kokonaispituus on kasvanut tasaisesti vuosina 1970–2014 (Lapinlampi 2021). Vesijohtoverkostojen pituuksiin on laskettu laitoksen koko verkoston pituus raakavesijohdosta tonttivesijohtoon saakka, jolloin mukana on myös tunnelit ja siirtolinjat sekä yhdysvesijohdot. Viemäreiden osalta myös siirtoviemärit on laskettu mukaan. Laskennassa tunnelien saneerausta ja uudisrakentamista ei huomioitu erikseen.

Työssä käytettiin Veeti-järjestelmän tietojen pohjalta arvioituja verkostojen saneerausmääriä. Vuonna 2020 saneerattujen vesijohtoverkostojen kokonaispituudeksi arvioitiin 580 km (0,51 %) ja jätevesiviemäreiden 256,44 km (0,43 %). Arviot vastaavat melko hyvin VVY:n (Rontu 2018) arviota, jonka mukaan vesijohtoja saneerattiin vuonna 2017 0,54 % ja vuonna 2018 0,42 %. Vastaavat luvut jätevesiviemäreille olivat 0,62 % ja 0,42 %. Saneerausmenetelmien jakaumana käytettiin VVY:n (Kuulas ym. 2020) julkaisussa esitettyjä tietoja (taulukko 13).

Taulukko 13. Käytettyjen saneerausmenetelmien jakautuminen (Kuulas ym. 2020)

	Sujutus	Aukikaivuu	Yhden putken kaivanto	Kahden putken kaivanto	Kolmen putken kaivanto
Vesijohto	40 %	60 %	20 %	30 %	10 %
Viemäri	60 %	40 %	-	30 %	10 %

Vesijohto- ja viemäriverkostojen uudisrakentamistarpeita on kartoitettu VVY:n (Kuulas ym. 2020) julkaisussa. Koko maan vesijohtoverkostonpituuden ennustettiin kasvavan noin 5 300 kilometriä vuosina 2020–2040. Arvion mukaan kasvunopeus laskee noin viidennekseen, verrattuna vuosina 2000–2020 toteutuneeseen uudisrakentamiseen. Viemäriverkostonpituuden ennustettiin kasvavan noin 5 500 km vuosina 2020–2040, mikä on noin puolet vuosina 2000–2020 toteutuneesta verkostonpituuden kasvusta. Työssä käytettiin edellä mainittuihin tietoihin perustuen seuraavia arvoja:

- vesijohtoverkoston uudisrakentaminen: $5\,300/20 = 265$ km/v
- viemäriverkoston uudisrakentaminen: $5\,512/20 = 275,6$ km/v.

3.9.3 Putkimateriaalit ja putkien kokojakauma

Haapakosken (2022) työssä verkostojen saneeraus on laskettu kahdelle esimerkille, joista pienemmässä käytetyt putkikoot ovat 160 mm (vesijohto) ja 400 mm (viemäri) ja suuremmassa 400 (vesijohto) ja 1 000 mm (viemäri). Tässä laskelmassa muiden putkikokojen tapauksessa aiheutuva päästö on arvioitu lineaarisesti esimerkkikokojen päästön suhteessa. Uudisrakentamisen ja saneerauksen päästöt oletettiin samaksi.

Arvio saneerauksissa ja uudisrakentamisessa käytetyistä putkimateriaaleista ja putkikoista tehtiin kuudelta vesihuoltolaitokselta saatujen tietojen perustella (Tampereen Vesi, Kouvolan Vesi, Kymen Vesi, Joensuun Vesi, Lempäälän Vesi, HSY). Vesijohtoverkoston saneerauksessa käytettävät materiaalit olivat aineiston mukaan 73 % muovia, 19 % valurautaa ja 3 % terästä. Uudisrakentamisessa käytetyt

putkimateriaalit olivat 63 % muovina, 36 % valurautaa ja 1 % terästä. Viemäriverkoston saneerauksessa käytettävät materiaalit olivat aineiston mukaan 76 % muovina ja 24 % betonia. Uudisrakentamisessa käytetyt putkimateriaalit olivat 87 % muovina ja 13 % betonia. Vesijohtoverkoston osalta koottu aineisto kattoi uudisrakentamisesta 23 % ja saneerauksista 5 %. Viemäriverkoston osalta koottu aineisto kattoi uudisrakentamisesta 16 % ja saneerauksista 6 %. Putkien kokojakauma materiaaleittain on esitetty taulukoissa 14 ja 15.

Taulukko 14. Putkimateriaalien kokojakauma vesijohtoverkoston saneerauksessa ja uudisrakentamisessa

Uudisrakentaminen				Saneeraus			
Putkikoko	Muovi	Valurauta	Teräs	Muovi	Valurauta	Teräs	Sujutus (muovi)
63	12 %	9 %	1 %	20 %	14 %	-	18 %
90	9 %	9 %	1 %	9 %	14 %	-	24 %
110	48 %	10 %	1 %	37 %	14 %	-	37 %
160	9 %	17 %	1 %	14 %	14 %	-	11 %
225	5 %	15 %	0 %	7 %	8 %	-	0 %
250	4 %	6 %	0 %	4 %	8 %	-	10 %
315	3 %	8 %	0 %	2 %	8 %	-	-
355	8 %	4 %	0 %	3 %	8 %	-	-
400	2 %	18 %	0 %	4 %	8 %	-	-
500	-	1 %	39 %	-	3 %	-	-
600	-	1 %	39 %	-	3 %	-	-
800	-	3 %	9 %	-	-	33 %	-
900	-	-	4 %	-	-	33 %	-
1000	-	-	4 %	-	-	33 %	-

Taulukko 15. Putkimateriaalien kokojakauma viemäriverkoston saneerauksessa ja uudisrakentamisessa

Uudisrakentaminen			Saneeraus		
	Muovi	Betoni	Muovi	Betoni	Sujutus (muovi)
150	20 %		24 %	0 %	-
200	16 %	15 %	21 %	6 %	-
250	14 %	18 %	18 %	6 %	-
300	14 %	29 %	9 %	13 %	46 %
400	11 %	22 %	16 %	12 %	28 %
500	13 %	6 %	0 %	16 %	-
600	11 %	6 %	7 %	14 %	-
800	2 %	4 %	4 %	25 %	-
1400	-	-	-	9 %	6 %
1600	-	-	-	-	20 %

4 Päästövähennysskenaariot ja niissä käytetyt laskentaoletukset ja rajaukset

Tutkimuksessa muodostettiin kolme skenaariota Suomen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi: 1. Nykytilan optimointi, 2. Ravinteet talteen sekä 3. kahden ensimmäisen yhteisvaikutusta tarkasteleva skenaario. Tarkastelu tehtiin valtakunnallisella tasolla ja mukaan valittiin sellaisia päästövähennystoimia, jotka voisivat olla realistisia toteuttaa laajassa mittakaavassa.

4.1 Skenaarioiden muodostaminen

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu sellaisia päästövähennystoimia, joilla voitaisiin vaikuttaa vesihuollon kasvihuonekaasupäästöihin valtakunnallisella tasolla ja jotka voisivat olla realistisia laajassa mittakaavassa toteutettaviksi vuoteen 2030 mennessä. Päästövähennystoimien vaikuttavuus kuitenkin vaihtelee laitoskohtaisesti, eivätkä kaikki toimet sovellu kaikille laitoksille. Laskennan oletuksia ei tule näin ollen soveltaa laitoskohtaisesti, vaan laitostasolla toimia on tarkasteltava aina tapauskohtaisesti. Päästövähennystoimenpiteet eivät saa aiheuttaa haittaa vesihuoltopalveluiden laadukkaalle toteuttamiselle ja niiden tulee olla pitkällä aikavälillä kestäviä eri näkökulmat huomioiden. Skenaarioiden muodostamisessa tehtiin yhteistyötä AFRYn VVY:lle toteuttaman Vesihuoltolaitoksen ilmastotyökalut -hankkeen kanssa sekä hyödynnettiin asiantuntijoiden arvioita. Vesihuoltolaitoksen ilmastotyökalut -hankkeen julkaisussa on kartoitettu kattavasti erilaisia päästövähennystoimia ja tehty suuntaa antava arvio niiden toteutettavuudesta sekä vaikuttavuudesta kolmiportaisella asteikolla (Nissinen ym. 2023).

Tässä työssä muodostettiin kolme skenaariota Suomen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi, joiden päästövähennystoimet ja laskentaoletukset ovat kuvattu luvuissa 4.2–4.4. Skenaarioissa on huomioitu vain toimien suorat seurausvaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin, eikä epävarmuusvälejä sisällytetty analyysiin. Tarkastelussa ei huomioitu toimenpiteiden vaatimia inframuutoksia tai prosessimuutoksien vaatimia laitteiden ja osien valmistusta ja vanhojen hävittämistä. Ensimmäisessä skenaariossa (Nykytilan optimointi) potentiaalisia päästövähennystoimia tarkasteltiin koko vesihuoltoketjun osalta ja tavoitteena oli muodostaa mahdollisimman realistinen skenaario. Laskentaoletuksien muodostamiseksi haastateltiin yhteensä 16 asiantuntijaa. Toisessa skenaariossa (Ravinteet talteen) tarkasteltiin isomman mittakaavan muutosta, jossa suurimmilla puhdistamoilla olisi käytössä ravinteiden talteenottomenetelmät: RAVITATM-prosessi (myöhemmin tekstissä RAVITA-prosessi) ja typen strippaus. Kolmannessa skenaariossa tarkastellaan kahden ensimmäisen yhteisvaikutusta.

Skenaarioihin ei sisällytetty erikseen jätevedenpuhdistamon typpioksiduulipäästöjen hallintaa, vaikka typpioksiduulipäästöt muodostavat selkeästi suurimman yksittäisen päästölähteen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöistä (luku 5.1.1). Typpioksiduulipäästöjen muodostumista ja niiden vähentämisestä on tutkittu paljon (ks. luku 3.6.2), mutta monimutkaiset muodostumismekanismit sekä päästöjen mittaamiseen liittyvät epävarmuudet eivät tarjonneet riittävää pohjaa päästövähennysskenaarioiden muodostamiselle. Skenaariossa 2 kuitenkin oletettiin typen talteenoton rejektivedestä vähentävän typpioksiduulipäästöjä sekä jätevedenkäsittelyn että jäteveden purun yhteydessä.

Skenaariotarkasteluihin ei myöskään sisällytetty verkostoinfran saneerauksen ja uudisrakentamisen tarkastelua, koska epävarmuudet arvioitiin suuriksi puutteellisten lähtötietojen vuoksi (erityisesti putkimateriaalit ja -koot). Verkostoinfran saneerauksen lisäämisellä voidaan myös vaikuttaa vuotovesien määrään. Toimet vuotovesien kuormituksen vähentämiseksi vaikuttavat talousveden tuotannon ja jätevedenkäsittelyn energiataseeseen, kemikaalinkulutukseen sekä aktiivilieteprosessin toimivuuden kautta myös prosessipäästöihin. Verkostoinfran elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä on syytä tarkentaa tulevaisuudessa sekä arvioida myös vuotovesien vähenemisen vaikutuksia. Infran päästöjen tarkentaminen edellyttää kattavampaa aineistoa käytetyistä materiaaleista ja saneerattavien putkien koirakaudista sekä maankäytön päästöjen arvioimista. Erilaisilla putkimateriaaleilla ja putkien koolla on huomattava vaikutus saneerauksen ja uudisrakentamisen päästöihin viemäri- ja talousvesiverkostoissa.

Skenaarioissa huomioitiin kansallinen arvio sähkön ja kaukolämmön päästökertoimien kehityksestä nykyisten politiikkatoimien perusskenaarion (WEM-skenaarion) mukaisesti (Soimakallio 2020; TEM 2022). Nykytilanteessa sähkön elinkaarisena päästökertoimena käytettiin 0,153 kg CO₂-ekv/kWh ja kaukolämmön elinkaarisena päästökertoimena 0,147 kg CO₂-ekv/kWh. Skenaarioille käytettiin vuodelle 2030 ennustettuja päästökertoimia, jotka olivat sähkölle 0,089 kg CO₂-ekv/kWh ja kaukolämmölle 0,114 kg CO₂-ekv/kWh. Lisäksi käytettyjen kemikaalien päästökertoimien oletettiin pienevän 10 %. Tulosten tulkinnan selkeyttämiseksi skenaarioiden yhteydessä ei tarkasteltu vaihteluvälejä.

Päästövähennysskenaarioiden yhteydessä tarkasteltiin miten eri skenaariot vaikuttavat substituutioihin ja niiden kautta muodostuviin vältettyihin päästöihin. Substituutio tarkoittaa tuotteen tai palvelun korvaamista toisella tuotteella tai palvelulla. Vältettyjä päästöjä ei voida mitata tai todentaa, vaan niiden laskenta perustuu oletuksilla mallintamiseen. Tässä työssä substituutioiden ja niiden kautta muodostuvien vältettyjen päästöjen oletettiin realisoituvan täysimääräisenä. Päästövähennysskenaarioiden yhteydessä tarkasteltiin sekä nykytilan että skenaarioiden substituutioita ja niiden kautta muodostuvia laskennallisia vältettyjä päästöjä sekä erityisesti sitä, miten erilaiset skenaariot vältettyihin päästöihin vaikuttavat. Substituutio-oletukset on esitetty kootusti luvussa 4.5.

Tässä luvussa on lopuksi tarkasteltu kahta mahdollista lisäskenaariota, joita ei ole sisällytetty skenaariolaskentaan. Ensimmäinen liittyy lainsäädännön muuttumisen myötä tiukentuviin käsittelyvaatimuksiin ja ei näin ollen ole päästövähennysskenaario, vaan vaikuttaa päästöjä lisäävästi. Toinen lisäskenaario liittyy vuotovesien hallinnan problematiikkaan, jota tutkittiin erityisesti Vesihuki-hankkeen Joensuun pilottitarkastelussa. Pilottitarkastelussa tehdyn työn pohjalta todettiin, että vuotovesien tarkastelu koko Suomea koskevassa skenaariossa edellyttäisi lisää tutkimustietoa, sillä tulokset ja käytetty aineisto eivät olleet luotettavasti skaalattavissa koko maan mittakaavaan.

4.2 Skenaario 1: Nykytilan optimointi

4.2.1 Talousveden tuotanto

4.2.1.1 Aktiivihillen ja antrasiitin käytön optimointi

Aktiivihillen tarkoitus on poistaa ensisijaisesti liukoissa muodossa olevia orgaanisia yhdisteitä. Lisäksi aktiivihiltä käytetään haitallisten kemiallisten yhdisteiden poistamiseen vedestä. Käyttömäärä vaihtelee eri laitoksilla ja siihen vaikuttavat mm:

- käsiteltävän raakaveden ominaisuudet: orgaanisen aineen koostumus ja pitoisuudet (orgaaninen kokonaishiili, TOC), mahdolliset haitta-aineet kuten liuottimet pohjavesissä
- aktiivihilisuodatusta edeltävien käsittelyvaiheiden orgaanisen aineen ja kiintoaineen poistoteho sekä käytettävät saostuskemikaalit
- aktiivihiihen käyttötarkoitus, esim. käytetäänkö haitta-aineiden adsorptioon, toimiiko biologisena suodattimena
- tavoiteltu talousveden laatu aktiivihilisuodatuksen jälkeen
- käytettävä aktiivihiihtyyppi ja sen ominaisuudet, esim. raaka-aine, raekoko, ominaispinta-ala, jodiluku ja kovuus, kuinka monta kertaa hiili kestää reaktiivoinnin
- laitoksen koko: pienillä laitoksilla käyttömäärät voivat olla niin pieniä, ettei ole järkevää lähettää aktiivihiihtä reaktivoitavaksi, jolloin kaikki käytetty aktiivihiihi on uutta (Härkki 2023; Kettunen 2023).

Aktiivihilisuodatuksen teho heikkenee orgaanisen aineen kertyessä suodattimeen, jolloin aktiivihiihen käyttömäärää voidaan vähentää optimoimalla alkupään prosessia niin, että orgaanista ainesta ja kiintoainetta pääsee mahdollisimman vähän suodattimille. Esimerkiksi Oulun Hintan ja Kurkelanrannan pintavesilaitoksilla uutta aktiivihiihtä lisätään suodattimiin noin $1,98 \text{ g/m}^3$ ja reaktivoidaan $3,70 \text{ g/m}^3$. Aktiivihiihet pidetään toimintakykyisinä huolehtimalla alkupään prosessin tehokkaasta toiminnasta, eli hämmennys, flotaatio ja hiekkasuodatus. (Lahtinen 2022.) Myös saostuskemikaalin annostelu kannattaa optimoida niin, että rautaa tai alumiinia pääsee mahdollisimman vähän aktiivihilisuodatukseen (Kettunen 2023).

Toinen keino on tutkia, mikä aktiivihiihilaatu sopii parhaiten juuri oman laitoksen raakaveden käsitteilyyn. Toisin sanoen, mikä hiililaatu sitoo itseensä eniten TOC:tä ja haitta-aineita käsiteltyä vesikuutiota kohden. Tampereen Ruskon pintavesilaitoksella tehtyjen kokeiden perusteella parempi aktiivihiihi poisti 256 vuorokauden aikana noin 38 % enemmän TOC:tä verrokkiin nähden. Parempaa aktiivihiihtä sisältävässä suodattimessa TOC-poistotehokkuus oli kokeen jälkeen enää 15 % ja verrokissa 7 %, kun se kahden ensimmäisen viikon aikana oli yli 50 %. (Koppanen 2018.)

Kolmantena keinona on reaktiivointikertojen lisääminen. Reaktivoidun kivihiiliperäisen aktiivihiihen ilmastovaikutus on merkittävästi pienempi kuin neitseellisen aktiivihiihen (Vilén 2021). Esimerkiksi Tampereen Ruskossa käytössä olevaa kivihiilipohjaista, pulveroitua ja agglomeroitua aktiivihiihtä on reaktivoitu kerran vuodessa ja uusittu 4–5 vuoden välein. Tulevaisuudessa on tarkoitus lisätä aktiivihiihen reaktiivointikertoja, jolloin uuden hiilen tarve vähenee. On kuitenkin huomioitava, että reaktiivoinnissa osa hiilestä hajoaa, jolloin uutta korvaushiiltä tarvitaan 10–20 % reaktivoitavan hiilen määrästä. Kaikki hiililaadut eivät kestä yhtä hyvin reaktiivointia ja suodatinten vesihuuhtelua vaan murenevät ajan myötä. Eli hiililaadun valinnalla on tässäkin suhteessa merkitystä. (Kettunen 2023)

Neljäntenä keinona on reaktiivointivälin pidentäminen biologista toimintaa lisäämällä. Tämä on mahdollista laitoksilla, joissa orgaanista ainesta pilkotaan hapettamalla sitä mikrobeille käyttökelpoiseen muotoon ennen aktiivihilisuodatusta. Tyypillisesti hapettamiseen käytetään otsonia. (Härkki 2023)

Aktiivihiihen käytölle korvaavia menetelmiä ovat esimerkiksi nanosuodatus ja käänteisosmoosi. Myös näillä menetelmillä on omat ilmastovaikutuksensa sillä ne kuluttavat paljon energiaa ja polymeereistä valmistetut suodatinkalvot täytyy yleensä vaihtaa 5–10 vuoden välein. Lisäksi TOC ja veden muut epäpuhtaudet kuten rauta tukkivat kalvot aikaa myöten, jolloin kalvoja joudutaan puhdistamaan kemikaalien avulla. (Kettunen 2023.) Aktiivihiihen käytön korvaavia menetelmiä ei sisällytetty tähän skenaariotarkasteluun.

Antrasiittia käytetään lähinnä pohjavesilaitoksilla suodatukseseen. Sen käytöstä ei löytynyt Lahti ym. (2011) tarkempia tietoja, mutta tässä tutkimuksessa tehtiin oletus, että sen käyttöä on mahdollista vähentää 15 %.

Laskentaoletukset

- Nykytila
 - aktiivihiiltä käytetään pintavesilaitoksilla (88 % käsitellystä pintavedestä) sekä pohjavesilaitoksilla (4 % käsitellystä pohjavedestä) (Lahti ym. 2011)
 - 73 % käytetystä aktiivihiilestä on reaktivoitua
 - antrasiittia käytetään pohjavesilaitoksilla (14 % käsitellystä pohjavedestä) (Lahti ym. 2021).
- Nykytilan optimointi -skenaario
 - aktiivihiilen käyttö määrä vähenee absoluuttisesti (sekä uusi että reaktivoitu) 15 %
 - reaktivointi lisääntyy 85 %:iin ja uuden käyttö vähenee
 - antrasiitin käytön vähentäminen 15 %.

4.2.1.2 Kalkin korvaaminen kalkkikivialkaloinnilla

Sammutetun tai poltetun kalkin käytön voi talousveden käsittelyssä korvata kalkkikivialkaloinnilla, jolloin vesi suodatetaan kalkkikivirouhekerroksen läpi puhdistusprosessin lopussa. Aikaisemmin (Lahti ym. 2011) pintavesilaitoksilla ei käytetty lainkaan kalkkikivialkalointia, vaan alkalointi ja pH:n säätö toteutettiin sammutetulla tai poltetulla kalkilla. Sen sijaan noin 43 %:iin pohjavesilaitoksilla tuotetusta talousvedestä käytettiin kalkkikivialkalointia. Kalkkikivialkalointi yleistyy pohjavesilaitoksilla ja myös isoista pintavesilaitoksista ainakin Tampereen, HSY:n ja Oulun laitokset ovat korvanneet osan sammutetusta kalkista kalkkikivirouheella (Härkki 2023). Pintavesilaitoksilla sammutettua kalkkia ei voi korvata kokonaan, koska sitä käytetään prosessin alussa saostuksen alkaliteetin säätöön, mutta saostuksen ja flotaation jälkeinen alkalointi voidaan tehdä kalkkikivirouheella, jota on suodatusaltaissa (Kettunen 2023). Koska isoimmilla pintavesilaitoksilla on jo kalkkikivirouhe käytössä, eikä sammutettua kalkkia voi korvata kokonaan, jätettiin pintavesilaitokset pois skenaariotarkastelusta.

Sammutetun kalkin päästökerroin on noin kolminkertainen kalkkikivirouheeseen verrattuna (ecoinvent 2021), mutta toisaalta kalkkirouhetta annostellaan keskimäärin 1,35 kertaa niin paljon kuin sammutettua kalkkia (Weppling 2015).

Laskentaoletukset

- Nykytila (Lahti ym. 2011)
 - Pohjavedet: kalkkikivialkalointi 43 %, kalkki 26 % käsitellystä pohjavedestä.
- Nykytilan optimointi -skenaario
 - Pohjavesilaitoksilla 65 % käytetystä kalkista korvataan kalkkirouheella.
 - Sammutetun kalkin käyttö määrä on 30,3 g/m³ (Lahti ym. 2011). Kalkkikiveä annostellaan 1,35 kertaa niin paljon kuin sammutettua kalkkia (Weppling 2015), jolloin sen kulutus on 40,9 g/m³.

4.2.1.3 Pintaveden korvaaminen tekopohjavedellä

Talousveden käsittelyssä saostuskemikaalien käytön vähentäminen pitkällä tähtäimellä on haastavaa, sillä veden laadusta ei voida tinkiä ja saostuskemikaalien ominaiskulutus tulee todennäköisesti vain kasvamaan tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen ja raakaveden orgaanisen aineen pitoisuuksien kasvun myötä. Lisäksi kokonaisvedenkulutus tulee kasvamaan kaupunkiseuduilla, joissa talousvedentuotannosta vastaavat pääasiassa pintavesilaitokset. Tekopohjavesiprosessilla saadaan tehokkaasti poistettua orgaanista ainesta ilman saostuskemikaaleja tai huomattavasti vähäisemmällä kemikaalinkulutuksella (ks. luku 3.3.3). (Huoltovarmuusorganisaatio 2020.) Skenaariossa tarkasteltiin siten tilannetta, jossa osa pintavedentuotannosta korvataan tekopohjavedentuotannolla.

Tekopohjavesi kattaa noin 16 % Suomen talousveden tuotannosta ja pintavesi noin 35 % (Lapinlampi 2021). Tekopohjaveden tuotantoon on panostettu erityisesti alueilla, joilla pohjavesivarat eivät riitä ja pintavesien laatu ei ole riittävän hyvä. Imeytysolosuhteet kuitenkin vaihtelevat ja tekopohjavesilaitoksen perustaminen vaatii perusteellisia hydrogeologisia tutkimuksia paikallisten olojen kartoittamiseksi. Pienessä mittakaavassa pohjavedentuotantoa voisi paikoin lisätä hallitulla rantaimeytyksellä, jota tapahtuu monilla vesistöjen varsilla olevilla pohjavedenottoamoilla joko tahattomasti tai suunnitellusti. Rantaimeytymisen lisääminen on varteenotettava vaihtoehto, jos imeytyvä pintavesi on hyvälaatuista ja sisältää vähän humusta. (Rintala & Britschgi 2023)

Isomman mittakaavan hankkeita on tällä hetkellä vireillä vain Tampereen seudulla (Tavase), mutta hankkeen lupaprosessi on vielä kesken. Skenaariolaskennassa huomioitiin Tavasen mahdollinen toteutuminen sekä pienempien laitosten perustaminen ja rantaimeytyksen lisääminen. Lisäksi oletettiin, että Helsingin seudulla talousvesi tuotetaan jatkossakin Päijänteen raakavedestä, eikä tekopohjaveden tuotanto ole siellä todennäköistä.

Laskentaoletukset

- Nykytila (Lapinlampi 2021)
 - tekopohjavesi 66,7 Mm³/v
 - pintavesi 142,8 Mm³/v.
- Nykytilan optimointi -skenaario (tekopohjaveden tuotanto lisääntyy 25 Mm³/v)
 - tekopohjavesi 91,7 Mm³/v
 - pintavesi 117,8 Mm³/v.

4.2.1.4 Energiatehokkuus ja optimointi

Talousveden tuotannossa energiaa kuluu veden pumppaukseen, prosessilaitteiden käyttöön sekä rakennusten lämmittämiseen. Energiatehokkuuden parantamiseen ja energiankäytön optimointiin liittyviä näkökohtia on avattu tarkemmin jätevedenkäsittelyyn liittyvässä luvussa 4.2.3.3.

Laskentaoletukset

- Nykytila: talousveden tuotantoon kuluu sähköä 269 163 MWh/v ja lämpöä 4 739 MWh/v.
- Nykytilan optimointi -skenaario: sähkön- ja lämmönkulutus vähenee 10 %.

4.2.2 Vedenjakelun ja jäteveden siirron energiatehokkuus ja optimointi

Pumppauksen energiatehokkuutta on tutkittu talousveden johtamisen osalta mm. Kurosen (2014) diplomityössä sekä jäteveden pumppauksen osalta mm. Jortikan (2016) ja Niemeläisen (2021) opinnäytöissä. Arviot pumppauksen energiatehokkuuden kehittämisestä ja sen vaikutuksista vaihtelevat. Esimerkiksi Motiva (2011) arvioi, että pumppauksen energiankulutuksessa voitaisiin saavuttaa noin 4 %:n säästöt. Pumppujen energiatehokkuuden sijaan suurempi energiansäästöpotentiaali muodostuu mitoituksista ja optimoinnista. Tarkentamalla pumppujen ja moottoreiden mitoitusta, lisäämällä taajuusmuuttajat suoraikäyttöisiin moottoreihin, optimoimalla pumppausta automaation avulla sekä suorittamalla säännölliset huolto- ja kunnossapitotyöt voitaisiin pumppauksen energiankulutusta vähentää jopa kymmeniä prosentteja (Kuronen 2014; Paukkunen 2023; Särkiniemi 2023).

Maankäytön suunnittelulla voidaan myös vaikuttaa tarvittavan pumppauksen määrään. Hyvällä suunnittelulla ja optimoinnilla voitaisiin esimerkiksi pienentää verkostopituuksia, suosia viettoviemäriä ja välttää turhaa saneerausta, jolloin energiatehokkuus kasvaisi ja päästöt vähenisivät. Pumppauksen energiankulutuksesta suuri osa menee vuotovesien pumppaukseen, esimerkiksi Joensuun viemäriverkostossa jätevesien pumppaukseen käytetystä energiasta noin 43 % (Ronkainen 2016). Tässä työssä verkostosuunnitteluun liittyvä optimointi ja vuotovesien pumppaukseen liittyvää energiankulutusta ei tarkastelu skenaarioiden yhteydessä. Myöskään verkostopäästöjen vähentämistä ei skenaarioissa tarkasteltu niihin liittyvän tutkimustiedon puutteesta johtuen.

Laskentaoletukset

- Nykytila
 - Talousveden pumppaukseen kuluu sähköä 67 072 MWh.
 - Jäteveden pumppaukseen kuluu sähköä 170 039 MWh.
- Nykytilan optimointi -skenaario
 - Suuret laitokset ($> 10\,000\text{ m}^3/\text{vrk}$) vähentävät pumppauksen energiankulutusta 20 %.
 - Keskisuuret laitokset ($1000\text{--}10\,000\text{ m}^3/\text{vrk}$) vähentävät pumppauksen energiankulutusta 10 %.

4.2.3 Jätevedenkäsittely

4.2.3.1 Kemikaalin käytön optimointi

Kemikaalien käyttöä pystytään pienentämään automatisoinnilla ja käytön optimoinnilla. VVY:n julkaisussa (Vilpanen ym. 2022) on käsitelty sekä jäteveden että lietteenkäsittelyn kemikaalin käytön optimointiin liittyviä teknisiä näkökulmia. Isoilla jätevedenpuhdistamoilla vuotuiset kemikaalin käyttömäärät ovat suuria ja sitä kautta optimoinnilla voidaan saada isoja kustannussäästöjä. Isoilla puhdistamoilla ollaankin jo melko pitkällä optimoinnissa (Kuokkanen 2023). Pienillä puhdistamoilla sen sijaan haasteena on henkilöresurssien ja osaamisen riittävyys optimointiin. Automaatio ja lisäinstrumentaatio vaativat huoltoa ja osaamista, ja investointikustannukset ovat merkittävät, toisaalta säädöt halutaan myös tehdä varman päälle, eikä isoja muutoksia haluta lähteä kokeilemaan. Pienillä laitoksilla

kemikaalien kokonaiskäyttömäärät ovat myös suhteellisen pieniä. Todennäköisesti suurin kemikaalien säästöpotentiaali voisi löytyä keskisuurilta puhdistamoilta (Haimi & Antikainen 2023).

YLVA-järjestelmän ja Laitinen ym. (2014) julkaisun tietojen mukaan keskisuurilla puhdistamoilla kuuluu saostuskemikaaleja keskimäärin 1,5–2 kertaa niin paljon kuin suurilla puhdistamoilla. Tämä selittyy automaation ja optimoinnin lisäksi todennäköisesti sillä, että suurilla puhdistamoilla on tiukemmat lupavaatimukset ja usein jälkikäsittely käytössä, jolloin kemikaaleja voidaan käyttää vähemmän.

Laskentaoletukset

- Nykytila
 - Laskettu kerättyjen kemikaalinkulutustietojen mukaan, jolloin kemikaaleja keskisuurilla puhdistamoilla kuluu 1,5–2 kertaa niin paljon kuin suurilla puhdistamoilla (ks. luku 3.6.4).
- Nykytilan optimointi -skenaario
 - Kemikaalin käyttömäärät vähentyvät keskikokoisilla puhdistamoilla niin, että kemikaaleja kuluu 1,2 kertaa niin paljon kuin suurilla puhdistamoilla (verrattu mediaanikulutukseen).

4.2.3.2 Kemikaalivalinnat

Polyalumiinikloridilla (PAC) on rautapohjaisiin saostuskemikaaleihin (ferro- ja ferrisulfaatti) nähden yli kuusinkertainen päästökerroin (ecoinvent 2021), sillä rautapohjaiset kemikaalit valmistetaan usein teollisuuden sivuvirroista syntyvistä kierrätysmateriaaleista. Polyalumiinikloridi on myös kalliimpi vaihtoehto ja sitä käytetään selvästi vähemmän kuin rautapohjaisia vaihtoehtoja, pääasiassa pienillä puhdistamoilla ja isoilla puhdistamoilla vain jälkisaostuksessa. Se toimii rautapohjaisia kemikaaleja tehokkaammin jälkisaostuksessa, etenkin jos rinnakkaissaostus tehdään rautapohjaisella kemikaalilla. Polyalumiinikloridi on kuitenkin usein mahdollista korvata rautapohjaisilla saostuskemikaaleilla. (Kuokkanen 2023; Kähkönen 2023).

Jätevedenkäsittelyssä käytetään kalkkia alkalointiin ja noin 47 % käsitellystä jätevedestä käsitellään sammutetulla kalkilla. Sammutettu kalkki on mahdollista korvata kalsiumkarbonaatilla eli kalsiitilla. Esimerkiksi Turun Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla on käytetty pelkästään kalsiumkarbonaattia vuodesta 2016 alkaen (Laanti & Malmikare 2023). Sammutetun kalkin päästökerroin on noin kolminkertainen kalsiumkarbonaattiin verrattuna (ecoinvent 2021), mutta toisaalta kalsiumkarbonaattia tulee annostella keskimäärin kaksi kertaa niin paljon kuin sammutettua kalkkia (Nevalainen 2023). Kalsiumkarbonaatti liukenee huonosti ja esimerkiksi HSY:n Viikinmäen puhdistamolla kalsiumkarbonaatin käyttöön siirtyminen ei ole mahdollista kalkin syöttöpisteen sijoittumisen vuoksi. Uudella Blominmäen puhdistamolla tämä olisi mahdollista ja HSY on kiinnostunut kokeilemaan kemikaalin käyttöä (Kuokkanen 2023).

Neitseellisistä raaka-aineista valmistettujen kemikaaleja voidaan korvata kierrätysmateriaaleista tehdyillä valmisteilla. Jätevedenkäsittelyssä on tämän suhteen enemmän potentiaalia, sillä kemikaalien puhtausvaatimukset ovat alhaisemmat kuin talousveden tuotannossa, mikäli kemikaalin toimivuudessa ilmenee ongelmia. Toisaalta esimerkiksi mahdollinen haitta-aineriski tai prosessihäiriöihin liittyvä riski voi vähentää kierrätyspohjaisten kemikaalien käyttöä myös jätevedenkäsittelyssä (Kuokkanen 2023). Kierrätysmateriaaleja ja teollisuuden sivutuotteita hyödyntämällä voidaan valmistaa mm. ferrosulfaattia, lipeää, kiertotalouskalsiittia (meesatuhka) ja polymeeria. Esimerkiksi kiertotalouskalsiitti on metsäteollisuuden sivutuote, jota hyödynnetään mm. Jyväskylän Nenäinniemen ja Hämeenlinnan Paroisten

puhdistamolla. Vilpasen ja Pyykkösen (2023) arvion mukaan esimerkiksi Jyväskylässä soodan vaihtaminen kiertotalouskalsiittiin pienentää puhdistamon hiilijalanjälkeä merkittävästi.

Laskentaoletukset

- PAC:n korvaaminen ferrisulfaatilla
 - Nykytila: 16 % Suomessa käsitellystä jätevedestä käsitellään PAC:lla.
 - Nykytilan optimointi -skenaario: 50 % PAC:sta korvataan ferrisulfaatilla. Ferrisulfaattia annostellaan 1,5 kertaa niin paljon kuin PAC:a (massana) (Kähkönen 2023).
- Kalkin korvaaminen kalsiumkarbonaatilla
 - Nykytila: 47 % käsitellystä jätevedestä käsitellään sammutetulla kalkilla ja 10 % kalsiumkarbonaatilla (Turku ja Vaasa).
 - Nykytilan optimointi -skenaario: 35 % käytetystä sammutetusta kalkista korvataan kalsiumkarbonaatilla. Kalsiumkarbonaattia annostellaan kaksi kertaa niin paljon kuin sammutettua kalkkia (massana) (Nevalainen 2023).
- Alkalointikemikaalien korvaaminen kiertotalouskalsiitilla
 - Nykytila: käsitellystä jätevedestä käsitellään 3 % lipeällä, 22 % soodalla ja 47 % sammutetulla kalkilla.
 - Nykytilan optimointi -skenaario: alkalointikemikaaleja korvataan kiertotalouskalsiitilla (lipeästä 50 %, soodasta 50 % ja sammutetusta kalkista 35 %). Kiertotalouskalsiittia oletettiin annosteltavan saman verran kuin lipeää, soodaa ja sammutettua kalkkia (massana). Todellisuudessa ainakin soodaa tarvitaan jonkin verran enemmän, mutta tarkempaa tietoa sen käytöstä ei ollut saatavilla.
 - Kiertotalouskalsiitille käytettiin päästökerrointa 0, koska se on teollisuuden sivutuote ja sillä on jätestatus. Kemikaalin käytön päästöjen laskennassa huomiottiin ainoastaan sen kuljetuksen päästöt.

4.2.3.3 Energiatehokkuus ja optimointi

Skenaariossa tarkasteltiin tilannetta, jossa jätevedenkäsittelyn energiankulutusta pienennetään energiatehokkuutta parantamalla ja energiankäyttöä optimoimalla. Säästötoimet ajateltiin koskevan kaikkia sähköä kuluttavia toimintoja, joista ilmastus on suurin. Ilma syötetään jäteveteen kompressoreilla, joiden käyttö kuluttaa yli puolet, tyypillisesti 50–70 % puhdistamon kokonaisenergiasta (VVY 2016). Energiatehokkuuden kasvattamiseksi on tärkeää mitoittaa kompressorit ja säätöventtiilit oikein, ohjata niitä automaattisesti kuormituksen vaihtelun mukaan sekä ajaa kompressoreita lähellä optimaalista toimintapistettä. Ilmastuksen energiatehokkuutta on tutkittu mm. Jortikan (2023) diplomityössä sekä Sandelinin (2021) opinnäytetyössä. Svensk Vatten (Bengtsson ym. 2019) on julkaissut laajan raportin, jossa tarkastellaan jätevedenpuhdistamon ilmastuksen suunnittelua, käyttöä ja ylläpitoa energiatehokkuuden näkökulmasta.

Ilmastuksen energiatehokkuutta arvioitaessa kannattaa huomioida myös olemassa olevan ilman-syöttöjärjestelmän tehokkuus. Monesti puhdistamoilla tuotetusta ilmastusilmasta huomattava osa menee hukkaan, kun siinä olevaa hapetta ei saada riittävän tehokkaasti siirrettyä aktiivilietteeseen. Tehokkaalla hapensiirrolla voi helposti vähentää ilmastusilman tarvetta 20–40 %. Näiden lisäksi tulisi

pyrkiä minimoimaan liian ilmastusilman syöttäminen altaaseen. Tätä varten altaissa tulisi olla oikein huolletut ja kalibroidut happimittaukset. Jos arvo ylittää asetetun raja-arvon ilman syöttöä altaaseen vähennetään jne. Energiat ehokkuuteen panostamalla, sekä järjestelmien sopivilla säätö- ja optimointitoimilla voidaan ilmastuksen energiankulutuksessa säästää jopa 20–60 %, riippuen laitoksen lähtötilanteesta (Pakarinen 2023). Ilmastuksen energiansäästötoimissa on tärkeää ottaa huomioon, että typpioksiduulipäästöjen vähentäminen vaatii riittävää ilmastusta (mm. Sieranen 2023), jolloin ilmastuksen liialliset energiansäästötoimet voivat pahimmillaan lisätä puhdistamon ilmastovaikutuksia.

Ilmastuksen lisäksi jätevedenpuhdistamoilla pumppaukset kuluttavat merkittävästi sähköenergiaa. Pumppujen energiat ehokkuudella ja käytön optimoinnilla on merkitystä puhdistamon energiansäästön kannalta, vaikkakaan se ei ole yhtä merkittävä kuin ilmastuksen energiankulutus (VVY 2016; Pakarinen 2023). Pumppauksen tehokkuutta ja jatkuvatoimisuutta toteutetaan pääsääntöisesti käyttämällä taa-juusmuuttajia pumpun pyörimisnopeuden säätöön. Erityisesti käsittelemättömän jäteveden pumppauksessa esimerkiksi tulopumppaamossa on tärkeintä toimintavarmuus, jolloin pumppu ei saa tukkeutua jätevedessä olevista kuiduista tai roskista. Tämän tukkeutumattomuuden vuoksi joudutaan usein valitsemaan hyötysuhteeltaan huonompia pumpputyppejä tai juoksupyöräkrakenteita sekä turvautumaan pumppauksen jaksottamiseen, mikä myös heikentää hyötysuhdetta (Haimi & Antikainen 2023).

Laskentaoletukset

- Nykytila: sähkön kokonaiskulutus jätevedenpuhdistuksessa on 304 869 MWh/v.
- Nykytilan optimointi -skenaario: suurilla (virtaama yli 10 000 m³/vrk) laitoksilla sähkönkulutus vähenee 35 % ja keskiuurilla (virtaama 1 000–9 999 m³/vrk) laitoksilla 20 %, jolloin jätevedenkäsittelyn sähkön kokonaiskulutus on 227 061 MWh/v.

4.2.4 Lietteenkäsittelyn tehostaminen

Lietteenkäsittelymenetelmistä kompostoinnilla on suurimmat elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Liete voidaan kompostoida sellaisenaan tai mädätyksen jälkeen. Kompostointia tai muuta hygienisointia voidaan edellyttää, mikäli liete on käsittelemätöntä tai se on mädätetty alhaisessa lämpötilassa. Lietteen kompostoinnissa muodostuu kasvihuonekaasupäästöjä sekä samalla menetetään kasveille käyttökelpoista typpeä. Typen talteenoton yhdistäminen kompostointiin on teknisesti vaikeaa, etenkin jos kompostointi tapahtuu aumassa.

Lietteenkäsittelyn päästöjä voitaisiin alentaa vähentämällä mädättämättömän lietteen kompostointia ja lisäämällä mädätystä, jolloin myös biokaasun tuotantokapasiteetti lisääntyisi. Biokaasun tuotannossa voidaan olettaa myös tapahtuvan tehostumista erityisesti päästöjen hallinnan suhteen tulevina vuosina. Lietteen kompostointi mädätyksen jälkeen vähentää myös päästöjä pelkään kompostointiin verrattuna. Lietteenkäsittelyssä on olennaista huomioida kokonaisuus ja erityisesti se, että muodostuvan lopputuotteen hyödyntäminen ja kysyntä. Tällä hetkellä esimerkiksi kompostoidulle lietteelle on olemassa jo vakiintuneita käyttökohteita viherrakentamisessa. Ei kuitenkaan ole selvää, tuotetaanko kompostoitua lietettä ylimäärin viherrakentamisen tarpeisiin nähden. Valmisteilla oleva lannoitevalmisteasetus (Valtioneuvoston asetusluonnos lannoitevalmisteista 6234/2023) mahdollistaisi toteutuksessaan kuitenkin erilaisten ainesosien sekoittamisen, joka voisi tuoda myös mahdollisesti uusia käyttökohteita lietteelle.

Lietteenkäsittelyssä olennainen kokonaisuus on lietteen sisältämien epäpuhtauksien vaikutusten minimointi ympäristöön. Onkin esitetty, että nykyiset lietteenkäsittelymenetelmät eivät sellaisenaan

ole riittäviä näiden haitta-aineiden vaikutusten vähentämisen näkökulmasta. Uusien lietteenkäsittelymenetelmien kehittäminen onkin ensiarvoisen tärkeää, jotta voidaan vähentää ympäristön pilaantumista, mutta samanaikaisesti palauttaa orgaanista ainesta sekä ravinteita takaisin kiertoon. (Lehtoranta ym. 2021; Äystö ym. 2022; Selonen ym. 2023). Tässä työssä ei arvioitu uusien, kehitteillä olevien lietteenkäsittelymenetelmien vaikutuksia eikä skenaarioiden yhteydessä tarkasteltu sitä, miten lietteenkäsittelymenetelmien muuttaminen vaikuttaisi lietteen sisältämiin haitta-aineisiin.

Laskentaoletukset

- Lietteenkäsittelymenetelmien osuudet: nykytila → Nykytilan optimointi -skenaario
 - kompostointi 17 % → 10 %
 - mädätys 30 % → 45 %
 - mädätys ja kompostointi 42 % → 36 %
 - kemiallinen käsittely 5 % → 1 %
 - mädätys ja terminen kuivaus 4 % → 4 %
 - poltto 2 % → 4 %
 - mädätykseen yhteensä 76 % → 85 %.
- Skenaariossa muodostuva ylijäämä biokaasusta ohjautuu liikennepolttoaineen tuotantoon.
- Poltto: Tällä hetkellä lietteenpoltto ei tapahdu olemassa olevassa Rovaniemen laitoksessa täyden kapasiteetin mukaisesti. Oletuksena on, että lietteen polttokapasiteetti tuplaantuu ja samalla myös laitokset toimivat täydellä kapasiteetilla.
- Mädätyksen metaanivuodot oletettiin olevan 3 % tuotetusta metaanista (nykytilassa perusoletus 5 %).

4.2.5 Energiantuotanto

4.2.5.1 Lämmön talteenotto (LTO)

Jätevedenpuhdistamoiden sekä vesilaitosten omavaraisuutta lämmön suhteen voidaan kasvattaa ottamalla lämpöä talteen jätevesistä, ilmastuskompressoreista, ilmanvaihdosta ja lämpöpumppujen hukkalämmöstä. Isommassa mittakaavassa merkittävä energiantuotantopotentiaali on jätevesistä otetun lämmön hyödyntämisessä kaukolämmön tuotannossa. Kaukolämpöä tuotetaan tällä hetkellä Turun Kakolanmäen sekä HSY:n Viikinmäen ja Blominmäen jätevedenpuhdistamoiden jätevesien hukkalämmöstä. Kaukolämmön tuotantoon tähtääviä laitoksia on tekeillä tai suunnitteilla esimerkiksi Vaasaan, Lahteen, Jyväskylään ja Kouvolaan.

Lämmön talteenottopotentiaalia löytyy monesta muustakin kohteesta. Esimerkiksi ilmastusprosessissa syntyy runsaasti hukkalämpöä, josta parhaimmillaan lähes kaikki voidaan saada hyötykäyttöön lämpöpumpun avulla. Esimerkiksi Turun seudun puhdistamo Oy ottaa ilmastuksesta sekä osin myös ilmanvaihdosta lämpöpumpuilla energiaa talteen yhteensä noin 3000 MWh vuodessa (Malmikare 2023). Lämpö voidaan hyödyntää puhdistusprosessin muissa vaiheissa tai rakennusten lämmityksessä.

Jäteveden lämmön talteenoton energiatasetta kaupungissa ja lämmön talteenoton vaikutuksia jätevedenkäsittelyyn on tutkittu laajassa JV-LÄMPÖ hankkeessa (HSY 2023). Lämpöä voidaan ottaa talteen myös lietteestä. Aiheesta on käynnissä HSY:llä hanke, jossa arvioitu vuosittainen hyödyksi saatava lämpöenergiamäärä on noin 2,8 GWh (Kumlin ym. 2021). Lisäksi merkittävää lämmön talteenottopotentiaalia löytyy raaka- ja talousvedestä, joita tutkittiin Turun seudun vedenhankinnan yhteydessä. Vuosittaiseksi lämmitysenergiapotentiaaliksi arvioitiin Virttaankankaalta Saramäen kalliosäiliöön johtavasta käyttövesilinjasta 120 GWh/v ja Laakkarin kalliosäiliöön johtavasta käyttövesilinjasta noin 30 GWh/v (Laitinen & Wallin 2022). Edellä mainittuja näkökohtia ei olla tarkasteltu tässä työssä riittämättömien lähtötietojen vuoksi.

Laskentaoletukset

- Nykytila
 - Puhdistamoiden oma lämmön tuotanto jätevesistä ja muista toimista 15,38 GWh/v.
 - Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto 782,4 GWh/v.
- Nykytilan optimointi -skenaario
 - LTO lisääntyy 30 % (puhdistamoiden omaan käyttöön).
 - LTO – kaukolämmön tuotanto lisääntyy 52 %, jolloin kokonaistuotanto on 1193 GWh/v. Mukaan on laskettu Fortumin lämpöpumppulaitoksen kapasiteetin kasvu (Blominmäen puhdistamo) sekä tekeillä ja suunnitteilla olevat laitokset. Kaikilta suunnitteilla olevilta laitoksilta ei saatu arviota tulevasta lämpöenergian tuotosta, jolloin arvio tehtiin olemassa olevien tietojen pohjalta perustuen laitosten energiantuotantoon suhteessa jätevesivirtaamaan.

4.2.5.2 Aurinkosähkö

Jätevedenpuhdistamot ja vesilaitokset ovat erinomaisia paikkoja aurinkopaneeleille erityisesti siksi, että laitoksissa kuluu sähköä runsaasti myös kesäkaudella, jolloin paneelien sähköntuotto on suurimmillaan. Lisäksi paneelien asennus on helppoa, koska rakennuksissa on yleensä runsaasti helposti hyödynnettäviä kattopintoja. Aurinkopaneeleja on jo käytössä useilla vesihuoltolaitoksilla (mm. HSY, Kouvolan Vesi, Kymen Vesi, Turun Seudun Vesi, Hangon Vesi). Esimerkiksi Kymen Vedellä sähkön tuotanto Mussalon jätevedenpuhdistamon aurinkopaneeleilla on noin 300 MWh/v, joka on noin 7 % puhdistamon sähkönkulutuksesta (Ukko 2023).

Laskentaoletukset

- Nykytila: 0 GWh/v (olemassa olevia aurinkovoimaloita ei tietojen puuttumisen vuoksi ole huomioitu laskennassa).
- Nykytilan optimointi -skenaario: 11,4 GWh/v (eli 5 % sähkönkulutuksesta).

4.3 Skenaario 2: Ravinteet talteen

4.3.1 Ravinteiden talteenotto jätevesistä

Yhdyskuntajätevesien sisältämissä ravinteissa on paljon hyödyntämätöntä potentiaalia. Vesihuollon ilmastovaikutusten kannalta kiinnostavaa on ravinteiden mahdollisuudet korvata maataloudessa tai teollisuudessa käytettyjä ravinnevalmisteita. Ravinteiden talteenottomenetelmiä on tarkasteltu kattavasti Suomen ympäristökeskuksen tekemässä NORMA-julkaisussa (Lehtoranta ym. 2021) sekä Ramboll Finland Oy:n (2023) ravinteiden talteenoton menetelmäselvityksessä. Lisäksi LietteKierto -hankkeessa on tarkasteltu yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen vaihtoehtoja sekä erilaisia liiketoimintamalleja (Kinnarinen 2022). Järkki-hankkeessa (Kinnunen ym. 2023) puolestaan tarkasteltiin ravinteiden kierron tehostamista keskitetyn lietteenkäsittelyn keinoin.

Ravinteiden talteenottomenetelmiä kehitetään jatkuvasti ja kehityksessä on tapahtunut viime vuosina edistystä. Kehittyvien talteenottomenetelmien avulla yhä suurempi osa jätevesien sisältämistä ravinteista voidaan saada talteen: jopa 90 % fosforista (nykyisin n. 70 %) ja tyypestä kolme kertaa niin paljon kuin nykyisin saadaan (Lehtoranta ym. 2021). Menetelmien avulla voidaan tuottaa lannoitevalmisteita maatalouden ja teollisuuden käyttöön sekä vähentää haitta-aineiden kulkeutumista ympäristöön.

Ramboll Finland Oy:n (2023) hankkeessa kartoitettiin Suomen oloihin sopivia, tekniseltä kypsyyssasteeltaan kypsimpiä typen ja fosforin talteenottomenetelmiä. Fosforin talteenoton kannalta kiinnostaviksi nousivat RAVITA-prosessi, struviitin saostus ja fosforin talteenotto polton yhteydessä muodostuvasta tuhkasta. Polton haittapuolena on, että osa tai kaikki lietteen sisältämästä tyypestä ja orgaanisesta aineesta menetetään, samalla myös fosforin käyttökelpoisuus saattaa heiketä. Tuhka voi sisältää myös raskasmetalleja. Tyypeä voidaan saada talteen esimerkiksi strippauksella, kalvomenetelmillä tai NPHarvest-menetelmällä. Typen talteenotossa voidaan hyödyntää mädätetyn tai mädättämättömän lietteen kuivauksessa muodostuvaa rejektivettä, joka nykyisin useimmiten johdetaan takaisin jätevedenpuhdistamolle.

Tässä työssä fosforin talteenotto RAVITA-menetelmällä valittiin tarkasteluun, koska se on lupaava, kotimaassa kehitteillä oleva menetelmä. RAVITA-prosessi ei heikennä fosforin laatua ja samalla se vähentää muodostuvan lietteen määrää. Typen talteenottomenetelmänä tarkasteltiin typen strippausta mädätyksen rejktivestä, sillä se on jo Suomessakin käytössä oleva menetelmä, josta oli myös tietoa saatavilla. Muita muutoksia lietteenkäsittelyssä ei tässä skenaariossa huomioitu eikä muita ravinteiden talteenottomenetelmiä tarkasteltu.

4.3.2 Typen talteenotto

Tyypeä voidaan ottaa talteen nestejakeesta strippaamalla. Strippauksessa ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$) erotetaan nestejakeesta ja lopputuotteena muodostuu esim. ammoniumsulfaattia tai ammoniakkivettä. Prosessin avulla voidaan saada talteen jopa yli 90 % nestejakeen sisältämästä liukoisesta tyypestä. Talteenotto tapahtuu yleensä kolonnin, stripperi- ja pesuriyksikön muodostamassa järjestelmässä. Ilmapuhalluksen avulla sekä nestejakeen pH:ta ja lämpötilaa säätämällä nestejakeen ammoniumtyypestä muodostuu kaasumaista ammoniakkia (NH_3). Ammoniakkipitoinen ilma puhalletaan pesuriyksikköön, jossa ammoniakki voidaan saada talteen ilmapirrasta esim. rikkihappoon tai veteen ja ottaa talteen vesiliuoksena. (Marttinen ym. 2017; Ervasti ym. 2018; Tampio ym. 2018) Prosessissa reagoimaton typpi sekä fosfori jäävät muodostuvaan rejektiin (Tampio ym. 2018).

Raakalietteessä suurin osa tuestä on sitoutuneena orgaanisiin tyypiyhdisteisiin. Raakalietteen kuivauksessa muodostuvassa, jätevedenpuhdistamolle palautettavassa vedessä typpipitoisuus on yleensä alhainen. Määtätysprosessin jälkeen, sen sijaan, lietteen kuivauksessa tuestä päätyy enemmän rejektiveen, koska prosessin aikana tuestä liukoistuu ammoniumtuestä. Näin ollen suurempi potentiaali tuestä talteenotolle on määtätymisen jälkeen lietteestä erotetussa rejektivedessä.

Laskennassa oletettiin, että typpi stripataan määtätetystä lietteestä erotetusta nestejakeesta, eli rejektivedestä haihturi-höyrystrippauksella. Tuotteena muodostuu konsentroitunutta rejektia ja ammoniakkivettä. Skenaariossa oletettiin, että 80 % rejektistä käsitellään strippaamalla. Laskennan yksinkertaistamiseksi, siinä ei eroteltu laitoksia, joissa liete ensin kuivataan ja vasta sen jälkeen määtätetään. Rejektiveden oletettiin lisäävän nykyisellään typpikuormaa puhdistamolle 15–20 % puhdistamolle tulevasta typpikuormasta (HSY 2013). Näin ollen nykyisellään rejektiveden tuestä oletettiin muodostavan 17,5 % nykyisistä jätevedenpuhdistamon ilmapäästöistä. Tätä oletusta hyödyntämällä arvioitiin rejektiveden aiheuttaman typpikuorman vähenemän vaikutusta jätevedenkäsittelyn ilmapäästöihin. Tuestä talteenoton oletettiin myös vaikuttavan purkuveden sisältämästä tuestä muodostuviin typpioksidipäästöihin. Kuormituksen väheneminen arvioitiin huomioimalla talteen otettu typpi ja Suomessa vallitseva keskimääräinen puhdistusteho vuonna 2019 (37,3 % tulevasta tuestä jää purkuveteen) (vesi.fi 2023). Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että tällä hetkellä laitoksen ympäristölupa ja puhdistusteho määritellään suhteessa tulevaan jäteveeseen ilman rejektia. Kuormituksen pienentyessä rejektiveden tuestä hyödyntämisen myötä, puhdistamo voi kuitenkin toimia edelleen lupaehtojen puitteissa ja päästää vesistöön saman määrän tuestä, kuin tilanteessa, jossa ei ole tuestä talteenottoa rejektivedestä. Tässä laskennassa oletettiin, että puhdistamot jatkaisivat kuitenkin toimintaansa entisellä tehokkuudella ja näin ollen purkuveden typpikuorma pienenesi rejektiveden tuestä talteenoton myötä.

Tutkimustieto eri lietteenkäsittelymenetelmien vaikutuksista jätevesilietteen liukoisen tuestä määrään todettiin tutkimusta tehdessä puutteelliseksi, eikä eri käsittelymenetelmien vaikutuksia liukoisen tuestä määrään voitu erottaa. Tästä syystä nykytilassa sekä kaikissa skenaarioissa arvioitiin lietteen mukana hyödynnettäväksi päätyvän liukoisen tuestä määräksi 800 t.

Rejektin tuestä oletettiin olevan liukoista 95 % ja tästä 90 % oletettiin saatavan strippauksella talteen (Lehtoranta ym. 2021). Ravinteet talteen -skenaariossa talteen otetun tuestä määräksi saatiin 2 867 t N ja nykytilan optimointi + ravinteet talteen -skenaariossa 3 396 t N. Talteen otetusta tuestä oletettiin tuotettavan teollisuuden käyttöön ammoniakkivettä. Strippauksen energiankulutuksen ja kemikaalikulutuksen lähtötietoina hyödynnettiin Gasumilta saatuja lähtötietoja.

4.3.3 Fosforin talteenotto

RAVITA on HSY:n kehittämä menetelmä, jossa fosfori otetaan talteen saostamalla se kemiallisesti jäteveden puhdistusprosessin lopussa alumiinisulfaatin avulla. Muodostunutta kemiallista fosforisakkaa liuotetaan fosforihapolla. Kemiallisen sakan fosfori saadaan talteen fosforihapon muodossa, mistä osa kierrätetään takaisin liuotusvaiheeseen. Myös saostuskemikaalia voidaan kierrättää. Fosforihapon ylimäärä on prosessin lopputuote, joka voidaan hyödyntää lannoiteteollisuuden raaka-aineena tai muilla muilla teollisuuden aloilla. Jotta fosforista saataisiin talteen mahdollisimman suuri osa RAVITA-menetelmällä, valtaosa fosforista saostetaan vasta jälkikäsittelyvaiheessa. RAVITA-menetelmä vähentää muodostuvan puhdistamolietteen määrää noin 20 %. (HSY 2017; Rossi ym. 2018).

Ravinteet talteen skenaariossa oletettiin, että suurten, yli 10 000 m³/vrk laitosten jätevesivirtaamasta 70 % käsiteltäisiin uudella fosforin talteenottomenetelmällä, RAVITA-prosessilla. Tämä vastaa noin 50 % kaikesta jätevesivirtaamasta Suomessa. Näin ollen RAVITA-prosessilla talteen otetun fosforin

määräksi arvioitiin 1 753 t P/vuodessa. RAVITA-prosessin lähtötietoina käytettiin HSY:ltä saatuja tietoja prosessin energiankulutuksesta, kemikaalikulutuksista sekä tuotetuista tuotteista. RAVITA-prosessi on toistaiseksi pilotointivaiheessa ja esimerkiksi energiankulutusta ei ole prosessinkehityksessä vielä optimoitu. Tässä työssä kuitenkin oletuksena oli, että RAVITA-prosessia hyödynnettäisiin suuressa mittakaavassa, mikä aiheutti haasteita lähtötietojen soveltamiselle. Erotusvaiheen energiankulutusta ja rikkihapon kulutusta ei siten huomioitu lopullisessa laskennassa olemassa olevien tietojen skaalautuvuusongelmien vuoksi.

Lietteenkäsittelyssä huomioitiin lietteen määrän väheneminen lietteen kokonaismäärässä, eikä sitä kohdistettu tiettyyn lietteenkäsittelymenetelmään vaan vähenemä jyvitettiin eri menetelmille niiden välisten suhteiden mukaisesti.

4.4 Skenaario 3: Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen

Kolmannessa skenaariossa yhdistettiin Nykytilan optimointi -skenaarion ja Ravinteet talteen-skenaarion oletukset. Nämä skenaariot on avattu luvuissa 4.2 ja 4.3.

4.5 Substituutiot ja vältettyjen päästöjen määrittäminen

Vältettyjä päästöjä tarkasteltiin lietteenkäsittelyssä muodostuvan energian (mädätys: sähkö, lämpö, liikennepolttoaine ja lietteen poltto; lämpö), lietteestä ja jätevedestä talteen otettujen ravinteiden sekä jätevedestä tuotetun kaukolämmön osalta. Substituutioiden arviointi perustui skenaarioissa tehtyihin oletuksiin mm. lietteenkäsittelymenetelmistä ja energiankäytön tehostumisesta. Käytettyjä oletuksia hyödyntämällä mallinnettiin ravinne- ja energiataseet Lehtoranta ym. (2022a) julkaisuun sekä työssä tehtyyn energiataseeseen perustuen. Mallinnuksesta johdetut substituutiot sekä niiden ryhmitely on esitetty taulukossa 16.

Työssä oletettiin, että lietteen sisältämät ravinteet korvaavat nykytilanteessa mineraalilannoitteiden käyttöä. Lietteen sisältämän fosforin substituutiovaikutus laskettiin fosforiasetuksen (Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023) mukaisesti, jonka mukaan 60 % lietteen fosforista huomioidaan. Lietteen sisältämästä typestä huomioitiin vain liukoinen tyyppi. Skenaarioissa 2 ja 3, joissa oli ravinteiden talteenottomenetelmiä käytössä, talteen otetun fosforihapon oletettiin korvaavaan teollisesti tuotettua fosforihappoa. Rejektivedestä talteen otetun ammoniakkiveden oletettiin korvaavan teollisuudella käytössä olevaa ammoniakkivettä.

Jätevedestä tuotetun ja myydyn kaukolämmön oletettiin korvaavan keskimääräistä kaukolämpöä. Biokaasulaitosten tuottamalle myydylle energialle ja liikennepolttoaineelle huomioitiin myös vältetyt päästöt. Biokaasulla tuotetun sähkön oletettiin korvaavan Suomen keskimääräistä sähköä ja kaukolämpöä (luku 3.2). Biokaasusta tuotetun liikennepolttoaineen oletettiin korvaavan tieliikenteen liikennepolttoaineita huomioiden tieliikenteen fossiilisten polttoaineiden (diesel, moottoribensiini, maakaasu) suhteet vuosina 2018–2020 (Tilastokeskus 2022) sekä niille asetetut päästökertoimet polttoaineluokituksen mukaan (Tilastokeskus 2023a) sekä polttoaineiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt (ecoinvent 2021).

Taulukko 16. Nykytilassa ja skenaarioissa käytetyt laskentaoletukset substituutioille

	Nykytila	Nykytilan optimointi -skenaario	Ravinteet talteen -skenaario	Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaario
Kaukolämpö				
Jätevedestä talteen otettu lämpö	782 400 MWh	1 193 114 MWh	782 400 MWh	1 193 114 MWh
Lietteen poltto: lämpö	1 300 MWh	14 400 MWh	1 300 MWh	14 400 MWh
Biokaasuenergia				
Biokaasu: sähkö	5 530 MWh	6 437 MWh	5 376 MWh	6 104 MWh
Biokaasu: lämpö	31 355 MWh	32 485 MWh	31 178 MWh	32 046 MWh
Biokaasu: liikennepoltto-aine	5 267 MWh	13 828 MWh	5 120 MWh	13 828 MWh
Lietteen ravinteet: liukoinen typpi				
Puhdistamolietteen liukoi- nen typpi	800 t	800 t	800 t	800 t
Ammoniakkivesi (100 % ammoniakkina)			3 486 t	4 128 t
Lietteen ravinteet: fosfori				
Puhdistamolietteen fosfori	2 132 t	2 195 t	1 137 t	1 116 t
Fosforihappo (100 % fosfo- rihappona)			5 532 t	5 532 t
Aurinkosähkö		11 353 MWh		11 353 MWh

4.6 Muut mahdolliset skenaariot

4.6.1 Käsittelyvaatimukset tiukentuvat

EU:n juomavesidirektiivin (2020/2184) ja uudistetun kansallisen talousvesiasetuksen (1352/2015) myötä tiukentuneet haitta-aineiden poistovaatimukset vaikuttavat siihen, että paineet aktiivihiilen käytön lisäämiselle talousveden tuotannossa kasvavat tulevaisuudessa. Tällöin olennaiseksi tarkastelun kohteeksi nousevat käytön optimoinnin lisäksi aktiivihiilen vaihtoehtoiset raaka-aineet. Vilénin (2021) tutkimuksessa tehtiin aktiivihiilen tuotannon elinkaariarviointi kivihiili-, kookos-, puunkuori- ja turvepe-
räiselle aktiivihiilelle, joista kookos ja puunkuori nousivat esiin vähäisempien ilmastovaikutusten ansi-
osta. Lisäksi lähellä tuotettu, sahateollisuuden sivutuotteena syntyvä puupohjainen raaka-aine on po-
tentiaalinen korvaava materiaali kivihiilipohjaiselle aktiivihiilelle. Vaihtoehtoisista raaka-aineista
tarvitaan lisää tutkimustietoa ja olennaista on huomioida materiaalien kokonaiskestävyys sekä käyttö-
määrät suhteessa nykyisin käytössä olevaan aktiivihiileen.

Aktiivihiiltä ei juurikaan käytetä jätevedenkäsittelyssä. Poikkeuksena on Turun Kakolanmäen jäteve-
denpuhdistamo ja kokeilu on käynnissä myös Vaasan jätevedenpuhdistamolla. Turussa aktiivihiiltä käy-
tetään tällä hetkellä vain verkostossa muodostuvien hajukaasujen suodatukseen, mutta tulevaisuu-
dessa sitä tullaan testaamaan myös haitta-aineiden poistoon (Tuomi 2023). Myös Viikinmäen
puhdistamolla aktiivihiiltä on testattu (Kuokkanen & Stapf 2021). Aktiivihiilen käyttö todennäköisesti

lisääntyy tulevaisuudessa yhdyskuntajätevesidirektiivin myötä mahdollisesti kiristyvien haitta-aineiden poistovaatimusten takia. Tällä hetkellä direktiiviluonnoksessa haitta-aineiden poisto koskee yli 100 000 AVL laitoksia ja yli 10 000 AVL laitoksia niiltä osin kuin jätevedet johdetaan herkille alueille (European Commission 2022). Aktiivihiilisuodatuksen lisäksi haitta-aineiden poistoon voidaan käyttää otsonointia, jonka haittapuolena korkea sähkönkulutus ja soveltuvuus vain osaan puhdistamoista haitallisten hajoamistuotteiden riskin vuoksi. Lisäksi metanolin käyttö todennäköisesti lisääntyy, jos typenpoistovaimuudet kiristyvät. Metanolia käytetään hiilen lähteenä, eli ravintona bakteereille denitrifikaatioprosessissa.

Jätevesien käsittelyn tehostaminen voi lisätä myös puhdistamoiden energiankulutusta. Haitallisten aineiden, mikromuovien ja ravinteiden poiston tehostaminen sekä ravinteiden talteenotto voi edellyttää laitoksella uuden tekniikan käyttöönottoa, joista monet voivat kuluttaa runsaasti enemmän energiaa kuin nykyisin käytössä olevat puhdistusprosessit kuluttavat (VVY 2016).

4.6.2 Vuotovedet hallintaan

Vuotovesillä on koko Suomen mittakaavassa merkittävä vaikutus käsiteltävien ja liikutettavien vesimassojen määrään. Lapinlammen (2021) mukaan vuonna 2014 vuotovesien määrä talousvesiverkostosta oli noin 60 Mm³ ja jätevesiverkostoon noin 190 Mm³, mikä tarkoittaa n. 15 % verkostoon pumpattua talousvedestä ja noin 38 % käsitellystä jätevedestä. Vuotovedet vaikuttavat eri prosessivaiheiden energian- ja kemikaalinkulutukseen sekä jossain määrin oletettavasti myös jätevedenpuhdistamon typpioksiduulipäästöihin. Talousveden tuotannossa vaikutukset ovat melko suoraviivaisia, sillä kemikaaleja kuluu suhteessa käsiteltävän raakaveden määrään ja vesijohtoverkostossa paine korotetaan lähtökohtaisesti vain kerran tai kaksi, jolloin energiaa kuluu pumppaamiseen kutakuinkin suhteessa verkostoon pumpatun talousveden määrään. Näin ollen voidaan olettaa, että vuotovesien vaikutus talousveden käsittelyn ja vedenjakelun energian- ja kemikaalinkulutukseen on Suomessa noin 15 %. Jäteveden siirrossa käytetty pumppaus on puolestaan paljon monimutkaisempi kokonaisuus ja vuotovesien vaikutusta siihen on vaikeampi arvioida. Jätevedenkäsittelyssä kemikaalien kulutukseen vaikuttaa ensisijaisesti jätevesien orgaanisen aineen ja fosforin määrä, jolloin laimeat vuotovedet eivät välttämättä lisää kulutusta vuotovesien määrän suhteessa.

Hulevesissä on jonkin verran typpeä (1,27–2,4 mg/l), mikä vaikuttaa typpioksiduulipäästöjen muodostumiseen jätevedenpuhdistamolla (Valtanen ym. 2023). YLVA tilastojen mukaan suurilla puhdistamoilla tulevan veden typpikuorma on 32–88 mg/l. Vuotovesien aiheuttama ravinnekuormitus vaihtelee huomattavasti alueiden ja vuodenaikojen mukaan. Kansainvälisissä tutkimuksissa (Vasilaki ym. 2019; Gruber ym. 2021) on arvioitu, että vuotovedet vaikuttavat typpioksiduulipäästöjen lisääntymiseen jätevesien lämpötilan laskun ja laimentumisen myötä, mutta esimerkiksi Viikinmäen puhdistamolla tällaista korrelaatiota ei ole havaittu (Kosonen ym. 2016) (ks. luku 3.6.2).

Vesihuki-hankkeessa yhtenä pilottikohteena oli Joensuun Kuhasalon jätevedenpuhdistamo. Tarkastelussa laskettiin puhdistamolle elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt nykytilassa sekä skenaariossa, jossa vuotovesien määrä olisi nolla. Näin haluttiin tarkastella vuotovesien vaikutusta puhdistamon kasvihuonekaasupäästöihin. Laskennassa ei tarkasteltu verkostopumppausta eikä vuotovesien vähentymistä edellyttävää saneerausta. Tarkastelussa huomioitiin vuotovesien volyyymi sekä typpi-, fosfori- ja BOD kuorma, ja tarkasteltiin niiden vaikutusta kemikaalien ja energiankulutukseen, typpioksiduuli- ja metaanipäästöihin, biokaasun tuotantoon, lämmön talteenottoon jätevesistä ja kompostoinnin päästöihin. Tarkastelun aineistona käytettiin puhdistamolta saatuja mittaustietoja, kirjallisuuden arvoja,

asiantuntija-arvioita sekä Vesihuki-hankkeessa tehtyjä laskelmia. Tarkastelu tehtiin vuosille 2020 ja 2021.

Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt Kuhasalon puhdistamolla vähenivät skenaariotarkastelussa (vuotovesien määrä on nolla) vain 3,4–6,3 %. Epävarmuuksia aiheuttivat kuitenkin mittausdatan huono korrelaatio vuotovesien määrän kanssa (esimerkiksi kemikaalien ja energiankulutus). Tämän vuoksi vertailevaa laskentaa tehtiin kirjallisuuden arvoilla. Työssä ei voitu tutkimustiedon puutteesta johtuen ottaa huomioon vuotovesien aiheuttamaa häiriötä jätevedenkäsittelyprosessissa ja siitä mahdollisesti aiheutuvia muutoksia typpioksiduulipäästöissä.

Tarkastelussa laskettiin puhdistamon energiatase nykytilalle ja skenaariolle. Tulosten mukaan vuonna 2020 sähkön kokonaiskulutus vähenisi noin 1 370 MWh (38 %), jolloin puhdistamo olisi lähes energiaomavarainen (ostettavan sähkön osuus vähenisi 0 %:iin ja kevyen polttoöljyn kulutus vähenisi 95 %). Edellytyksenä on, että vuotovesien hallinnan myötä lämpöpumppujen käyttö samalla tehostuu. Nykytilanteessa vuotovesipiikit tukkivat lämpöpumput, jolloin lämmön talteenotto jätevesistä vähenee merkittävästi tai loppuu vuotovesien aikaan.

Johtopäätöksenä todettiin, että vuotovesien hyvä hallinta parantaa puhdistamon energiatasetta ja edistää energiaomavaraisuutta, mutta vaikutukset elinkaarisiin kasvihuonekaasupäästöihin on Kuhasalon puhdistamolla vähäinen tarkasteluun valitulla rajauksella. Tarkempi kasvihuonekaasupäästöjen arviointi vaatisi pidempiaikaista seuranta vuotovesien vaikutuksista kemikaalien, sähkön ja lämmönkulutukseen. Lisäksi tulisi arvioida vuotovesien vaikutusta puhdistamon mikrobeihin ja siten muodostuvien typpioksiduulipäästöjen määrään (lämpötilan ja huuhtoutumisen vaikutus). Arviointi edellyttäisi mittausdataa typpioksiduulipäästöistä. Lisäksi todettiin, että tarkastelun skenaario, jossa vuotovesien määrä on nolla, on epärealistinen tavoite, joka täytyy huomioida tulosten tulkinnassa.

Kuhasalon jätevedenpuhdistamon tarkastelu osoitti, että vuotovesillä on kuitenkin merkittävä vaikutus puhdistamon energiataseeseen. Tämän lisäksi vuotovedet vaikuttavat energiankulutukseen jätevesien pumppauksessa. Ronkaisen (2016) diplomityössä arvioitiin, että Joensuun viemäriverkostossa jätevesien pumppaukseen käytetystä energiasta noin 43 % kuluu vuotovesien pumppaukseen, joka tuolloin tarkoitti 480 MWh/v. Näin ollen Joensuun tapauksessa vuotovesien vähentyminen aiheuttaisi kokonaisuudessaan suuremman energiansäästön puhdistamolla (1 370 MWh) kuin verkostopumppauksissa.

Vuotovesien hallinnassa on huomioitava, että vaikka vuotovesien vähentäminen pienentäisi vesihuollon ilmastovaikutuksia puhdistamolla, vuotovesien parempi hallinta edellyttää verkoston saneerausta, joka lisää kasvihuonekaasupäästöjä (esim. Pillot ym. 2016). Toisaalta vuotovesien hallinta liittyy laajempaan hulevesien hallinnan kenttään. Esimerkiksi luontopohjaiset ratkaisut, kuten hulevesien imeyttäminen ja viivyttäminen vähentävät vuotovesien pääsyä viemäriverkostoon ja näin pienentävät vuotovesien määrää. Vuotovesien hallinnan ilmastovaikutusten kokonaisvaikutuksen arviointi edellyttäisi näin ollen tarkempia tietoja saneerauksen tarpeesta koko Suomen tasolla: alueelliset erot, putkikoot- ja materiaalit, saneeraustekniikat ja hulevesien kokonaisvaltaisen hallinnan vaikutukset saneeraustarpeeseen.

5 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa lasketut Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt kattavat kaikki keskitetyn vesihuollon osa-alueet. Suurimmat kokonaispäästöt olivat jätevedenkäsittelyllä. Suurin yksittäinen päästölähde oli jätevedenkäsittelyssä muodostuva typpioksiduuli. Vesihuollon päästövähennystoimista merkittävimiksi nousivat ravinteiden talteenotto ja kierrätys, kaukolämmön tuotanto jätevedestä sekä energiatehokkuuden parantaminen ja energiankäytön optimointi.

5.1 Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt

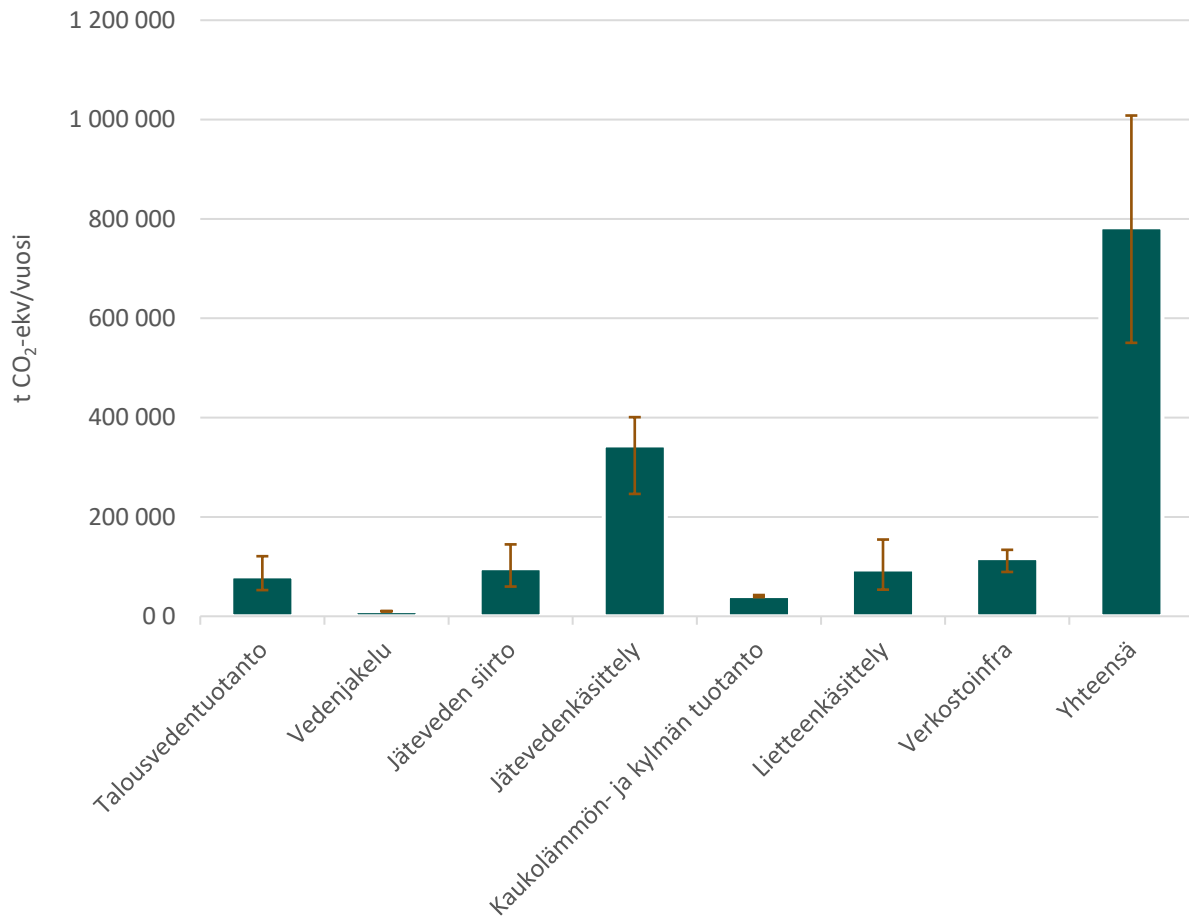
5.1.1 Yhteenveto

Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 783 525 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 550 780–1 008 421 t CO₂-ekv/vuosi) (kuva 2). Vesihuollon päästöt vastasivat noin 1,6 % (1,1–2,1 %) Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa (48 868 tuhatta tonnia CO₂-ekv/vuosi) raportoiduista kasvihuonekaasupäästöistä (Statistics Finland 2022). Talusveden tuotannon ja jakelun päästöt ovat 17,8 kg CO₂-ekv talusvesiverkostoon liittyntä henkeä kohden (vaihteluväli 12,3–25,8 kg CO₂-ekv). Jäteveden siirron, käsittelyn ja lietteenkäsittelyn päästöt ovat 116,0 kg CO₂-ekv viemäriverkostoon liittyntä henkeä kohden (vaihteluväli 78,0–151,8 kg CO₂-ekv).

Valtaosa vesihuollon kasvihuonekaasupäästöistä muodostuu jäteveden- ja lietteenkäsittelystä sekä jäteveden siirrosta. Jätevedenkäsittely yksin kattaa noin 44 % päästöistä (taulukko 17). Slagstadin ja Brattebon (2014) tutkimuksessa Trondheimin vesihuollon kasvihuonekaasupäästöistä 54 % muodostui jäteveden ja lietteenkäsittelystä ja noin 17 % talusvedentuotannosta (pintavesilaitos). Tässä tutkimuksessa talusvedentuotanto vastaa noin 10 % kokonaispäästöistä. Prosenttiosuudet muuttuvat hie- man, jos verkostoinfraa (verkostojen saneeraus ja uudisrakentaminen) ei huomioida ja tarkastellaan vain käytön aikaisia päästöjä (taulukko 17).

Suurimman päästölähteen muodostivat suorat kasvihuonekaasupäästöt, jotka koostuvat jäteveden- ja lietteenkäsittelyssä sekä viemäriverkostoissa muodostuvista typpioksiduuli- ja metaanipäästöistä (45 %) (kuva 3). Näistä suurin osa muodostuu jätevedenkäsittelyssä (30 % kaikista päästöistä). Toiseksi suurin kasvihuonekaasupäästöjen lähde oli vesihuoltolaitosten energiankulutus, joka kattoi noin 15 % vesihuollon elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä. Kemikaalien kulutuksen osuus kaikista elinkaari- sista kasvihuonekaasupäästöistä oli 10 % ja viemäriverkostossa muodostuvien kasvihuonekaasupäästö- jen osuus 9 %. Kuljetusten rooli arvioitiin kokonaisuudessa vähäiseksi. Se kattoi vain noin 1 % kaikista elinkaarista päästöistä, valtaosan (90 %) allokoituessa lietteen kuljetuksille.

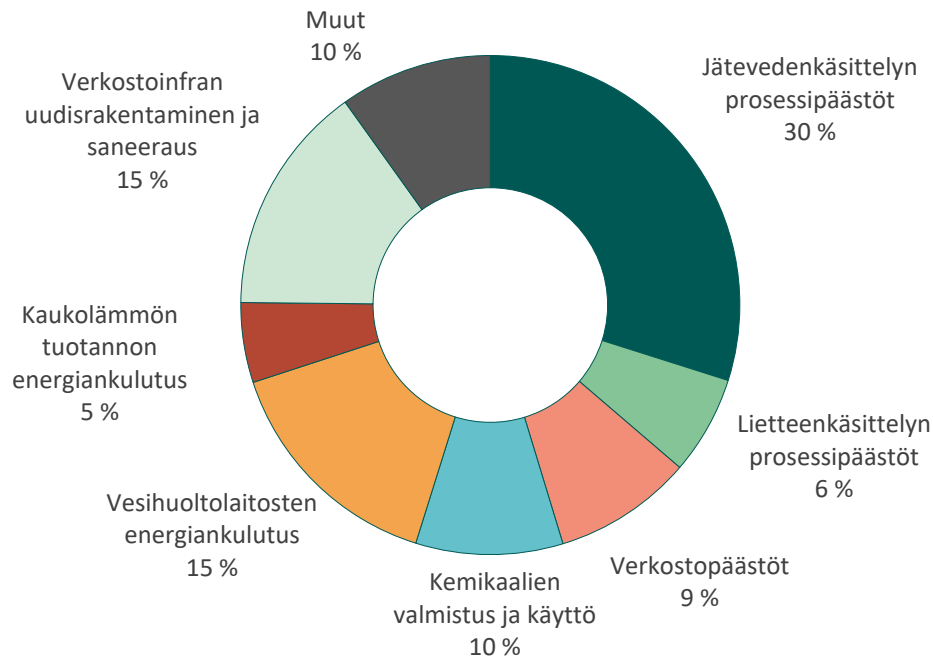
Kaukolämmön ja -kylmän tuotannon energiankulutus kattaa noin 5 % kokonaispäästöistä (kuva 3). Huomioitavaa on, että kaukolämmön ja -kylmän tuotannosta vastaa energiayhtiö, jolloin tuotettu energia ei mene vesihuoltolaitoksen omaan käyttöön. Kaukolämmön ja -kylmän tuotannon substituu- tiot on huomioitu osana vesihuollon päästöjen skenaariotarkasteluja (ks. luvut 4.2.5.2 ja 5.2.5).



Kuva 2. Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) allokoituna vesihuollon eri osa-alueille. Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

Taulukko 17. Päästöjen jakautuminen eri osa-alueiden välille (t CO₂-ekv/vuosi) sekä niiden osuudet kokonaispäästöistä (verkostoinfra huomioiden). Käytön aikainen osuus päästöistä kuvaa päästöjen jakautumista, kun verkostoinfran päästöjä ei huomioida.

Osa-alue	Yhteensä	Minimi	Maksimi	Osuus päästöistä	Käytön aikainen osuus päästöistä
Talousveden tuotanto	80 204	52 729	120 921	10 % (10–12 %)	12 % (11–14 %)
Vedenjakelu	10 358	10 135	10 569	1 % (1–2 %)	2 % (1–2 %)
Jäteveden siirto	96 772	59 854	144 722	12 % (11–14 %)	15 % (13–17 %)
Jätevedenkäsittely	343 945	246 362	400 882	44 % (40–45 %)	52 % (46–53 %)
Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto	40 579	38 615	42 753	5 % (7–4 %)	6 % (5–8 %)
Lietteenkäsittely	94 510	53 885	154 774	12 % (10–15 %)	14 % (12–18 %)
Verkostoinfra	117 157	89 201	133 802	15 % (13–16 %)	
Yhteensä	783 525	550 780	1 008 421	100 %	100 %



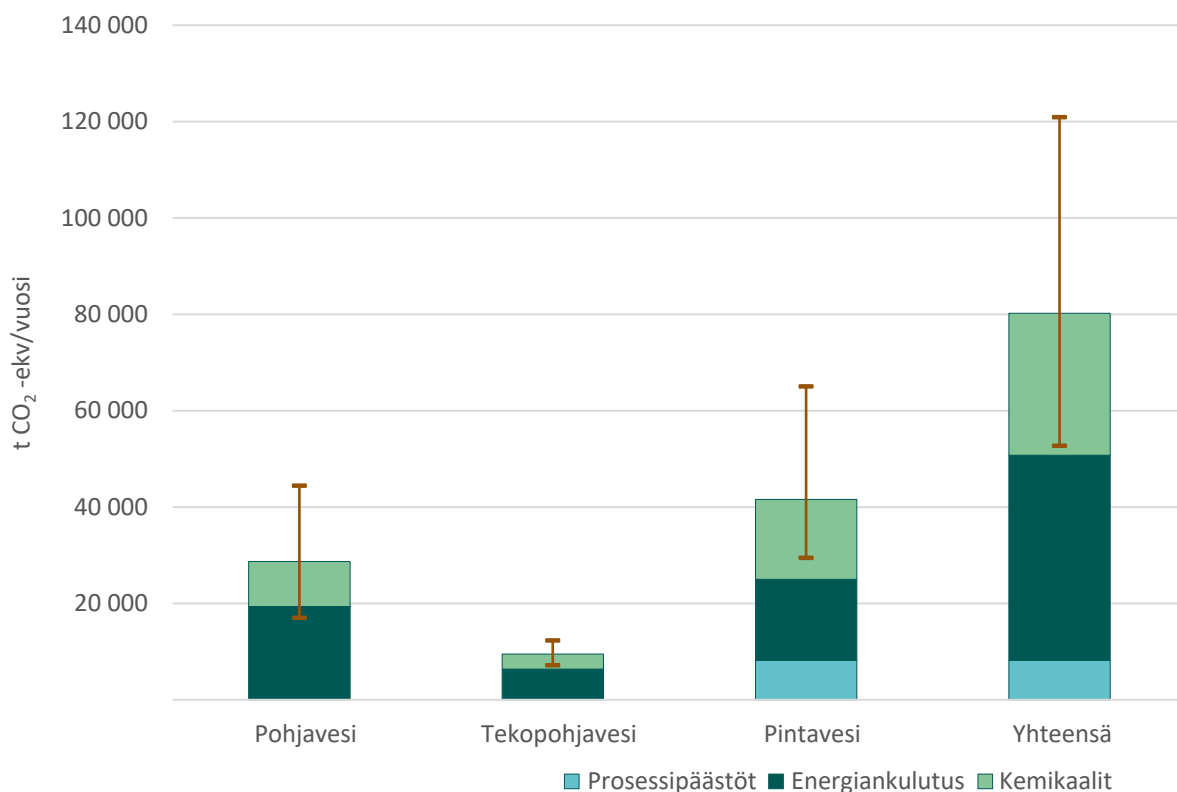
Kuva 3. Vesihuollon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen (783 525 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen päästölähteittäin.

Verkostoinfran osalta elinkaarissa kasvihuonekaasupäästöissä ei lähtökohtaisesti huomioitu saneerattavien ja uudisrakennettavien verkostojen käyttöikä (luku 3.9). Käytännössä käyttöikä voi vaihdella kohteesta riippuen huomattavasti. Jos oletetaan, että saneerattujen ja uudisrakennettujen putkien käyttöikä olisi esimerkiksi 50 vuotta, olisi elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö näin laskettuna vain 2 343 t CO₂-ekv/vuosi. Verkostojen saneerauksen ja uudisrakentamisen osuus elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä olisi näin ollen vain 0,4 %, kun se valitulla lähestymistavalla on 15 %.

5.1.2 Talousveden tuotanto

Talousvedentuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 80 204 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 52 726–120 921 t CO₂-ekv/vuosi) (kuva 4). Noin 52 % päästöistä aiheutui pintavesilaitoksilla, 36 % pohjavesilaitoksilla ja 12 % tekopohjavesilaitoksilla. Valtaosa päästöistä (noin 53 %), aiheutui talousveden tuotannon energiankulutuksesta. Energiankulutuksen päästöt aiheutuivat lähes yksinomaan sähkönkulutuksesta (97 % energiankulutuksen päästöistä). Kemikaalien valmistus ja kuljetus aiheutti noin 37 % päästöistä ja 10 % aiheutui prosessipäästöistä, eli kemikaalien käytöstä aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä.

Suomessa vuonna 2014 verkostoon pumpatun talousveden kokonaismäärä oli 409 739 797 m³, josta pohjavesilaitoksilla tuotettiin 200 289 576 m³, tekopohjavesilaitoksilla 66 675 521 m³ ja pintavesilaitoksilla 142 774 700 m³ (Lapinlampi 2021). Näin ollen talousveden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt verkostoon pumpattua vesikuutiota kohden olivat 0,20 kg CO₂-ekv/m³. Elinkaariset päästöt tuotettua vesikuutiota kohden olivat selvästi suuremmat pintavesilaitoksilla (0,29 kg CO₂-ekv/m³) kuin pohjavesi ja tekopohjavesilaitoksilla (0,14 kg CO₂-ekv/m³) (kuva 5). Tämä johtuu pääasiassa pintavesilaitosten suuremmasta kemikaalikulutuksesta, erityisesti aktiivihiilen, sammutetun kalkin, ferrisulfaatin ja polyalumiinikloridin käytöstä (taulukko 18). Polyalumiinikloridi ja ferrisulfaatti myös vapauttavat hiilidioksidia (prosessipäästöt) reagoidessaan veden karbonaatin kanssa. Liitteessä 1 on taulukoitu eri tuotantomuotojen päästöt (t CO₂-ekv/vuosi ja kg CO₂-ekv/m³) ja niiden jakautuminen eri elinkaarivaiheisiin.



Kuva 4. Talousveden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) tuotantomuodoittain ja eri elinkaarivaiheet huomioiden Suomessa. Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

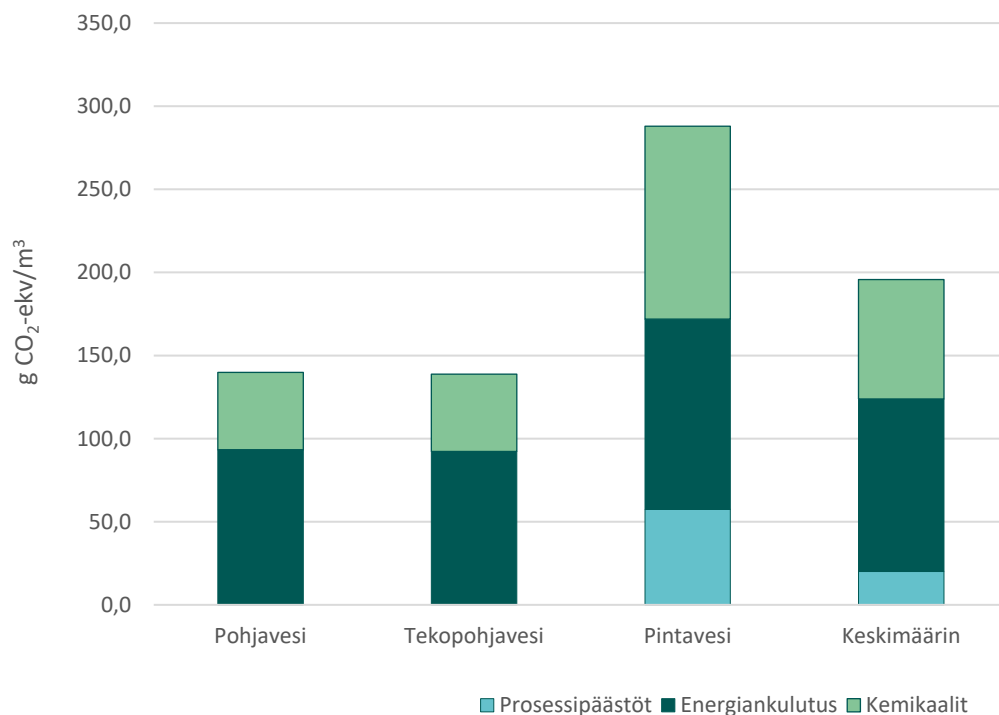
Taulukko 18. Talousveden tuotannossa käytettävien kemikaalien elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) tuotantomuodoittain

Kemikaali	Pohjavesi	Tekopohjavesi	Pintavesi	Yhteensä
Alkalointi	3496	510	4260	8266
Sammutettu kalkki	1420	204	1387	3011
Poltettu kalkki	-	-	806	806
Kalkkikivi	-	-	37	37
Kalkkirouhe	182	5	-	187
Dolomiitti	7	-	-	7
Lipeä	1474	219	287	1980
Sooda	81	-	-	81
Hiilidioksidi	326	80	1715	2121
Rikkihappo	6	2	28	35
Kemiallinen saostus	-	2112	4309	6421
Ferrisulfaatti	-	-	3149	3149
Polyalumiinikloridi	-	2112	1130	3242
Saostuspolymeeri	-	-	29	29
Desinfiointi	569	482	1488	2539
Kloori	5	-	19	24
Natriumhypokloriitti	563	482	933	1979
Happi	-	-	385	385

Kemikaali	Pohjavesi	Tekopohjavesi	Pintavesi	Yhteensä
Ammoniakki	-	-	141	141
Ammoniumkloridi	-	-	10	10
Vetyperoksidi	1	-	-	1
Ammoniumsulfaatti	-	16	-	16
Suodatus	5249	0	6513	11762
Hiekka	47	-	84	130
Aktiivihili (uusi)	153	-	2404	2558
Aktiivihili (regeneroitu)	257	-	4025	2482
Antrasiitti	4792	-	-	4792

Kemikaalikulutuksen elinkaariin kasvihuonekaasupäästöihin liittyy epävarmuuksia kemikaalien käyttömääriin sekä käytettyihin päästökertoimiin koskien. Tutkimuksessa käytetyt kemikaalien kulutusmäärät perustuivat melko vanhaan selvitykseen ja käyttömäärät ovat tämän selvityksen jälkeen todennäköisesti muuttuneet. Myöskään kemikaalien kuljetusmatkoista ei ollut riittävää tietoa, ja työssä käytetyt kuljetusmatkat perustuvat arvioihin. Laskennassa käytettiin pääsääntöisesti päästötietokanta ecoinventistä laskettuja päästökertoimia (ecoinvent 2021). Jatkotutkimuksissa tulisi tarkentaa kemikaalien käyttömääriä, kuljetusmatkoja sekä käytettyjä päästökertoimia.

Tässä tutkimuksessa talousveden tuotantoa tarkasteltiin eri tuotantomuodot huomioiden. Saatavilla olleet lähtötiedot eivät sellaisenaan mahdollistaneet eri laitoskokojen tarkastelua ja vertailua yhdessä eri tuotantomuotojen kanssa. Käytännössä kuitenkin 20 suurinta vesihuoltolaitosta käsittää noin 80 % vedentuotannosta, ja suurimmat talousveden tuotantolaitokset ovat pintavesilaitoksia, jolloin selvästi suurin osuus päästöistä allokoituu näille laitoksille.



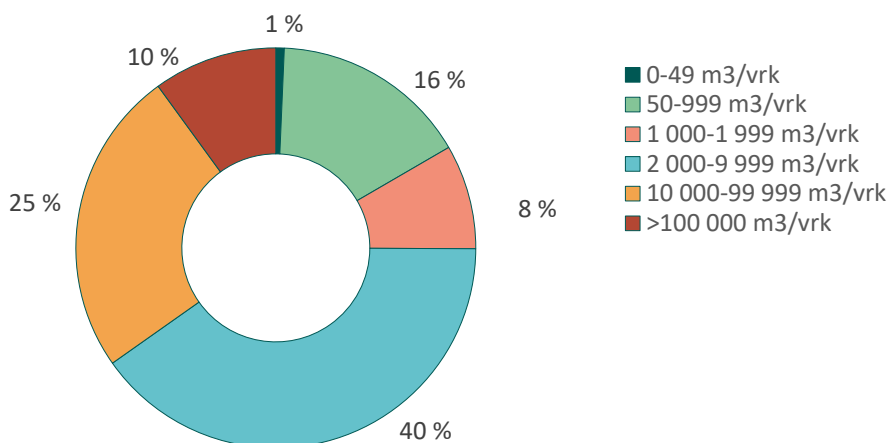
Kuva 5. Talousveden eri tuotantomuotojen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt g CO₂-ekv/m³ tuotettua talousvettä.

5.1.3 Vedenjakelu

Vedenjakelun elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 10 358 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 10 134–10 569 t CO₂-ekv/vuosi). Elinkaariin vedenjakelun päästöihin laskettiin ainoastaan energiankulutus. Valtaosa (99 %) energiankulutuksen päästöistä aiheutui sähkönkulutuksesta ja 1 % lämmönkulutuksesta. Sähkönkulutuksesta suurin osa (40 %) aiheutui 2 000–9 999 m³/vrk virtaaman laitoksilla (kuva 6). Kun otetaan huomioon verkostoon pumpattun talousveden kokonaismäärä (409 739 797 m³), saadaan vedenjakelun elinkaarisesti kasvihuonekaasupäästöksi 0,025 kg CO₂-ekv/m³. Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt verkostoon pumpattua vesikuutiota kohden eri kokoluokan laitoksissa on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (kg CO₂-ekv) eri laitoskokoluokissa (vesihuolto-organisaation koko) verkostoon pumpattua vesikuutiota kohden

Laitoskoko (virtaama m ³ /vrk)	kg CO ₂ -ekv/m ³
100 000	0,011
10 000–99 999	0,017
2 000–9 999	0,044
1 000–1 999	0,035
50–999	0,082
alle 49	0,082



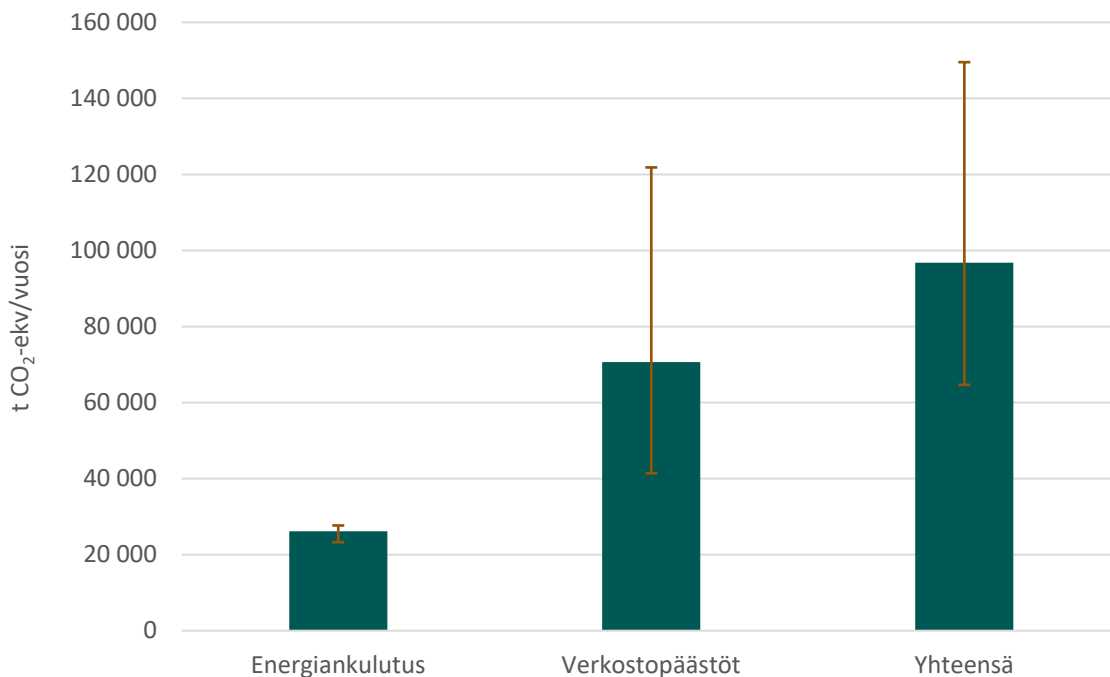
Kuva 6: Vedenjakelun sähkönkulutuksen kasvihuonekaasupäästöjen (yhteensä 10 262 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen laitosten kokoluokan (m³/vrk) mukaan.

Huomattavaa on, että päästöt kuutiota kohti kasvavat pienempään kokoluokkaan mentäessä (pieni poikkeama kokoluokassa 1 000–1 999 m³/vrk). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, harvaan asutuilla alueilla verkostokilometrejä per tuotettu vesikuutio on enemmän, jolloin pumppaukseen kuluu enemmän energiaa ja sähkönkulutus kuutiota kohden on siten suurempi. Suuremmilla laitoksilla on myös paremmin resursseja panostaa pumppauksen energiatehokkuuteen ja käytön optimointiin. Suurilla (> 10 000 m³/vrk) laitoksilla tuotetaan noin 65 % Suomen talousvedestä, mutta vedenjakelun sähkönkulutuksen kokonaispäästöistä vain 35 % muodostuu näillä laitoksilla.

5.1.4 Jäteveden siirto

Jäteveden siirron elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 96 772 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 59 856–144 722 t CO₂-ekv/vuosi) (kuva 7). Päästöistä valtaosa (73 %) aiheutui verkostossa muodostuvista suorista päästöistä (metaani ja typpioksiduuli). Energiankulutuksen päästöt aiheutuivat lähes yksinomaan sähkönkulutuksesta (99 %). Liitteessä 1 on taulukoitu päästöt (t CO₂-ekv/vuosi) ja niiden jakautuminen eri elinkaarivaiheisiin.

Verkostopäästöistä 93 % allokoitui jätevedestä muodostuville metaanipäästöille. Metaanipäästöjen arviointiin liittyy kuitenkin huomattavia epävarmuuksia, sillä Suomen olosuhteista ei ollut mittaustuloksia saatavilla tutkimusta tehdessä ja käytetty arvio vaihteluvälineen perustui ulkomaisiin tutkimuksiin. Metaanipotentiaali on suurimmillaan jätebiomassoissa heti niiden muodostumisen jälkeen ja Suomessa etäisyydet ovat pitkiä ja alueelliset erot viipymässä voivat olla merkittäviä. Viemäriverkostossa lämpötila säilyy melko tasaisena ympäri vuoden, jolloin metaanipäästöjä muodostuu ympäri vuoden kylmästä ilmastosta huolimatta. Tarkempien päästöarvioiden tuottamisen tueksi tulisivat tehdä mittauksia myös pohjoismaisissa olosuhteissa.



Kuva 7. Jäteveden siirron elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt t CO₂-ekv/vuosi. Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

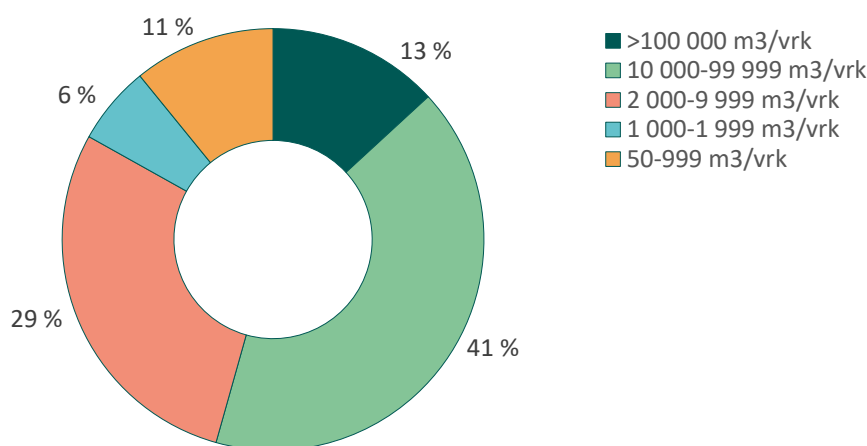
Kun huomioidaan jäteveden siirron kokonaisjätevesimäärä (vuotovedet mukaan lukien), on elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö jätevesikuutiota kohden 0,2 kg CO₂-ekv/m³ (0,1–0,3 kg CO₂-ekv/m³). Energiankulutuksen päästö jätevesikuutiota kohden on 0,054 kg CO₂-ekv/m³. Taulukossa 20 ja kuvassa 8 on esitetty energiankulutuksen päästöt kokoluokittain. Vastaavasti kuin vedenjakelussa (luku 5.1.3), sähkönkulutus ja näin ollen myös päästöt jätevesikuutiota kohden kasvavat pienempään kokoluokkaan mentäessä. Suurilla (> 10 000 m³/vrk) laitoksilla käsitellään noin 73 % jätevesistä ja jäteveden siirron energiankulutuksen kokonaispäästöt ovat 54 %.

Jäteveden siirron energiankulutuksen päästöt (0,054 kg CO₂-ekv/m³) ovat noin kaksinkertaiset verrattuna vedenjakelun päästöihin (0,025 kg CO₂-ekv/m³) vesikuutiota kohden. Jätevettä kerätään ja pumpataan enemmän kuin talousvettä: jätevettä välivarastoidaan ja pumpataan useammalla

jätevedenpumppaamalla, kun taas vesijohtoverkostossa paine korotetaan jakelualueella lähtökohtaisesti kerran tai kaksi. Kiintoaineiden vuoksi jätevesi on myös raskaampaa pumpattavaa kuin talousvesi (Paukkunen 2023). Lisäksi eroa talousveden jakelun ja jäteveden siirron kokonaisenergiankulutuksen välillä selittää, että jätevettä on määrällisesti talousvettä enemmän suuremman vuotovesien määrän vuoksi: vuonna 2014 vuotovesien määrä talousvesiverkostosta oli noin 60 Mm³ ja jätevesiverkoston päätyvä hulevesimäärä noin 190 Mm³ (Lapinlampi 2021).

Taulukko 20. Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (kg CO₂-ekv) eri laitostokoluokissa (vesihuolto-organisaation koko) siirrettyä jätevesikuutiota kohden

Laitoskoko (virtaama m ³ /vrk)	kg CO ₂ -ekv/m ³
100 000	0,09
10 000–99 999	0,19
2 000–9 999	0,31
1 000–1 999	0,291
alle 1000	0,486



Kuva 8. Jäteveden siirron sähkönkulutuksen kasvihuonekaasupäästöjen (yhteensä 26 016 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen laitosten kokoluokan (m³/vrk) mukaan.

5.1.5 Jätevedenkäsittely

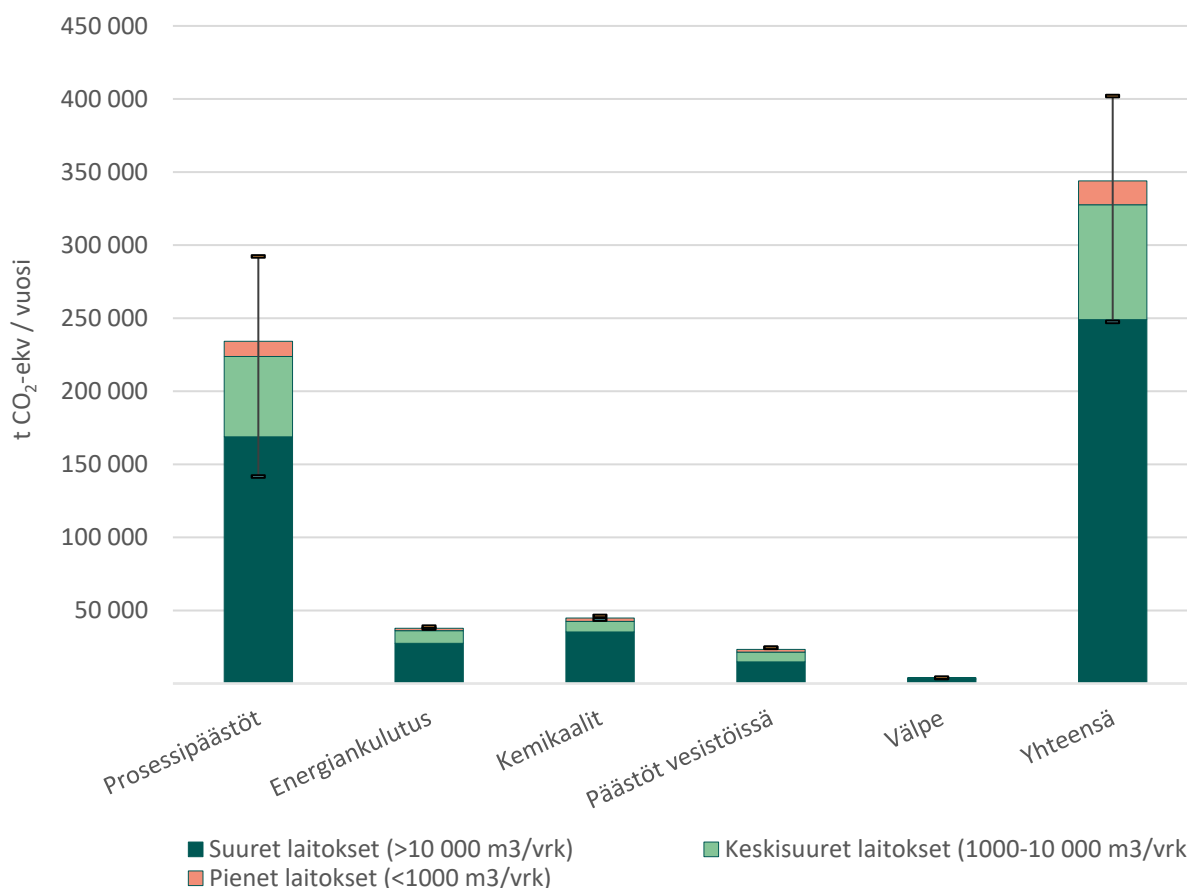
Jätevedenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 343 945 t CO₂-ekv/vuosi (246 362–400 882 t CO₂-ekv/vuosi) (kuva 9). Valtaosa (60 %) päästöistä aiheutui jätevedenkäsittelyssä muodostuvista typpioksiduulipäästöistä (prosessipäästöt). Typpioksiduuli ja metaani yhteensä aiheuttivat 68 % jätevedenkäsittelyn elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä. Jätevedenkäsittelyn prosessipäästöt kattoivat tässä tutkimuksessa lasketuista, kaikista Suomen vesihuollon elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä 30 %, tehden niistä suurimman yksittäisen päästölähteen vesihuollossa.

Jäteveden- ja lietteenkäsittelyä tarkastellaan monissa tutkimuksissa kokonaisuutena. Esimerkiksi kuuden yksittäisen pohjoismaisen jätevedenpuhdistamon tarkastelussa prosessipäästöjen osuus jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn kokonaispäästöistä vaihteli välillä 46–81 % (Mölsä 2019; Awaitey 2020; Lehtoranta ym. 2022b). Tässä työssä jätevedenkäsittelyn prosessipäästöt vastasivat 53 % jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn yhteenlasketuista päästöistä.

Prosessipäästöissä esiintyvä vaihteluväli aiheutui käytettyjen päästökertoimien vaihteluvälistä. Eri-tyisesti typpioksiduulipäästöjen määrittämiseen liittyy epävarmuuksia tutkimustiedon puutteen takia ja tulokset ovat erityisen herkkiä käytettävälle typpioksiduulin päästökertoimelle. Tässä työssä käytetty päästökerroin oli 1,57 % N₂O-N/tuleva typpikuorma (vaihteluväli 1,2–1,9 %). Käytetyssä päästökertoimessa huomioitiin kirjallisuudesta löytyvät pitkän aikavälin jatkuvatoimisiin mittauksiin perustuvat päästökertoimet (ks. luku 3.6.2). Lyhyen aikavälin ja jaksottaisiin mittauksiin perustuvat päästökertoimet jätettiin tarkastelusta pois niihin liittyvien epävarmuuksien vuoksi (Vasilaki ym. 2019).

Kemikaalien käytölle allokoitui noin 13 % jätevedenkäsittelyn päästöistä ja energiankulutukselle 11 %. Purkuvedestä muodostuu vesistöissä typpioksiduulipäästöjä ja niiden osuus jäteveden käsittelyn päästöistä oli 7 %. Välkkeen käsittelyn osuus oli 1 %. Suurten laitosten tuottamien päästöjen osuus kaikista jätevedenkäsittelyn elinkaarisista kasvihuonekaasupäästöistä oli 72 %, keski suurten laitosten 23 % ja pienten 5 %. Liitteessä 1 on taulukoitu päästöt (t CO₂-ekv/vuosi) ja niiden jakautuminen eri elinkaarivaiheisiin.

Käsiteltyä jätevesikuutiota kohden laskettuna elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 0,71 kg CO₂-ekv/m³ (vaihteluväli 0,51–0,83 kg CO₂-ekv/m³). Pienillä laitoksilla elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat keskimäärin hiukan korkeammat (0,76 kg CO₂-ekv/m³) kuin suurilla (0,70 kg CO₂-ekv/m³) ja keski suurilla laitoksilla (0,71 kg CO₂-ekv/m³). Mittakaavaetu ei jätevedenkäsittelyn päästöjen osalta tule esille, sillä se toteutuu lähinnä energiankulutuksessa (ks. luku 3.6.3, taulukko 7) ja jossain määrin kemikaalinkulutuksessa (ks. luku 3.6.4), joiden osuus kokonaispäästöistä on pieni.



Kuva 9. Jätevedenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) laituskoot huomioiden. Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

Kemikaalien kulutuksen päästöjen muodostuminen ja jakautuminen eri laitostyöluokille on esitetty taulukossa 21. Jätevedenkäsittelyn kemikaalikulutuksen päästöt sisältävät myös lietteenkäsittelyn kemikaalikulutusta, koska käytetyissä lähtötiedoissa ei kaikkia kemikaalikulutustietoja voitu erottaa jätevedenkäsittelylle ja lietteenkäsittelylle erikseen. Kemikaalien kulutuksen suurin päästövaikutus aiheutui sammutetun kalkin käytöstä (24,7 %). Suurille laitoksille allokoitui kemikaalikulutuksesta 79 %, keskisuurille 16 % ja pienille laitoksille 5 %. Kemikaalien tuotannon päästökertoimet voivat myös vaihdella, mitä ei tässä tutkimuksessa huomioitu. Kemikaalien kuljetuksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat yhteensä 1 550 t CO₂-ekv/vuosi. Niiden osuus kuvassa 9 esitetyistä kemikaalien elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä (yhteensä 44 756 t CO₂-ekv/vuosi) on pieni, noin 3,6 %. Tulee ottaa kuitenkin huomioon, että työssä kuljetusmatkat perustuvat arvioon. Valtakunnallista tietoa kemikaalien kuljetusmatkoista- ja tavoista tulee täsmentää tarkempien päästöarvioiden tekemiseksi.

Taulukko 21. Kemikaalikulutuksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) puhdistamoiden kokoluokat huomioiden sekä eri kemikaalien osuus kemikaalien kokonaispäästöistä

Kemikaali	Suuret puhdistamot	Keskisuuret puhdistamot	Pienet puhdistamot	Yhteensä	Osuus päästöistä
Ferrosulfaatti	3 413	1 138	583	5 134	11,9 %
Ferrisulfaatti	6 358	1 307	193	7 857	18,2 %
Alumiinisulfaatti	211	946	465	1 622	3,8
PAC	3 943	1 126	-	5 070	11,7 %
Kalkki (sammutettu)	9 496	437	750	10 684	24,7 %
Karbonaatti	740	-	-	740	1,7 %
Sooda	1 663	96	-	1 759	4,1 %
Lipeä	135	1 228	-	1 363	3,2 %
Metanoli	4 132	282	-	4 414	10,2 %
Rikkihappo	98	11	-	109	0,3 %
Polymeeri	2 964	447	180	3 592	8,3 %
Modifioitu tärkkelys	51	-	-	51	0,1 %
Aktiivihili	78	-	-	78	0,2 %
Muurahaishappo	21	-	-	21	0,0 %
Glyseroli	649	-	-	649	1,5 %
Natriumhypokloriitti	13	-	-	13	0,0 %
Polyamiini	51	-	-	51	0,1 %
Yhteensä	34 017	7 018	2 171	43 206	100 %

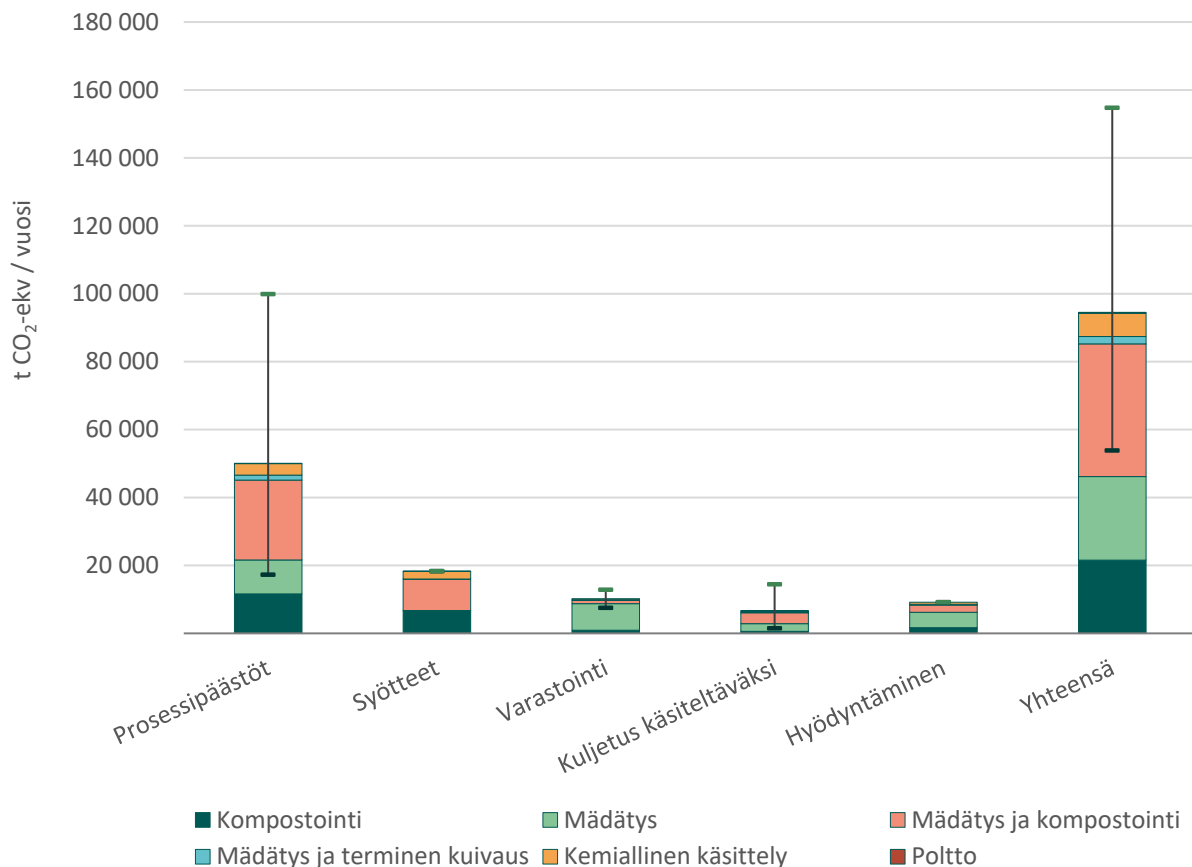
5.1.6 Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto

Puhdistetusta jätevedestä tuotetun kaukolämmön- ja kylmän tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 40 579 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 38 615–42 753 kg CO₂-ekv/vuosi). Päästöt aiheutuivat yksinomaan lämpöpumppujen sähkönkulutuksesta. Kaukolämpöä tuotettiin 782 400 MWh, joten päästö tuotettua energiayksikköä kohden oli 0,05 kg CO₂-ekv/kWh. Tuotettu kaukolämpö- ja kylmä ohjataan kaukolämpöverkkoon, joka vähentää kaukolämmön tuottamisen tarvetta muilla keinoin.

Kaukolämmön ja -kylmän substituutiovaikutuksia nykytilassa tarkasteltiin päästövähennysskenaarioiden yhteydessä (ks. luku 5.2.5). Tuotetun kaukolämmön- ja kylmän lisäksi lämpöä otettiin jätevedenpuhdistamoilla talteen mm. jätevedestä ja tilojen poistoilmasta, mikä vähensi laitosten omaa ulkoista lämpöenergiatarvetta.

5.1.7 Lietteenkäsittely

Lietteenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 94 510 t CO₂-ekv/vuosi (vaihteluväli 53 885–154 774 t CO₂-ekv/vuosi). Prosessipäästöjen osuus kaikista elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä oli 53 %, käsittelyyn käytettyjen syötteiden (kompostoinnin tukiaineet, kemikaalit, ostettu sähkö) 19 %, varastoinnin 11 %, käsittelyyn kuljetuksen 7 % ja hyödyntämisen 10 % (kuva 10). Liitteessä 1 on taulukoitu päästöt (t CO₂-ekv/vuosi) ja niiden jakautuminen eri elinkaarivaiheisiin.



Kuva 10. Lietteenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) elinkaarivaiheittain ja käsittelytavoittain. Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

Prosessipäästöt koostuivat käsittelyn aikana muodostuvista kasvihuonekaasupäästöistä (kuvat 10 ja 11). Niissä esiintyvä suuri vaihteluväli kuvaa laskennassa käytettyjen parametrien epävarmuutta (luku 3.8). Käytännössä prosessoinnista aiheutuvat kasvihuonekaasut vaihtelevat prosessin operointikäytännöistä ja olosuhteista johtuen. Esimerkiksi erityisesti kompostoinnin prosessipäästöt ovat riippuvaisia käytetystä kompostointimenetelmästä, vuodenajasta, kompostointiajasta ja seosaineista. Lietteen

mädätyksen päästöihin vaikuttaa mm. mahdollinen esivarastointi ja kuljetus, prosessin viipymä ja mahdolliset metaanivuodot prosessista (Luostarinen ym. 2023). Lisää epävarmuutta lietteenkäsittelyn tuloksiin laskennan taustalla aiheuttavat erityisesti puutteelliset lietemäärien, ominaisuuksien ja käsittelytapojen tilastointitiedot. Tilastointitiedon tarkentaminen on ensisijaisen tärkeää tulosten tarkentamisen kannalta tulevaisuudessa.

Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat suurimmat lietteen kemiallisella käsittelyllä (887 kg CO₂-ekv/t TS) ja kompostoinnilla (821 kg CO₂-ekv/t TS). Kemiallisesti käsitelty liete kompostoidaan käsittelyn jälkeen, mutta tutkimustietoa kemiallisen käsittelyn vaikutuksista kompostoinnin ilmapäästöihin ei ollut saatavilla ja näin ollen kemiallisen käsittelyn prosessipäästöihin liittyy epävarmuutta. Kompostoinnin aikana lietteestä muodostuu metaania sekä typpioksiduulia. Niiden muodostuminen on riippuvaista prosessin toimivuudesta sekä lietteen laadusta. Kompostoinnin syötteet sisältävät seosaineena käytetyn turpeen, jonka käytön elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt vastaavat 91 % kompostoinnin syötteiden päästöistä. Kompostoinnissa suurin osa lietteessä olevasta liukoisesta tyypestä haihtuu. Kokonaistyypestä kuitenkin muodostuu typpioksiduulipäästöjä hyödyntämisvaiheessa.

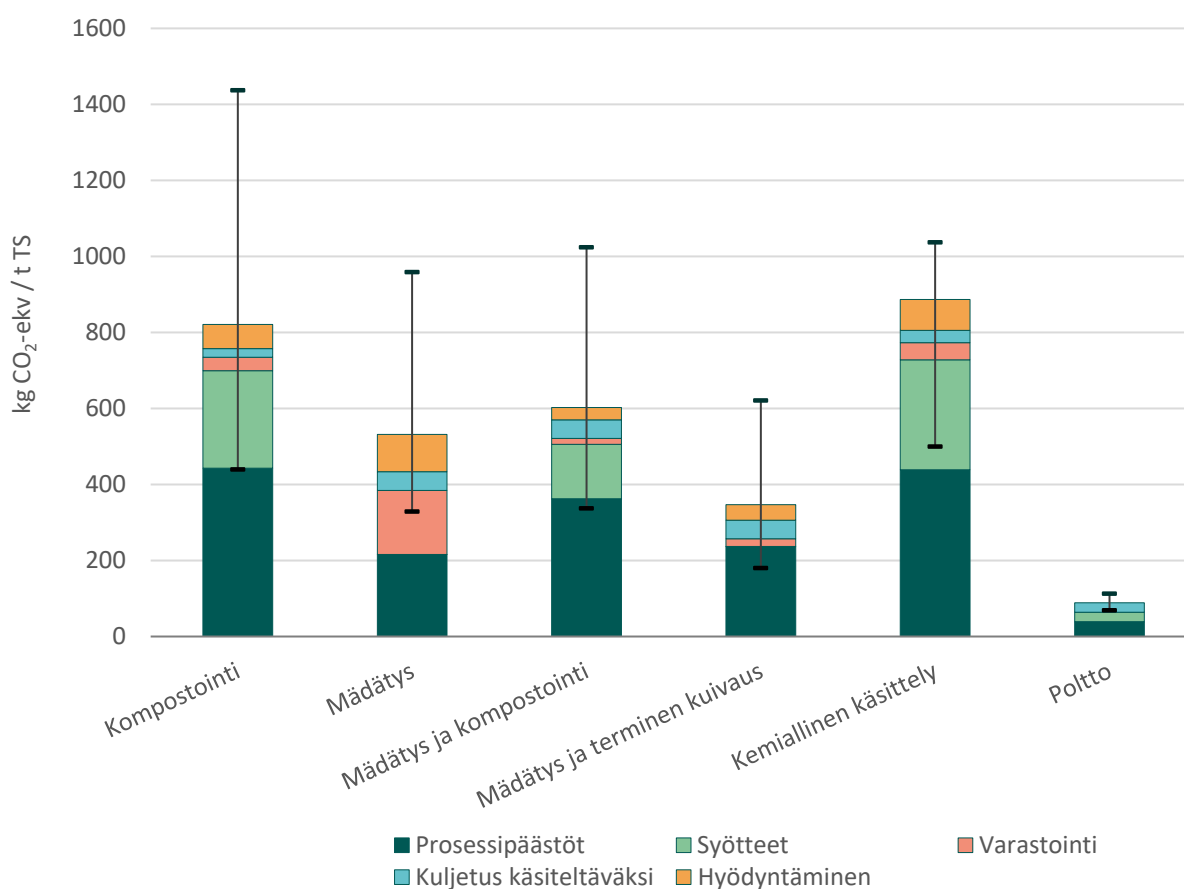
Mädätyksen elinkaariset päästöt olivat 532 kg CO₂-ekv/t TS. Mädätyksessä käytettävän sähkön ja lämmön oletettiin olevan mädätyksessä tuotettua biokaasua. Mädätyksessä huomattava päästöriski on mädätteen varastoinnissa sekä sähkön ja lämmön tuotannon CHP-yksikössä tapahtuvat hävikit (Liebetrau ym. 2013; Reinelt ym. 2017; Fredenslund ym. 2018; Vergote ym. 2020; Reinelt ym. 2022). CHP-yksiköstä muodostuvat päästöt sekä laitoksen metaanivuodot on esitetty kuvissa 10 ja 11 kohdassa prosessipäästöt. Mädätteen hyödyntämisessä muodostuu myös muita käsittelymenetelmiä enemmän typpioksiduulipäästöjä, sillä mädätteessä on eniten tyypeä jäljellä. Varastoinnista aiheutuvat päästöt ovat riippuvaisia lietteen viipymäajasta reaktorissa sekä siitä, miten liete prosessoidaan mädätyksen jälkeen ennen varastointia (Luostarinen ym. 2023). Biokaasutuotannon kasvihuonekaasupäästöjen on viimeaikaisessa tieteellisessä tutkimuksessa todettu olevan huomattavasti suurempia kuin on aiemmin arvioitu (Scheutz & Fredenslund 2019; Bakkaloglu ym. 2021; Reinelt ym. 2022). Erityisesti lietteenkäsittelyn kannalta huomionarvoista on, että jätevesilietteen mädätyksen metaanipäästöt on havaittu olevan keskimäärin suurempia (n. 7,5 % laitoksen tuottamasta metaanista) kuin maatalouden sivuvirtoja mädättävien laitosten (n. 2,4 % tuotetusta metaania) (Scheutz & Fredenslund 2019).

Mädätyksen ja kompostoinnin elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 602 kg CO₂-ekv/t TS, eli hieman korkeammat kuin pelkästään mädätyksen. Mädätteen kompostoinnissa päästöjä muodostuu vähemmän mädätykseen menevää kuiva-ainetta kohden, sillä mädätyksessä osa biomassasta hajoaa biokaasuksi. Jos mädätyksessä on riittävän pitkä viipymäaika, ei mädätteen kompostoinnin aikana tulisi muodostua vastaavaa määrää metaanipäästöjä, kuin mädättämättömän lietteen kompostoinnissa. Tullee kuitenkin ottaa huomioon, että tässä työssä käytetyt päästökertoimet kompostoinnille eivät tee eroa mädätteen ja lietteen kompostoinnille. Käytännössä mädätteen erilainen pH ja liukoisen tyyppien korkeampi pitoisuus jätevesilietteeseen nähden vaikuttavat erityisesti suorien sekä sekundääristen typpioksiduulipäästöjen muodostumiseen. Tätä vaikutusta ei ole huomioitu puutteellisen tutkimustiedon vuoksi.

Lietteen termisen kuivauksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 347 kg CO₂-ekv/t TS. Lietteen termisen kuivauksen energian oletettiin olevan mädätyksellä tuotettua, joten ulkopuolelta hankittavaa energiaa ei huomioitu termisen kuivauksen syötteenä. Termiseen kuivaukseen kuluva mädätyksellä tuotettu energia huomioidiin Suomen vesihuoltoa koskevassa energiataseessa (luku 5.1.8) ja siten myös vältettyjen päästöjen laskemisessa (luvut 4.5 ja 5.2). Vähiten elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä aiheutui lietteen poltossa (89 kg CO₂-ekv/t TS), mutta lähtötiedot sen osalta olivat puutteelliset (luku 3.8.6). Polton yhteydessä ei huomioidu savukaasujen käsittelyä. Laskentarajauksen takia myöskään menetettyä orgaanista ainesta ei sisällytetty tarkasteluun (luku 2). Vaikka vaihteluväliä ei

polton yhteydessä tarkasteltu, polton päästöjen määrittämiseen liittyy huomattavia epävarmuuksia. Käytännössä kuitenkin polton osuus lietteenkäsittelyssä on hyvin pieni. Mikäli polton osuutta lietteenkäsittelyssä harkitaan tulevaisuudessa lisättävän, tarvitaan elinkaarisista ilmastovaikutuksista lisää tutkimustietoa.

Kuiva-ainetta kohden lasketuissa päästökertoimissa (kuva 11) tulee ottaa huomioon, että ne kuvaavat Suomen tilannetta, eivätkä siten ole sovellettavissa suoraan sellaisenaan laitostasolle. Esimerkiksi lietteen termisen kuivauksen sekä mädätyksen energia oletettiin olevan peräisin mädätyksestä. Joissakin tapauksissa terminen kuivaus ei kuitenkaan tapahdu mädättämöllä tai mädätyksen energia hyödynnetään puhdistamalla, eikä termisessä kuivauksessa. Näin ollen päästökertoimia ei tule sellaisenaan soveltaa laitospäätöksiin tarkasteluun.



Kuva 11. Eri lietteenkäsittelymenetelmien elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt lietteen kuiva-ainetta kohden (kg CO₂-ekv/TS). Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

Työssä ei arvioitu erilaisten lietteenkäsittelymenetelmien vaikutuksia hiilen pysyvyyteen ja siitä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat lopputuotteen mukana jatkohyödyntämiseen päätyvään hiilen määrään. Lietteen poltossa orgaaninen jae menetetään kokonaan, kun taas mädätyksessä osa orgaanisesta aineesta muuntuu biokaasuksi. Jatkotutkimuksissa tulisi hiilen pysyvyyden arviointi sisällyttää lietteenkäsittelyn ilmastovaikutusten arviointiin.

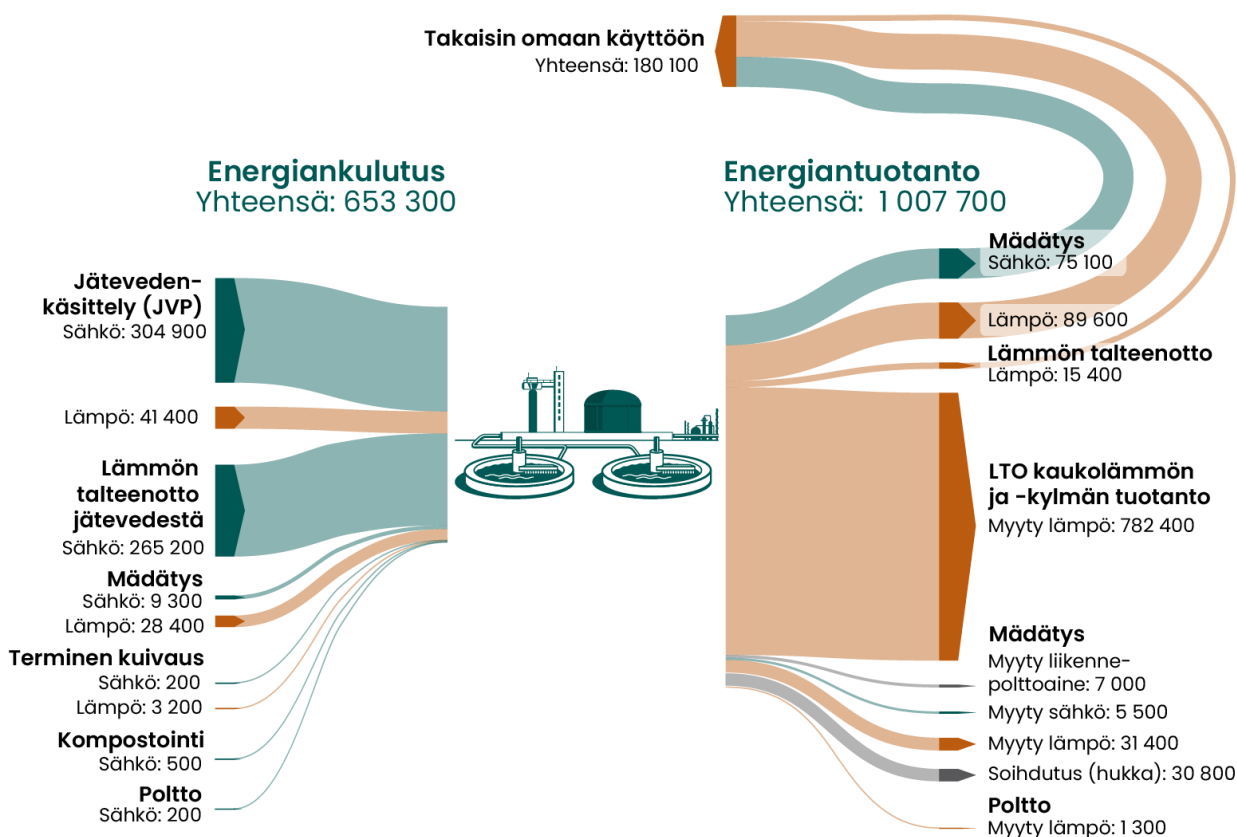
Kaikkiin tarkasteltuihin lietteenkäsittelymenetelmiin liittyy epävarmuuksia, eikä laskennan tuloksia tule soveltaa suoraan laitospäätöksiin tarkasteluihin. Lietteen ominaisuustiedot, käsittelyketju ja prosessit vaihtelevat käytännössä suuresti, joten päästöjen arviointi tulee tehdä laitostasolla aina

tapauskohteisesti. Lietteenkäsittelyssä muodostuvaa energiaa ja käsittelymenetelmien vaikutuksia hyödynnettäviin ravinteisiin on tarkasteltu skenaarioiden yhteydessä luvussa 5.2.

5.1.8 Jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn energiatase

Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen laskennan tueksi tehtiin jätevedenkäsittelylle ja lietteenkäsittelylle yhteinen energiatase, joka sisältää myös kaukolämmön ja -kylmän tuotannon jätevedestä. Energiatase on esitetty kuvassa 12.

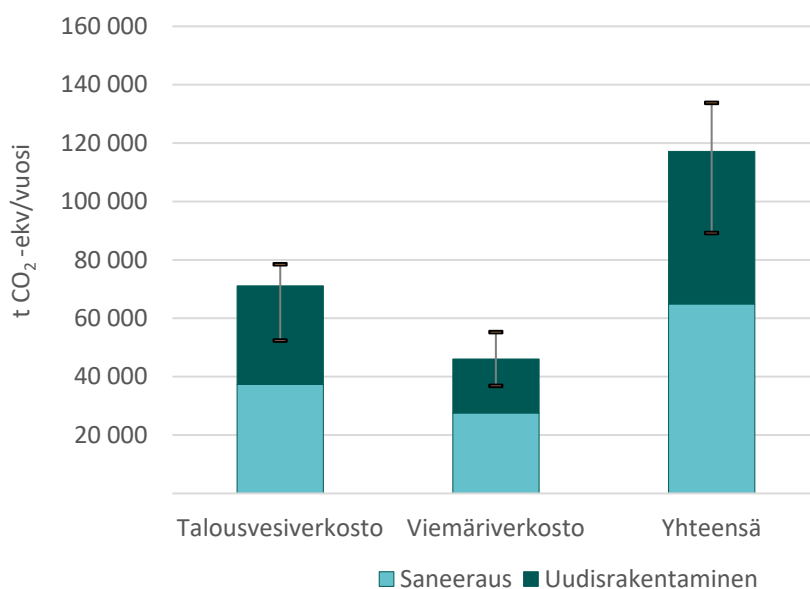
Jätevedenkäsittelyssä kuluu paljon sähköä ja sitä tuotetaan jätevedenkäsittelyn tarpeisiin jonkin verran mädätyksen yhteydessä. Lämpöä tuotetaan myös mädätyksen yhteydessä sekä jätevedestä ja muista toiminnoista talteen otetusta hukkalämmöstä. Moni puhdistamo onkin lämmön suhteen oma-varainen. Lisäksi käsitellyn jäteveden hukkalämpöä hyödynnetään merkittävässä määrin kaukolämmön ja -kylmän tuotannossa. Kuvassa 12 lämmön talteenotto jätevedestä (energiansäilytys) sekä LTO kaukolämmön ja -kylmän tuotanto (energiantuotanto) ovat kokonaan energiayhtiöiden piirissä tapahtuvaa energiansäilytystä ja -tuotantoa. Ne eivät siis suoraan kuulu vesihuoltolaitoksille. EU:n yhdyskuntajätevesidirektiivin uudistuksen yhteydessä on esitetty tavoite energianeutraalista jätevedenkäsittelystä vuoteen 2040 mennessä (European Commission 2022). Tavoite koskee yli 10 000 AVL laitoksia, joita Suomessa on 26 kappaletta ja joilla käsitellään noin 73 % kaikista jätevesistä. Tässä energiataseessa on huomioitu myös keskisuuret ja pienet puhdistamot. Mikäli energianeutraalisuuden tarkasteluun sisällytetään jätevedestä tuotettu kaukolämpö, on energiataseen mukaan Suomen osalta tavoite jo saavutettu.



Kuva 12. Suomen jäteveden- ja lietteenkäsittelyn energiatase (MWh/vuosi).

5.1.9 Verkostojen saneeraus ja uudisrakentaminen

Talousvesi- ja viemäriverkostojen saneerauksen ja uudisrakentamisen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 117 157 t CO₂-ekv/vuosi (89 201–133 802 t CO₂-ekv/vuosi) (kuva 13). Talousvesiverkoston osuus elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä oli 61 % ja viemäriverkoston 39 %. Saneeraus kattoi suuremman osan päästöistä kuin uudisrakentaminen: talousvesiverkostossa saneeraus kattoi noin 52 % päästöistä, viemäriverkostossa vastaava osuus oli noin 60 %. Talousvesiverkoston saneerauksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 64 kg CO₂-ekv/m ja uudisrakentamisen 127 kg CO₂-ekv/m. Viemäriverkoston saneerauksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 108 kg CO₂-ekv/m ja uudisrakentamisen 67 kg CO₂-ekv/m. Tuloksiin vaikuttaa keskeisesti oletettu putkimateriaali- ja kokojakauma, joka tässä tutkimuksessa perustui hyvin rajalliseen aineistoon.



Kuva 13: Verkostojen saneerauksen ja uudisrakentamisen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi). Minimi ja maksimi kuvaa tuloksissa esiintyvää vaihteluväliä.

Talousvesiverkoston saneerauksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 64 kg CO₂-ekv/m ja uudisrakentamisen 127 kg CO₂-ekv/m. Putkistojen saneerauksessa 40 % sujutettiin, mutta sujutuksen osuus saneerauksen päästöistä oli vain 15 %. Aukikaivuun elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat putkimateriaali- ja kokojakauma huomioiden suuremmat (91 kg CO₂-ekv/m) kuin sujutuksella (24 kg CO₂-ekv/m). Saneerauksessa muoviputkien osuus aukikaivuun päästöistä oli 35 %, teräsputkien 32 % ja valurautaputkien 33 %, kun huomioidaan kullakin materiaalilla saneeratut matkat ja putkikokojen jakauma eri materiaaleilla. Muoviputkien elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt kokojakauma huomioiden oli 44 kg CO₂-ekv/m, teräsputkien 875 kg CO₂-ekv/m ja valurautaputkien 154 kg CO₂-ekv/m. Teräsputkia oletettiin käytettävän vain halkaisijaltaan 800–1 000 mm koossa, joka osaltaan selittää eroa eri putkimateriaalien kasvihuonekaasupäästöissä. Talousvesiverkoston uudisrakentamisessa teräsputkien elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen osuus oli 4 %, valurautaputkien 76 % ja muoviputkien 23 %. Teräsputkien elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö oli kokojakauma huomioiden 519 kg CO₂-ekv/m, muoviputkien 79 kg CO₂-ekv/m ja valurautaputkien 155 kg CO₂-ekv/m.

Viemäriverkoston saneerauksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat 108 kg CO₂-ekv/m ja uudisrakentamisen 67 kg CO₂-ekv/m. Kun putkistojen saneerauksessa 60 % sujutettiin, sujutuksen osuus

saneerauksen päästöistä oli 66 %. Aukikaivuun elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä 68 % allokoitui muoviputkille ja 32 % betoniputkille. Aukikaivuun elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt olivat putkimateriaali- ja kokojakauma huomioiden pienemmät (61 kg CO₂-ekv/m) kuin sujutuksella 118 kg CO₂-ekv/m). Sujutuksessa putkikokojakauma painottui suuriin putkiin verrattuna muihin putkimateriaaleihin, joka selittää sujutuksen korkeaa elinkaarista kasvihuonekaasupäästöä. Saneerauksessa muoviputkien elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö oli kokojakauma ja asennustapa huomioiden 54 kg CO₂-ekv/m ja betoniputkien 83 kg CO₂-ekv/m. Viemäriverkoston uudisrakentamisessa muoviputkien elinkaarinen kasvihuonekaasupäästö kokojakauma huomioiden oli 65 kg CO₂-ekv/m ja betoniputkien 81 kg CO₂-ekv/m. Viemäriverkoston uudisrakentamisessa muoviputkien osuus elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä oli 85 % ja betoniputkien 15 %. Muoviputkien elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt kokojakauma huomioiden oli 65 kg CO₂-ekv/m ja betoniputkien 81 kg CO₂-ekv/m.

Sekä talousvesi- että viemäriverkoston saneerauksen ja uudisrakentamisen tuloksiin vaikuttaa keskeisesti oletettu putkimateriaali- ja kokojakauma sekä asennustapa, jotka tässä tutkimuksessa perustuivat hyvin rajalliseen aineistoon. Näiden lisäksi eri kokoisten putkien asentamisen päästöihin liittyy myös epävarmuuksia ja tietopuutteita, jotka tulee ottaa huomioon tulosten tulkinnessa ja hyödyntämisessä.

5.2 Päästövähennysskenaariot

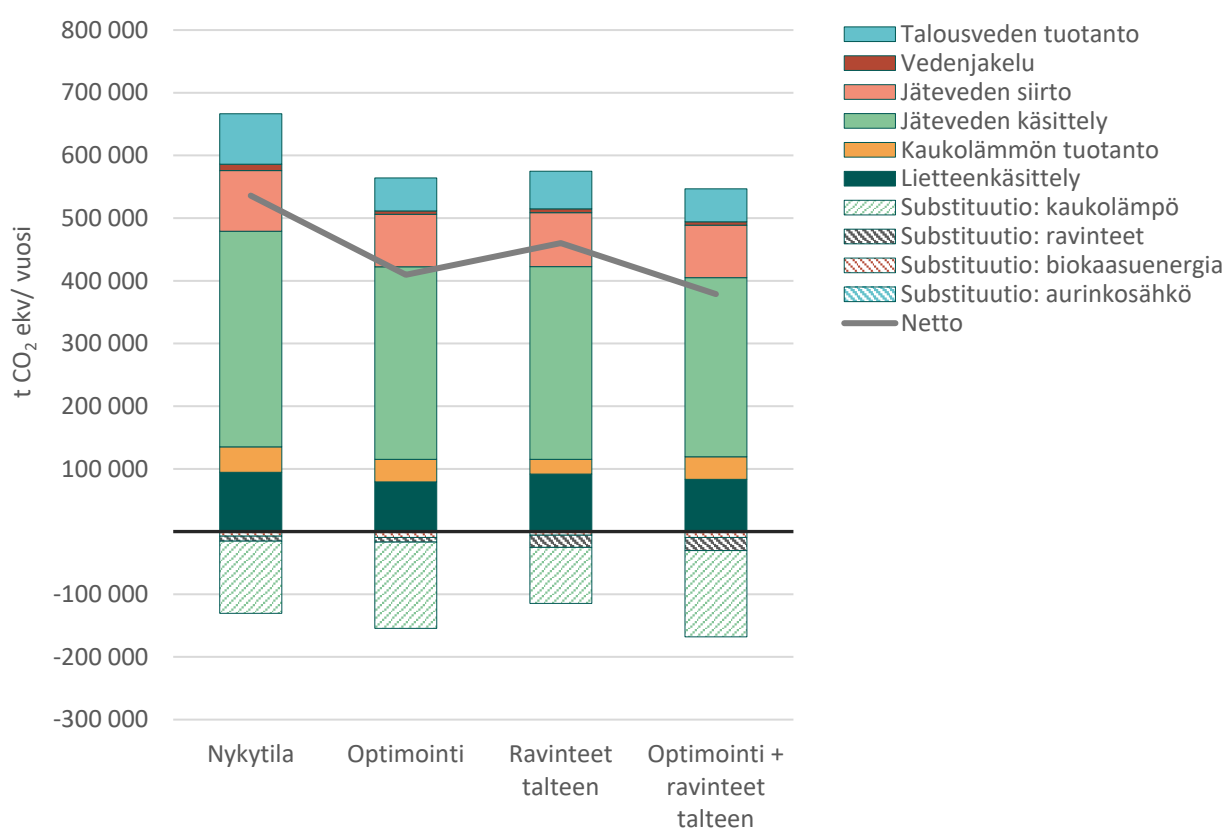
5.2.1 Yhteenveto

Päästövähennysskenaarioissa tarkasteltiin luvussa 4 määritettyjen päästövähennystoimenpiteiden vaikutuksia vesihuollon elinkaarisiin kasvihuonekaasupäästöihin sekä laskennallisiin vältettyihin päästöihin vuoteen 2030 mennessä. Nykytilan optimointi -skenaariossa tarkasteltiin päästövähennystoimia kaikissa vesihuollon osa-alueissa. Ravinteet talteen -skenaariossa tarkasteltiin ainoastaan ravinteiden talteenottomenetelmien vaikutuksia ja Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa tarkasteltiin näiden skenaarioiden yhteisvaikutuksia. Skenaariotarkasteluihin ei sisällytetty epävarmuustarkastelua. Koska tarkastelu ulottui vuoteen 2030, kaikissa skenaarioissa huomioitiin päästövähennystoimien lisäksi sähkön ja lämmön päästökertoimien pieneminen WEM-skenaarion mukaisesti. Myös kemikaalien valmistuksen päästöjen oletettiin pienevän kokonaisuudessaan 10 % vuoteen 2030 mennessä (ks. luku 4.1).

Tulosten mukaan nykytilan optimointi -skenaario vähentää Suomen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä 24 % (126 207 t CO₂-ekv/vuosi), Ravinteet talteen -skenaario 14 % (73 560 t CO₂-ekv/vuosi) ja molemmat skenaariot yhteensä 29 % (154 601 t CO₂-ekv/vuosi), kun substituuotit ravinteille ja tuotetulle myydylle energialle huomioidaan. Jos substituuotioita ei huomioida, Nykytilan optimointi -skenaario vähentää Suomen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä 15 % (102 291 t CO₂-ekv/vuosi), Ravinteet talteen -skenaario 14 % (89 403 t CO₂-ekv/vuosi) ja molemmat skenaariot yhteensä 18 % (117 073 t CO₂-ekv/vuosi). (Kuvat 14 ja 15 ja taulukko 22.)

Työssä tarkastellut päästövähennystoimet eivät ole riittäviä hiilineutraaliuden saavuttamiseen vuoteen 2030 mennessä siten, kuten hiilineutraalius on tässä työssä määritelty. Tulee myös ottaa huomioon, että skenaarioiden yhteydessä ei tarkasteltu laskentaan liittyviä epävarmuustekijöitä. Arvio vesihuollon nykyisistä elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä (ks. luku 5.1), johon skenaarioita verrataan, sisältää kuitenkin useita epävarmuustekijöitä. Näin ollen skenaariolaskennassa arvioituja päästövähennyksiä voidaan pitää suuntaa antavina arvioina.

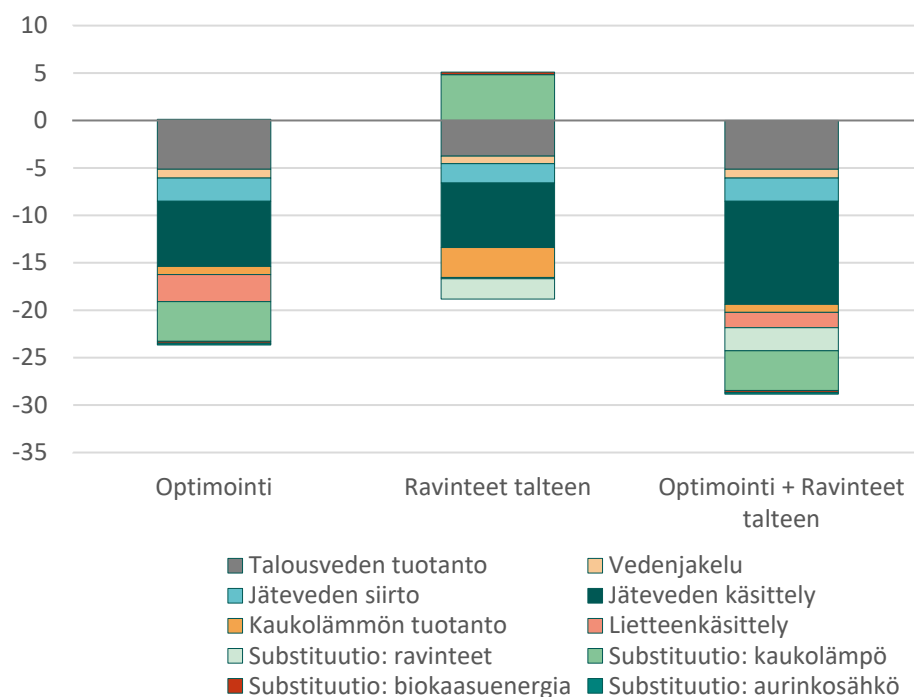
Suurin päästöjen lähde on kaikissa skenaarioissa jätevedenkäsittelyn typpioksiduulipäästöt, joiden vähentämistä ei tässä työssä tarkasteltu. Keinoja typpioksiduulipäästöjen vähentämiseen tutkitaan parhaillaan, mutta tutkimustietoa eri käytäntöjen vaikutuksista elinkaarisiin päästöihin ollut vielä riittävästi saatavilla tätä työtä tehdessä. Skenaariot eivät myöskään kata kaikkia potentiaalisia päästövähennystoimia, vaan monia yksittäisiä toimia jäi kokonaan tarkastelun ulkopuolelle tietopuutteiden vuoksi (mm. aktiivihiihtä korvaavat materiaalit, verkostoinfran saneeraukseen ja uudisrakentamiseen liittyvät päästövähennystoimet, vuotovesien vähentäminen, lämmön talteenotto lietteestä ja raaka- ja talousvedestä, sekä uusia lietteidenkäsittelymenetelmiä ja ravinteiden talteenottomenetelmiä). Näiden päästövähennystoimien sisällyttäminen jatkotutkimuksiin on tärkeää, jotta voidaan arvioida niiden potentiaalia vesihuollon päästöjen vähentämisessä.



Kuva 14. Suomen vesihuollon elinkaariset kasviuonekaasupäästöt ja laskennalliset substituutioista muodostuvat vältetyt päästöt sekä niiden yhteisvaikutus (netto). Mukana nykytila sekä kolme skenaariotarkastelua.

Taulukko 22. Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt nykytilassa osa-alueittain (t CO₂-ekv/vuosi) ja päästöjen väheneminen skenaarioissa (% nykytilan päästöistä)

	Nykytila (t CO ₂ -ekv/vuosi)	Nykytilan optimointi	Ravinteet talteen	Nykytilan optimointi + ravinteet talteen
Talousvedentuotanto	80 204	-34 %	-25 %	-34 %
Prosessipäästöt	8 204	-18 %	0 %	-18 %
Energiankulutus	42 557	-47 %	-40 %	-47 %
Kemikaalit	29 443	-21 %	-10 %	-21 %
Vedenjakelu	10 358	-48 %	-41 %	-48 %
Energiankulutus	10 358	-48 %	-41 %	-48 %
Jäteveden siirto	96 772	-14 %	-11 %	-14 %
Energiankulutus	26 128	-50 %	-42 %	-50 %
Verkostopäästöt	70 644	0 %	0 %	0 %
Jätevedenkäsittely	343 945	-11 %	-11 %	-17 %
Prosessipäästöt	234 185	0 %	-9 %	-11 %
Energiankulutus	37 828	-59 %	-37 %	-57 %
Kemikaalit	44 756	-32 %	+2 %	-20 %
Päästöt vesistöissä	23 330	0 %	-10 %	-12 %
Välppeen käsittely	3 846	0 %	0 %	0 %
Lietteenkäsittely	94 510	-16 %	-1 %	-9 %
Prosessipäästöt	50 095	-29 %	-3 %	-18 %
Syötteet	18 337	-31 %	+9 %	-19 %
Varastointi	10 209	+33 %	-3 %	+38 %
Kuljetus käsiteltäväksi	6 686	+7 %	-3 %	+4 %
Hyödyntäminen	9 183	+13 %	-7 %	-4 %
Kaukolämmön tuotanto	40 579	-11 %	-42 %	-11 %
Energiankulutus	40 579	-11 %	-42 %	-11 %
YHTEENSÄ	666 368	-15 %	-14 %	-18 %
Substituutio: ravinteet	-7 944	+8 %	- 158 %	-67 %
Substituutio: kaukolämpö	-115 204	-19 %	+19 %	-25 %
Substituutio: biokaasuenergia	-7 324	-15 %	-17 %	-18 %
Substituutio: aurinkosähkö	0	-100 %	0 %	-100 %
NETTO	535 896	-24 %	-14 %	-29 %

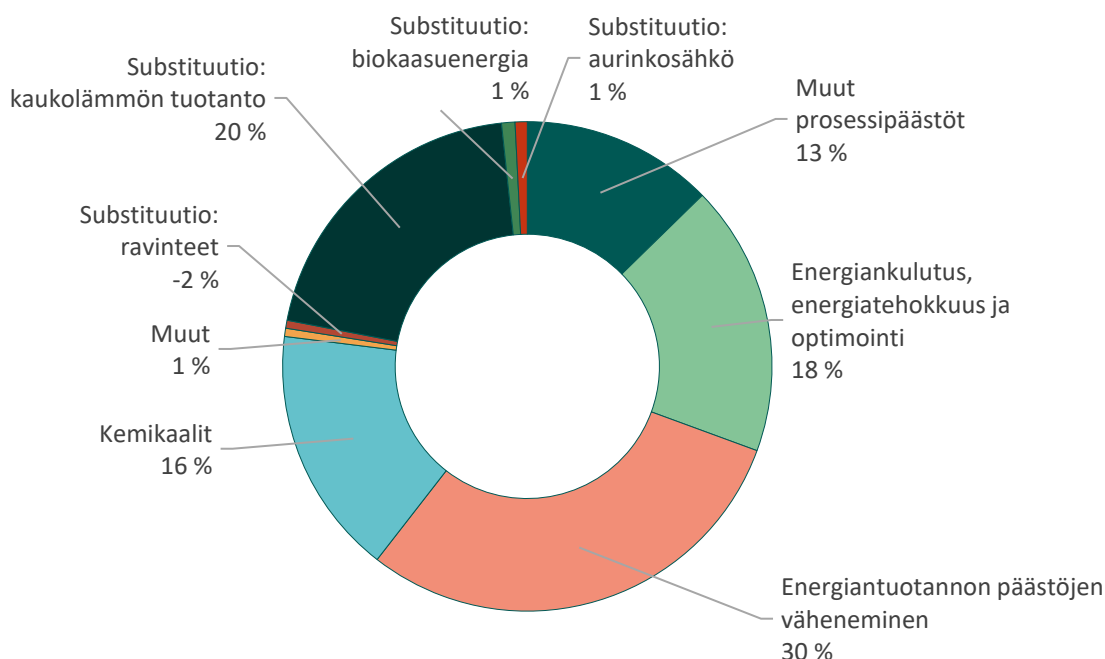


Kuva 15. Päästövähennyskenaarioiden prosentuaaliset erot suhteessa nykytilaan. Positiiviset luvut kuvaavat päästöjen kasvua ja negatiiviset päästöjen vähenemistä.

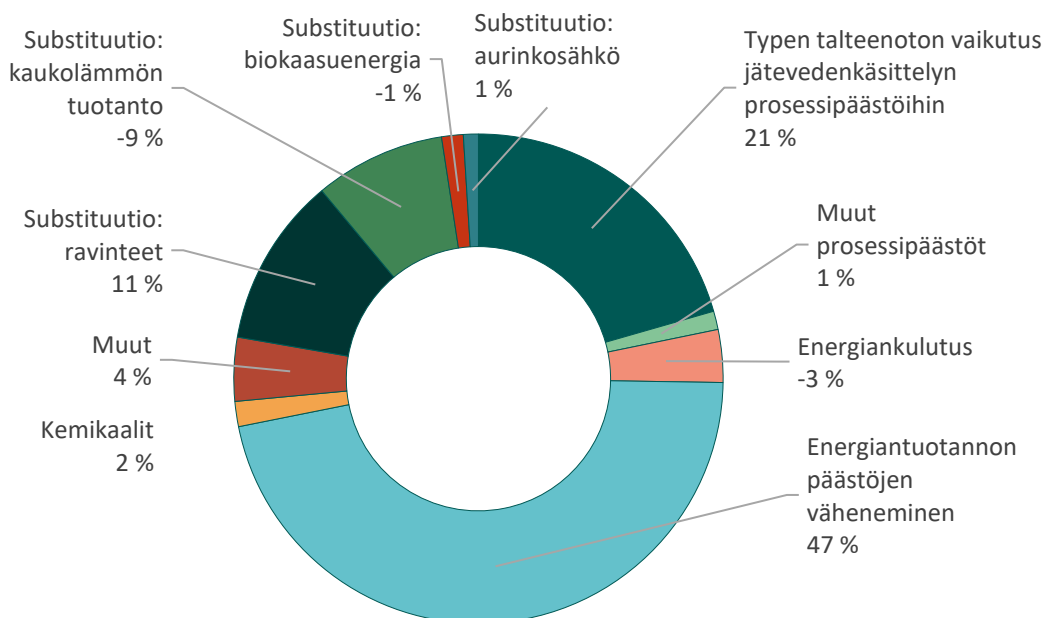
Tarkasteltujen päästövähennystoimien vaikuttavuus vaihtelee eri skenaarioiden välillä (kuvat 16–18). Energiantuotannon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on suurin yksittäinen päästöjä vähentävä tekijä kaikissa skenaarioissa ja sen osuus päästöjen vähentämisestä vaihtelee välillä 25–47 %. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että arviot energiantuotannon päästöjen vähentämisen toteutumisesta saattavat vaihdella. Energiantuotannon elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen onkin valtakunnallinen haaste, eikä siten yksin vesihuollon vaikutuspiirissä. Vesihuolto on kuitenkin merkittävä energiankuluttaja, joten energiantuotannon vähäpäästöisyydellä on huomattava vaikutus vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen pienentämisessä.

Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa vesihuoltolaitoksilla tehtävistä päästövähennystoimista merkittävimpiä ovat ravinteiden talteenotto ja kierrätys (24 % kaikista päästövähennystoimista, sisältäen typen talteenoton vaikutuksen jätevedenkäsittelyn prosessipäästöihin ja ravinteiden substituutiot), kaukolämmön tuotanto jätevedestä (17 % kaikista päästövähennystoimista), energiatehokkuuden parantaminen ja energiankäytön optimointi (12 % kaikista päästövähennystoimista) sekä kemikaalien kulutukseen liittyvät toimet (10 % kaikista päästövähennystoimista, sisältäen kemikaalien käytön optimoinnin ja käytön korvaamisen vähäpäästöisemmällä kemikaaleilla) (kuva 18).

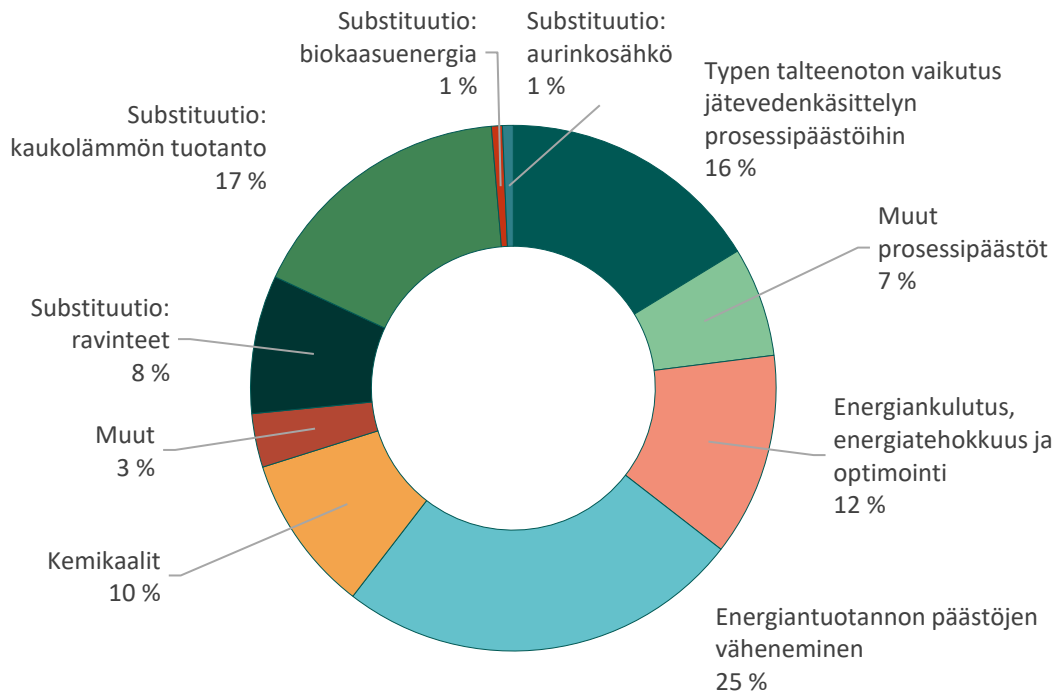
Jos tarkastellaan Nykytilan optimointi-skenaariota, merkittävimpiä päästövähennystoimia vesihuoltolaitoksilla ovat kaukolämmön tuotanto (20 % kaikista päästövähennystoimista), energiatehokkuuden parantamisen ja energiankäytön optimointi (18 % kaikista päästövähennystoimista), kemikaalien kulutuksen liittyvät toimet (16 % kaikista päästövähennystoimista, sisältäen kemikaalien käytön optimoinnin ja käytön korvaamisen vähäpäästöisemmällä kemikaaleilla) sekä kompostoinnin vähentäminen ja lietteenkäsittelyn tehostaminen (13 % kaikista päästövähennystoimista, sisältää myös talousveden tuotannosta aiheutuvien prosessipäästöjen vähenemät) (kuva 16).



Kuva 16. Nykytilan optimointi -skenaarion päästövähennystoimien ja vältettyjen päästöjen (yhteensä 126 207 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen vertailutilanne (nykytila) huomioiden. Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen kasvua nykytilaan verrattuna. Muut prosessipäästöt sisältävät prosessipäästöjen vähenemisen talousveden tuotannossa sekä lietteenkäsittelyssä. Kemikaalit sisältävät kemikaalien käytön optimoinnin, käytön korvaamisen vähäpäästöisemmällä kemikaaleilla, kemikaalien päästökertoimen arvioidun alenemisen. Kaukolämpösubstituutio sisältää kaukolämmön tuotannon lisääntymisen, energiantuotannon päästöjen vähenemisen sekä vältettyjen päästöjen yhteisvaikutuksen.



Kuva 17. Ravinteet talteen-skenaarion päästövähennystoimien ja vältettyjen päästöjen (yhteensä 73 560 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen vertailutilanne (nykytila) huomioiden. Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen kasvua nykytilaan verrattuna. Muut prosessipäästöt sisältävät prosessipäästöjen vähenemisen talousveden tuotannossa sekä lietteenkäsittelyssä. Kemikaalit sisältävät kemikaalien käytön optimoinnin, käytön korvaamisen vähäpäästöisemmällä kemikaaleilla, kemikaalien päästökertoimen arvioidun alenemisen. Kaukolämpösubstituutio sisältää kaukolämmön tuotannon lisääntymisen, energiantuotannon päästöjen vähenemisen sekä vältettyjen päästöjen yhteisvaikutuksen.



Kuva 18 Nykytilan optimointi + ravinteet talteen-skenaarion päästövähennystoimien ja vältettyjen päästöjen (yhteensä 154 601 t CO₂-ekv/vuosi) jakautuminen vertailutilanne (nykytila) huomioden. Kaukolämpösubstituutio sisältää kaukolämmön tuotannon lisääntymisen, energiantuotannon päästöjen vähenemisen sekä vältettyjen päästöjen yhteisvaikutuksen. Muut prosessipäästöt sisältävät prosessipäästöjen vähenemisen talousveden tuotannossa sekä lietteenkäsittelyssä. Kemikaalit sisältävät kemikaalien käytön optimoinnin, käytön korvaamisen vähäpäästöisemmällä kemikaaleilla, kemikaalien päästökertoimen arvioidun alenemisen.

Substituutioista muodostuvat laskennalliset päästövähennykset kattoivat skenaariosta riippuen 3–27 % kaikista päästövähennystoimista. Lietteen mädätyksessä tuotettu lämpö- ja sähköenergia päättyy pääasiassa jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn energianlähteeksi, jolloin vältettyjä päästöjä ei niiltä osin muodostu. Tuotettu energia ja sillä saavutettu hyöty tulee kuitenkin huomioiduksi, kun jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn ostettu energia on pienempi.

Biokaasuenergian substituutio sisältää biokaasusta tuotetun sähkön ja lämmön sekä liikennepolttoaineen. Nykytilassa biokaasuenergiasta muodostuvista vältetyistä päästöistä aiheutuu 63 % lämmöstä, 25 % liikennepolttoaineen tuotannosta ja 12 % sähköstä. Viime vuosina liikennepolttoaineen tuotanto on oletettavasti lisääntynyt, mutta tilastotietoa siitä ei ollut työtä tehdessä vielä saatavilla. Biokaasutuotannon lisääntyminen Nykytilan optimointi -skenaariossa ja Ravinteet talteen -skenaariossa oletettiin lisäävän liikennepolttoaineen tuotantoa yli kaksinkertaiseksi nykytilanteeseen verrattuna. Biokaasusta liikennepolttoaineen tuottaminen oletettiin laskennassa vähentävän fossiilisten polttoaineiden käyttöä liikenteessä, jonka substituutiohyöty on suurempi kuin tuotettaessa sähköä tai lämpöä (liikennepolttoaineen päästökerroin on suurempi).

Ravinteiden substituutioissa oletettiin, että lietteen sisältämästä fosforista 60 % korvaa mineraalilannoitteita fosforiasetuksen (64/2023) mukaisesti. Käytännössä puhdistamolietepohjaisista lannoitevalmisteista noin puolet ohjautuu viherrakentamiseen (Vilpanen & Seppälä 2021). Levitettäessä asetuksen sallima määrä fosforia, ravinteita päättyy viherrakentamiseen todennäköisesti kuitenkin ylimäärin kasvien tarpeeseen nähden eikä siten vähennä mineraalilannoitteiden käyttöä samassa suhteessa kuin nyt laskennassa on oletettu.

Laskennassa oletettiin, että substituuotit ja niihin kytkeytyvät vältetyt päästöt toteutuvat täysimääräisesti. Käytännössä näin ei välttämättä tapahdu, sillä kulutuksen ja päästöjen sääntely sekä siinä tapahtuvat muutokset vaikuttavat saavutettavaan substituuotiohyötyyn. Vältetyt päästöt perustuvat aina oletuksilla mallintamiseen, eikä niitä voida mitata tai todentaa. Vältetyt päästöt ovat tulevaisuudessa suhteellisesti pienempiä kuin nykytilassa, kun tuotantoprosessien päästöt ja energiankulutuksen päästöt alenevat. Näin ollen skenaariossa vältetyt päästöt energiayksikköä kohden (esim. MWh tuotettua kaukolämpöä) ovat pienemmät kuin nykytilassa. Myös oletukset siitä, mitä tuotettu energia tai talteen otettu ravinne tulevaisuudessa korvaa, voivat olla erilaisia kuin tässä työssä arvioitiin. Mikäli esimerkiksi laskennassa oletettu rejektivedestä talteen otettu tyyppi ammoniakivetenä korvaisi muita, korkeamman päästökertoimen omaavia tyyppituotteita, olisi saavutettava hyöty nykyistä suurempi. Työssä ei myöskään huomioitu, miten esimerkiksi liikennepolttoaineiden tuotannon jakauman tulevaisuudessa oletetaan muuttuvan, vaan päästökertoimen laskemisessa käytettiin nykyistä jakaumaa. Tämä vaikuttaa liikennepolttoainebiokaasun substituuotivaikutusten arviointiin. Suurimman ilmastohyödyn saavuttamisen kannalta olisikin tärkeää pyrkiä korvaamaan mahdollisimman korkean päästökertoimen omaavia tuotteita. Tulee kuitenkin huomioida, että vältettyjen päästöjen oletettu toteutuminen substituuotien avulla edellyttää usein myös niiden edistämistä erilaisin ohjauskeinoin.

Tässä työssä tarkastellut päästövähennystoimet ja niissä käytetyt oletukset eivät sovellu kaikille laitosille, sillä päästövähennystoimien vaikuttavuus vaihtelee käytännössä laitospohjaisesti. Laitostasolla päästövähennystoimia onkin tarkasteltava aina tapauskohtaisesti, eikä tämän työn tuloksia voi soveltaa laitostason tarkasteluun sellaisenaan.

Seuraavissa luvuissa käsitellään eri skenaarioiden päästövähennysvaikutuksia vesihuollon osa-alueisiin jaoteltuna. Jätevedenkäsittelyn (luku 5.2.4) ja lietteenkäsittelyn (luku 5.2.6) luvuissa tarkastellaan vain Nykytilan optimointi -skenaariota. Ravinteiden talteenoton vaikutuksia (Ravinteet talteen -skenaario ja Nykytilan optimointi + ravinteet talteen -skenaario) tarkastellaan erikseen luvussa 5.2.7.

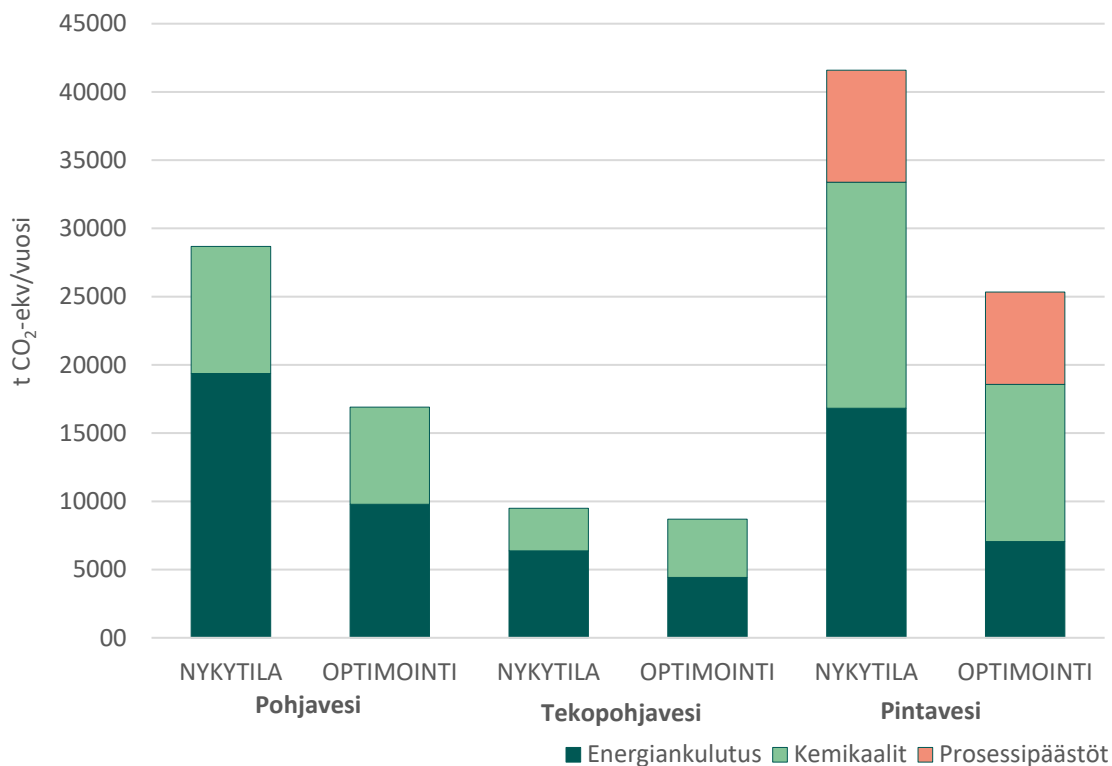
5.2.2 Talousveden tuotanto

Talousveden tuotannossa päästöt vähenevät Nykytilan optimointi -skenaariossa yhteensä noin 34 %. Pohjaveden tuotannon päästöt vähenevät 41 %, tekopohjaveden tuotannossa 9 % ja pintaveden tuotannossa 39 % (kuva 19). Valtaosa päästövähennyksistä (noin 72 %) saavutetaan energiatehokkuuden parantamisella ja energiankäytön optimoinnilla ja sähköenergian päästökertoimen pienemisellä. Energiankulutuksen päästöt vähenevätkin noin 47 %, kun kummatkin toimet huomioidaan. Jos huomioidaan vain päästökertoimen pieneneminen, energiankulutuksen päästöt vähenevät noin 40 %. Tämä on huomioitu myös Ravinteet talteen -skenaariossa. Päästövähennystoimet talousveden tuotannon kemikaalien tuotannossa ja kulutuksessa vähentävät kemikaalikulutuksen päästöjä yhteensä noin 21 % (taulukko 23).

Suurimmat yksittäiset tekijät kemikaalikulutuksen päästöjen vähentämisessä olivat sammutetun kalkin korvaaminen kalkkikivialkaloinnilla sekä aktiivihieksen käytön vähentyminen. Aktiivihieksen käytön päästöihin vaikuttavat sekä käytön optimointi että pintaveden käytön vähentäminen tekopohjaveden tuotannon lisääntymisen myötä. Saostus- ja desinfiointikemikaalien päästöjen pienenemiseen vaikuttaa pelkästään pintaveden korvaaminen tekopohjavedellä. (Taulukko 23.) Saostuskemikaalien käytön vähentämistä ei tarkasteltu käytön optimoinnin näkökulmasta. Todennäköisesti niiden ominaiskulutus ei tule pienenemään pintavesilaitoksilla, sillä orgaanisen aineen määrä raakavedessä tulee vain kasvamaan ilmastomuutoksen myötä (Huoltovarmuusorganisaatio 2020).

Sammutetun kalkin lisäksi myös lipeän käyttöä voidaan korvata kalkkikivellä (ei tarkasteltu tässä työssä). Kalkkikiveen siirtymistä puoltaa menetelmän turvallisuus, helppokäyttöisyys, toimintavarmuus sekä sammutettua kalkkia alhaisemmat kustannukset ja huomattavasti pienempi hiilijalanjälki (Härkki 2023; Laanti & Malmikare 2023). Toisaalta kalkkikiven käyttöönotto vaatii prosessimuutoksia ja isoja investointeja.

Tekopohjaveden tuotannon lisääminen ja pintaveden vähentämisen päästövaikutukset kytkeytyvät skenaarioissa tehtyihin oletuksiin kemikaalinkulutuksesta ja energiankulutuksesta. Tekopohjaveden tuotannossa kuluu huomattavasti vähemmän kemikaaleja kuin pintavesilaitoksella (ks. luku 3.3.3). Elin-
kaaristen kasvihuonekaasupäästöt tuotettua vesikuutiota kohden ovat pienimmät tekopohjaveden tuotannolla, jonka osuuden kasvattaminen vähentää elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä pintaveden käsittelystä (taulukko 24). Toisaalta pintavesilaitosten korvaamista tekopohjavesiprosessilla hidastaa hankkeiden pitkät valmistumisajat sekä sopivien raakavesilähteiden ja imeytysalueiden löytyminen. Tarkastelussa ei huomioitu tekopohjavesilaitoksen rakentamisesta aiheutuvia päästöjä. Jos olemassa olevaa pintavesilaitosta korvataan tekopohjavesilaitoksella, tulee tapauskohtaisessa laskennassa ottaa huomioon käytön aikaisten päästöjen lisäksi pintavesilaitoksen saneeraamisesta sekä tekopohjavesilaitoksen rakentamisesta aiheutuvat päästöt.



Kuva 19. Talousveden tuotannon elinkaarisien kasvihuonekaasupäästöt nykytilassa ja Nykytilan optimointi -skenaariossa tuotantomuodoittain.

Taulukko 23. Talousveden tuotannossa käytettyjen kemikaalien kasvihuonekaasupäästöt nykytilassa ja päästövähennyspotentiaali Nykytilan optimointi -skenaariossa

Kemikaalit	Nykytila (t CO ₂ -ekv/vuosi)	Päästövähennys Nykytilan optimointi -skenaariossa
Alkalointi	8 266	-22 %
Poltettu kalkki	806	0 %
Sammutettu kalkki	3 011	-52 %
Kalkkirouhe	224	+8 %
Dolomiitti (kalsium-magnesiumkarbonaatti)	7	0 %
Lipeä (natriumhydroksidi)	1 980	+2 %
Sooda (natriumkarbonaatti)	81	0 %
Hiilidioksidi	2 121	-13 %
Rikkihappo	35	-12 %
Kemiallinen saostus	6 421	-5 %
Ferrisulfaatti	3 149	-26 %
Polyalumiinikloridi	3 242	+15 %
Saostuspolymeeri	29	-26 %
Desinfiointi	2 539	-3 %
Kloori	24	-14 %
Natriumhypokloriitti	1 979	+1 %
Otsonointi (happi)	385	-18 %
Ammoniakki	141	-18 %
Ammoniumkloridi	10	-16 %
Vetyperoksidi	1	0 %
Ammoniumsulfaatti	16	-100 %
Suodatus	11 762	-33 %
Hiekka	131	-17 %
Aktiivihiehi (uusi)	2 558	-64 %
Aktiivihiehi (reaktivoitu)	4 282	-26 %
Antrasiitti (kivihiili)	4 792	-24 %
YHTEENSÄ	29 004	-21 %

Taulukko 24. Talousveden tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen muutos Nykytilan optimointi -skenaariossa tuotantomuotojen mukaan, tuotettua vesikuutiota kohden sekä vuositasolla

Tuotantomuoto	Nykytila (kg CO ₂ -ekv/m ³)	Nykytilan optimointi (kg CO ₂ -ekv/m ³)	Nykytila (t CO ₂ - ekv/vuosi)	Päästövähennys Nykytilan optimointi -skenaariossa
Pohjavesi	0,14	0,08	28 818	-41 %
Tekopohjavesi	0,14	0,09	9 526	-9 %
Pintavesi	0,29	0,22	41 838	-34 %
Yhteensä	0,2	0,13	80 188	-34 %

5.2.3 Vedenjakelu ja jäteveden siirto

Vedenjakelun kasvihuonekaasupäästöt vähenevät yhteensä 48 % Nykytilan optimointi -skenaariossa ja 41 % Ravinteet talteen skenaariossa. Vedenjakelun päästövähennykset saavutetaan energiatehokkuuden parantamisella ja energiankäytön optimoinnilla sekä sähköenergian päästökertoimen pienemisellä. Energiankulutuksen päästöt vähenevätkin noin 48 %, kun kummatkin toimet huomioidaan. Jos huomioidaan vain sähköenergian päästökertoimen pieneneminen, energiankulutuksen päästöt vähenevät noin 41 %. Tämä on huomioitu myös Ravinteet talteen -skenaariossa.

Vastaavasti jäteveden siirron kasvihuonekaasupäästöt vähenevät yhteensä 14 % Nykytilan optimointi -skenaariossa ja 11 % Ravinteet talteen skenaariossa. Jäteveden siirron päästövähennykset saavutetaan energiatehokkuuden parantamisella ja energiankäytön optimoinnilla sekä sähköenergian päästökertoimen pienemisellä. Energiankulutuksen päästöt vähenevätkin noin 50 %, kun kummatkin toimet huomioidaan. Jos huomioidaan vain sähköenergian päästökertoimen pieneneminen, energiankulutuksen päästöt vähenevät noin 42 %. Tämä huomioitu myös Ravinteet talteen -skenaariossa. Verkostopäästöjen vähentämistä ei skenaarioissa tarkasteltu niihin liittyvän tutkimustiedon puutteellisuuden takia.

Huomioitavaa on, että asiantuntija-arvioiden mukaan pumppauksen energiatehokkuutta suurempi energiansäästöpotentiaali muodostuu pumppauksen mitoituksesta ja optimoinnista (Kuronen 2014; Paukkunen 2023; Särkiniemi 2023). Näitä kahta ei kuitenkaan eroteltu tarkastelussa vaan päästövähennys laskettiin kokonaisuudessaan energiatehokkuuteen ja energiankäytön optimointiin liittyville toimille.

5.2.4 Jätevedenkäsittely

Jätevedenkäsittelyn kasvihuonekaasupäästöt vähenevät yhteensä 11 % Nykytilan optimointi -skenaariossa. Nykytilan optimointi -skenaariossa suurin osa päästövähennyksistä saavutetaan energiatehokkuuden parantamisella ja energiankäytön optimoinnilla (47 % kaikista päästövähennyksistä) ja sähköenergian päästökertoimen pienemisellä (14 % kaikista päästövähennyksistä). Energiankulutuksen päästöt vähenevät Nykytilan optimointi -skenaariossa yhteensä 59 % nykytilaan verrattuna. Kemikaalikulutuksen tarkentamisella voidaan vähentää kemikaalikulutuksen päästöjä 32 %.

Energiankulutuksen päästöjä voidaan vähentää panostamalla energiatehokkuuteen sekä ilmastuksen prosessien säätöön ja optimointiin sekä pumppauksen käytön optimointiin. Jo hankintavaiheessa on syytä kiinnittää huomiota ilmastuskompressoreiden ja moottoreiden energiatehokkuuteen ja elinkaarikustannuksiin hankintahinnan sijaan. Kestävyysskriteerien tuomista osaksi laitehankintaa on käsitelty VVY:n Vesihuoltolaitoksen ilmastotyökalut -julkaisussa (Nissinen ym. 2023). Esimerkkejä jätevedenkäsittelyn energiatehokkuuden parantamisesta löytyy Motivan energiatehokas vesihuoltolaitos -hankkeen tietokorteista (Motiva 2018) sekä Canemure-hankkeen Best practices-julkaisusta (Linjama 2021). HSY:n Viikinmäen puhdistamolla vuonna 2022 toteutetussa hankkeessa tavoitteena oli ilmastuksen lautaskokoa kasvattamalla ja ilmastusprosessia optimoimalla saavuttaa noin 240 MWh vuosittainen säästö energiankulutuksessa, joka on noin 6 % puhdistamon sähkön kokonaiskulutuksesta (Vento 2021). Kouvolan Mäkilän puhdistamolla ilmastuksen optimoinnin tarkastelussa arvioitiin simulointien avulla ilmastusilman säätöpotentiaaliksi kesällä 20 % ja talvella 10 %. Vuoden 2020 sähkönkulutuksella vuotuinen säästö olisi noin 245–490 MWh (Kouvolan Vesi Oy 2022).

Kemikaalien osalta Nykytilan optimointi -skenaariossa tarkasteltiin polyalumiiniklordin (PAC) korvaamista rautapohjaisilla kemikaaleilla, sammutetun kalkin korvaamista kalsiumkarbonaatilla sekä

alkalointikemikaalien korvaamista kiertotalouskalsiitilla. Tarkastelun ulkopuolelle jäi joitakin potentiaalisia vaihtoehtoja tietojen puuttumisen vuoksi, kuten ferrosulfaatin, lipeän ja polymeerin korvaaminen kiertotalousvaihtoehtoilla. Kemikaalinkulutuksen optimoinnin potentiaalia tarkasteltiin vain keskisuurilla puhdistamoilla, sillä suurten puhdistamoiden oletettiin jo tehneen optimointitoimia ja pienillä puhdistamoilla optimointi todettiin epätodennäköiseksi vähäisten henkilöresurssien ja osaamisen puutteen vuoksi.

Taulukossa 25 on esitetty kemikaalien käytön optimoinnin ja kemikaalivalintojen vaikutukset eri kemikaalien aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin. Kemikaalien osalta suurimmat päästövähennykset syntyivät sammutetun kalkin käytön optimoinnista ja korvaamisesta kalsiumkarbonaatilla ja kiertotalouskalsiitilla, polyalumiinikloridin käytön optimoinnista ja korvaamisesta rautapohjaisilla kemikaaleilla sekä lipeän käytön optimoinnista ja korvaamisesta kiertotalouskalsiitilla. Kemikaaleja korvattaessa toisella kemikaalilla annostelusuhde vaikuttaa päästöjen määrään ja se voi vaihdella tapauskohtaisesti. Näin ollen potentiaalisia päästövähennyksiä tulee tarkentaa laitoskohtaisissa tarkasteluissa.

Alkalointikemikaalien korvaaminen kalsiumkarbonaatilla tai kiertotalouskalsiitilla voidaan todeta potentiaalisesti päästövähennystoimeksi suuremmassakin mittakaavassa. Pienempien kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi ylläpidon helppous, turvallisuus ja alhaisemmat kustannukset puoltavat niiden käyttöä. Toimintavarmuus, kierrätysmateriaalien rajallinen saatavuus sekä logistiikka tulee huomioida kuitenkin tapauskohtaisesti.

Taulukko 25. Kemikaalien kulutuksen tarkentamisen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin
Nykytilan optimointi skenaariossa

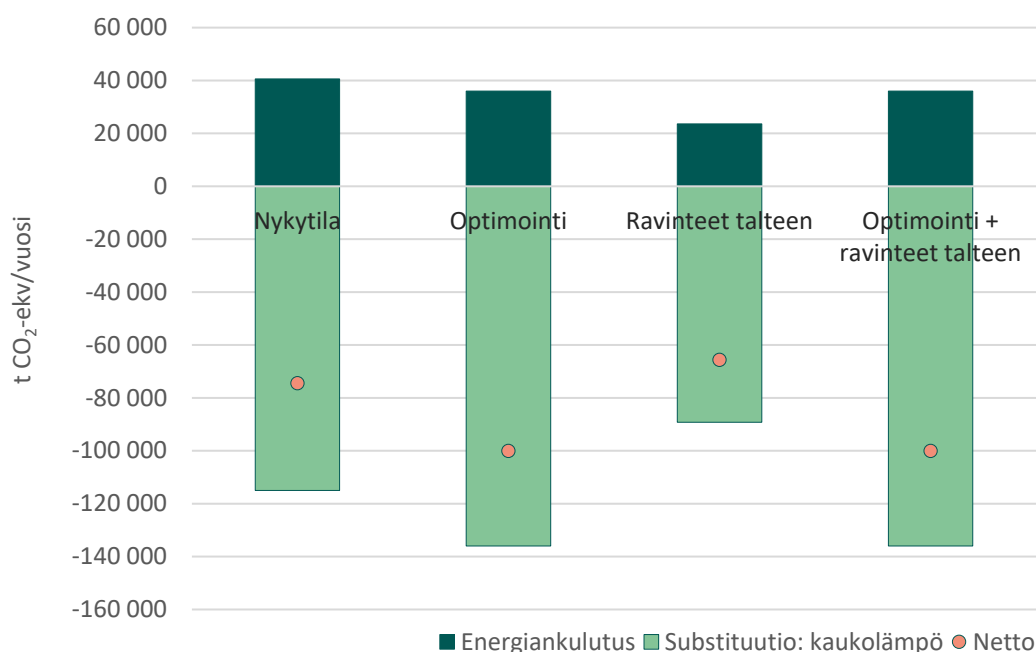
Kemikaali	Nykytila (t CO ₂ -ekv/vuosi)	Päästövähennys Nykytilan optimointi -skenaariossa (%)
Ferro	5 134	-11 %
Ferri	7 857	-10 %
Alumiinisulfaatti	1 622	-37 %
PAC	5 070	-58 %
Kalkki, sammutettu	10 684	-73 %
Karbonaatti	740	+166 %
Sooda	1 759	-56 %
Lipeä	1 363	-80 %
Metanoli	4 414	-11 %
Rikkihappo	109	-10 %
Polymeeri	3 592	-10 %
Modifioitu tärkkelys	51	-10 %
Aktiivihili	78	-10 %
Muurahaishappo	21	-10 %
Glyseroli	649	-10 %
Natriumhypokloriitti	13	-10 %
Polyamiini	51	-10 %
Yhteensä	43 206	-34 %

Valtaosa jätevedenkäsittelyn päästöistä aiheutuu kuitenkin prosessipäästöistä, jotka säilyvät nykyisellään Nykytilan optimointi -skenaariossa. Ravinteet talteen -skenaarioissa typpioksiduulipäästöt

vähenevät puhdistamon kuormituksen muuttuessa (ks. luku 5.2.7). Skenaariotarkastelujen yhteydessä ei arvioitu typpioksiduulien päästöjen vähentämismahdollisuuksia puhdistamokohtaisilla toimilla puutteellisen tutkimustiedon vuoksi. Lähtökohta typpioksiduulipäästöjen vähentämiseen onkin päästöjen mittaaminen ja niihin vaikuttavien toimien tunnistaminen. Yleisesti ottaen typpioksiduulipäästöjen vähentämiskeinot ovat yhteneväisiä niille keinoille, jotka ylläpitävät tehokasta ravinteidenpoistoprosessia. Yksittäisiä keinoja ovat mm. ilmastuksen ja liuenneen hapen määrän optimointi, ammoniakkihiupujen estäminen, nitriitin kertymisen välttäminen, riittävä hiilensaanti denitrifikaatioprosessin loppuun saattamiseksi, pH:n pitäminen neutraalina ja mikrobipopulaation kontrollointi (Massara ym. 2017; Vasilaki ym. 2019; Chen ym. 2020). Typpioksiduulipäästöjen muodostumiseen vaikuttaa suuri joukko erilaisia ja toisiinsa kytkeytyviä parametrejä, jolloin päästöjen vähentämisen avuksi on tarpeen kehittää mallintamista, joka ottaa huomioon puhdistamon toiminnalliset ominaisuudet (Massara ym. 2017; Spérandio ym. 2022). Kiinnostusta on myös herättänyt typpioksiduulin talteenotto ja mahdollisuudet sen energiapotentiaalin hyödyntämiseen, jolloin typpioksiduuli voisi tulevaisuudessa muuttua voimakkaasta kasvihuonekaasusta energianlähteeksi (Wu ym. 2020; Duan ym. 2021).

5.2.5 Kaukolämmön ja -kylmän tuotanto

Kaukolämmön tuotannon kasvihuonekaasupäästöt vähenevät yhteensä 34 % Nykytilan optimointi - skenaariossa ja Nykytilan optimointi + ravinteet talteen skenaariossa, kun huomioidaan tuotetun kaukolämmön substituutiovaikutus. Ravinteet talteen -skenaariossa kokonaispäästöt kaukolämmön tuotannossa kasvavat 12 %, kun kaukolämmön tuotantomäärä säilyy nykytilan tasolla, mutta kaukolämmön tuotantoon tarvittavan sähkön päästökerroin on nykytilaa pienempi ja lisäksi vältetyissä päästöissä huomioitavan kaukolämmön päästökerroin on nykytilaa pienempi (kuva 20).



Kuva 20. Kaukolämmön- ja kylmän elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ja vältetyt päästöt nykytilassa ja skenaarioissa.

Kaukolämmön ja -kylmän tuotannosta vastaa energiayhtiö, mutta tässä tutkimuksessa sekä päästöt että substituutiot on laskettu osaksi vesihuollon ilmastovaikutuksia, sillä lämmönlähteen käytetään puhdistettua jätevettä. Kaukolämmön tuotannon potentiaalia jätevedestä tuotettuna ei ole

valtakunnallisesti selvitetty ja tässä työssä skenaariossa oletettu lisäys perustuu tiedossa olleiden, suunnitteilla olevien laitosten tuottamaan laskennalliseen kaukolämpöön. Käytännössä potentiaali voisi olla suurempi. Kaukolämpöyhtiöt ovat kiinnostuneita tästä mahdollisuudesta ja ovat jo investoineet sekä suunnittelevat investointeja jätevesien hukkalämmön hyödyntämiseksi (Meriläinen 2021). Yksi rajoittava tekijä kuitenkin on puhdistamoiden sijainti, joka usein on kaukana asutuksesta. Kaukolämpöverkoston tulisi olla lähellä jätevedenpuhdistamoa ja toisaalta kaukolämmölle tulee olla riittävästi käyttäjiä (asutusta tai teollisuutta) lähialueella, jotta yhteistyö olisi kannattavaa.

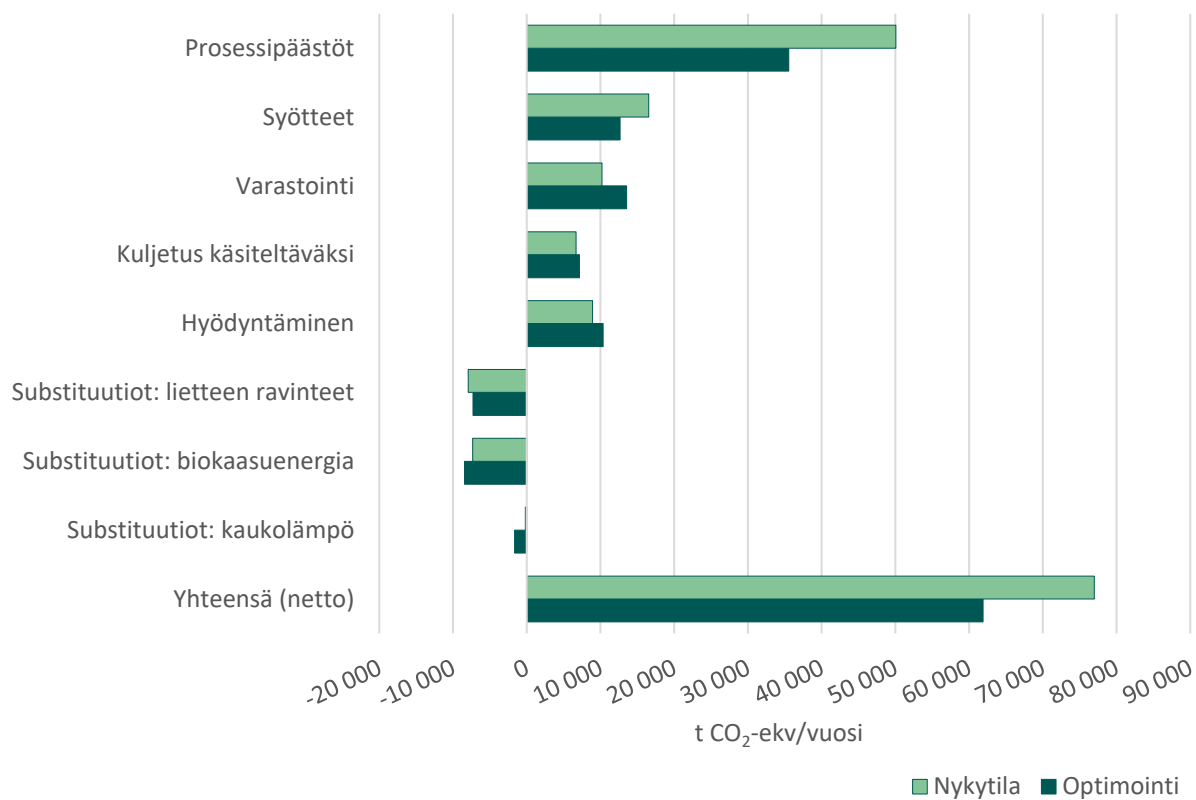
5.2.6 Lietteenkäsittely

Nykytilan optimointi -skenaariossa tarkasteltiin lietteenkäsittelymenetelmien välisten suhteiden muutosta niin, että kompostointi vähenee ja mädätys lisääntyy. Samalla tarkasteltiin mädätyksen metaanivuotojen vähentämistä. Tulosten mukaan, lietteenkäsittelyn päästöt vähenevät yhteensä 20 % Nykytilan optimointi -skenaariossa, kun huomioidaan lietteen ravinteiden sekä tuotetun biokaasun substituuтиoiden muodostamat vältetyt päästöt. Jos vältettyjä päästöjä ei huomioida, päästöt vähenevät 16 % (kuvat 21 ja 22).

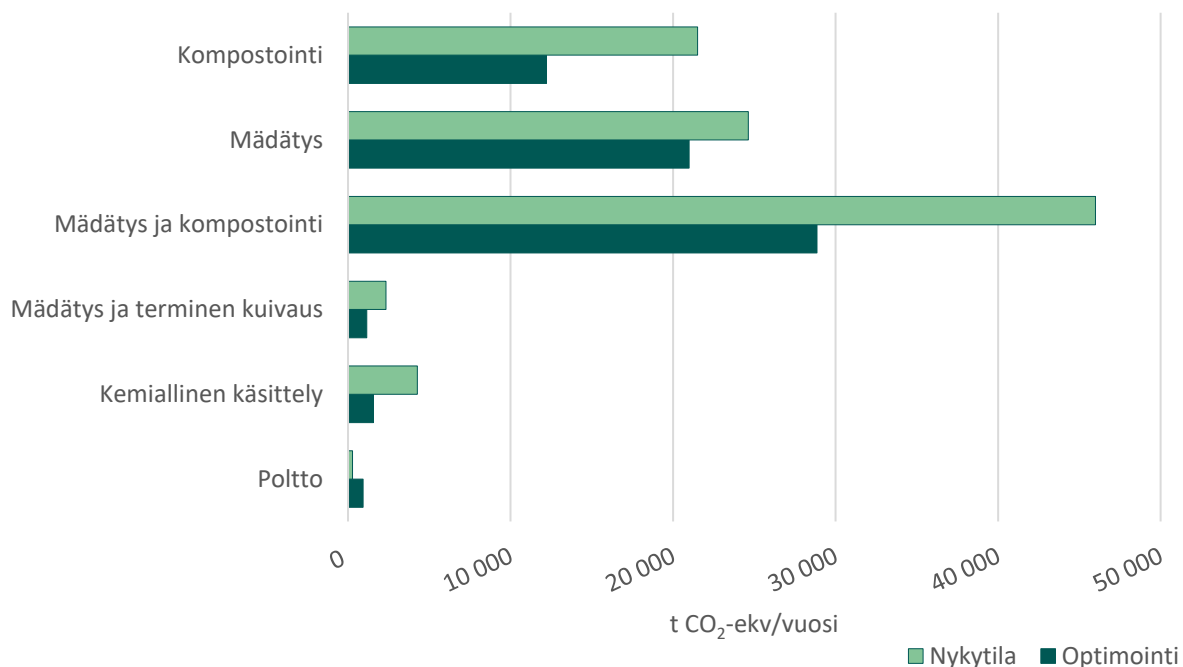
Lietteen varastoinnin ja hyödyntämisen päästöt ovat Nykytilan optimointi -skenaariossa suuremmat kuin nykytilassa. Muutos johtuu muutoksissa lietteenkäsittelymenetelmien suhteissa ja laskennan oletuksista. Skenaariossa sekä fosforia että typpeä jää enemmän lietetuotteisiin, joka nostaa sekä varastoinnista että lietteen hyödyntämisestä aiheutuvia päästöjä. Varastoinnin päästöt kasvavat Nykytilan optimointi -skenaariossa, koska mädätys lisääntyy ja kompostointi vähenee. Tämä johtuu kompostoinnin yhteydessä tehdystä laskennallisesta oletuksesta, jonka mukaan metaanipäästöjä ei muodostu kompostoinnin jälkeen varastoinnissa. Kun mädätys lisääntyy, kompostointiprosessin päästöt vähenevät, mutta mädätteen varastoinnin päästöt kasvavat. Samalla myös kierrätetyistä ravinteista saatavat vältetyt päästöt vähenevät, kun mineraalilannoitteiden valmistuksesta aiheutuvien päästöjen oletettiin vähenevän 10 % vuoteen 2030 mennessä. Näin ollen lietteen ravinteiden vältetyt päästöt ovat lopulta vuonna 2030 pienemmät kuin nykytilassa, vaikka kiertoon päätyvien ravinteiden määrä on suurempi.

Vältettyjä päästöjä muodostuu lietteenkäsittelyssä eniten nykytilassa ravinteiden substituuтиoista (osuus lietteenkäsittelyn substituuтиoista 52 %). Nykytilan optimointi -skenaariossa ravinteiden substituuтиoiden osuus vältetyistä päästöistä on 46 %. Lietteessä sisältämästä fosforista huomioidaan 60 % fosforiasetuksen mukaisesti ja se kattaakin valtaosan ravinteista lasketuista vältetyistä päästöistä (63 % nykytilassa). Lietteessä sisältämästä tyypestä substituuтиo lasketaan vain sen sisältämälle ammoniumtyypelle, koska se on kasveille nopeammin käytössä oleva tyyppi ja vastaa siten lannoitusvaikutukseltaan mineraalilannoitteita. Ammoniumtyypin määrään liittyy kuitenkin epävarmuuksia, sillä sen määrä on riippuvainen lietteenkäsittelymenetelmästä. Tietopohja lietteen ammoniumtyyppipitoisuudesta valtakunnallisesti on puutteellista.

Vältettyjä päästöjä muodostuu lietteenkäsittelyssä myös biokaasuenergian substituuтиoista. Nykytilan optimointi -skenaariossa biokaasuenergian substituuтиot kattavat yli puolet vältetyistä päästöistä ja vähentävät lietteenkäsittelyn päästöjä 15 % enemmän kuin nykytilassa. Valtaosa biokaasuenergian vältetyistä päästöistä muodostuu Nykytilan optimointi -skenaariossa fossiilisten liikennepolttoaineiden korvaamisesta (49 %). Toiseksi eniten vältettyjä päästöjä muodostuu kaukolämmön korvaamisesta (44 %).



Kuva 21. Lietteenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) nykytilassa ja Nykytilan optimointi -skenaariossa substituutiot huomioiden.



Kuva 22. Lietteenkäsittelyn elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv/vuosi) nykytilassa ja Nykytilan optimointi -skenaariossa lietteenkäsittelymenetelmittäin ja lietteenkäsittelyn jakauma huomioiden.

5.2.7 Ravinteiden talteenotto ja kierrätys

Ravinteet talteen -skenaariossa tarkasteltiin sekä typen että fosforin talteenoton ja kierrätyksen yhteisvaikutuksia. Tarkastellut menetelmät olivat typen strippaus mädätteen kuivauksen yhteydessä muodostuvasta rejektivedestä sekä fosforin talteenotto RAVITA-prosessilla jätevedenpuhdistusprosessin loppuvaiheessa. Ravinteiden talteenotto vaikuttaa jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn päästöihin sekä substituutioihin talteen otettujen ravinteiden osalta, joita tarkastellaan tässä luvussa.

Ravinteiden talteenotto vähentäisi koko vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä nykytilaan verrattuna yhteensä noin 10 % Ravinteet talteen -skenaariossa ja 12 % Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa, kun vältetyt päästöt huomioidaan. Ravinteiden talteenotto vähentäisi jätevedenkäsittelyn päästöjä yhteensä 11 % Ravinteet talteen -skenaariossa ja 17 % Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa. Lietteenkäsittelyn päästöt vähenisivät noin 3 % Ravinteet talteen -skenaariossa ja 12 % Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa, kun vältettyjä päästöjä ei huomioida.

Suurimmat määrälliset vältetyt päästöt ravinteiden talteenotolla saavutettaisiin jätevedenkäsittelyssä prosessipäästöjen vähenemisellä (taulukko 26). Nykyisin jätevedenpuhdistamoille kiertää pääsääntöisesti takaisin mädätteestä erotettu, typpipitoinen nestejake, eli rejektivesi. Typen talteenotto rejektivedestä vähentäisi puhdistamoille tulevaa typpikuormitusta ja vaikuttaisi siten myös jätevedenpuhdistuksen ja purkuveden typpioksiduulipäästöjä vähentävästi. Huomattavaa myös on, että mädätystä lietteestä erotetussa nestejakeessa on enemmän typpeä verrattuna mädättämättömän lietteen kuivauksessa muodostuvaan nestejakeeseen. Raakalietteessä suuri osa tyyppistä on sitoutunut orgaanisiin typpiyhdisteisiin, jotka mädätysprosessin aikana muuntuu ammoniumtypeksi. Näin ollen typen talteenotto on kannattavampaa erityisesti mädätetyn lietteen kuivauksessa muodostuvasta rejektivedestä kuin mädättämättömän lietteen kuivauksen vedestä. Skenaariotarkasteluiden tulosten mukaan nämä typpioksiduulipäästöt vähenisivät valtakunnallisesti noin 10–12 %. Tämä tarkoittaa käytännössä noin 21 000–24 900 t CO₂-ekv vuodessa (taulukko 26).

Fosforin talteenotto jätevedestä RAVITA-prosessilla lisäisi noin 2 % jätevedenkäsittelyn sähkönkulutusta valtakunnallisesti Ravinteet talteen -skenaariossa. Laskennassa ei kuitenkaan huomioitu kaikkea prosessin vaatimaa energiaa puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Sähkönkulutuksen lisääntymisestä aiheutuvan päästöjen kasvun kuitenkin kompensoisi sähköntuotannon päästökertoimen aleneminen sekä Nykytilan optimointi + ravinteet talteen -skenaariossa jätevedenkäsittelyn energiatehokkuuden paraneminen siten, että energiankulutuksen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt vähenisivät 37–57 %. RAVITA-prosessi myös lisäisi jätevedenkäsittelyn kemikaalien valmistuksen ja kuljetuksen kasvihuonekaasupäästöjä noin 1 000 t CO₂-ekv vuodessa, kun huomioidaan myös kemikaalien päästökertoimien pieneneminen (-10 %, ks. luku 4.1).

Lietteenkäsittelyn prosessipäästöt, varastoinnin päästöt sekä lietteen kuljetuksen päästöt vähenisivät 3 % Ravinteet talteen -skenaariossa, koska muodostuvan lietteen määrän oletettiin vähentyvän RAVITA-prosessin myötä. Sen sijaan typen strippaus lisäisi tarvittavien syötteiden, eli kemikaalien ja energian, kasvihuonekaasupäästöjä noin 9 % nykytilaan verrattuna. Typen strippaukseen kuuluvien kemikaalien ja energian osuus lietteenkäsittelyn kaikkien syötteiden päästöistä on Ravinteet talteen -skenaariossa 11 %. Typen strippaus Ravinteet talteen -skenaariossa kuitenkin yli kaksinkertaistaa lietteenkäsittelyn sähkönkulutuksen valtakunnallisesti, mutta vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin jää vähäiseksi pienentyvän sähkön päästökertoimen vuoksi. Myös lietteenkäsittelyn lämmönkulutus lisääntyy nykytilaan verrattuna valtakunnallisesti yli 30 %. Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaariossa suurempi osa lietteestä päätyy mädätykseen, jolloin myös typen strippaukseen päätyvä rejektin määrän oletettiin kasvavan samassa suhteessa. Vaikutus puhdistamojen prosessipäästöihin,

purkuvedestä aiheutuviin päästöihin ja substituutioon on siten suurempi kuin Ravinteet talteen -skenaariossa.

Skenaariotarkasteluissa mädätteen rejektivedestä talteen otettu typpi ammoniakkiveden muodossa oletettiin päätyvän teollisuuskäyttöön. Jos typpi otettaisiin talteen esimerkiksi ammoniumsulfaattina, se voitaisiin hyödyntää paremmin lannoitekäytössä. Ammoniakkivedellä on pienempi päästökerroin kuin lannoitetyypellä, joten substituutiohyötyjen maksimoimiseksi ammoniumsulfaattina hyödyntäminen olisi kannattavampaa. Toisaalta lannoitekäytössä ammoniumsulfaatista muodostuu kasvihuonekaasupäästöjä, joita tosin muodostuu kaikista typpipitoisista lannoitteista. Ammoniakkiveden teollisuuskäytön kasvihuonekaasupäästöjä ei tässä yhteydessä selvitetty.

RAVITA-prosessi on tällä hetkellä vielä pilotointivaiheessa, eikä täyden mittakaavan laitosta ole olemassa. Prosessi on vielä kehityksessä ja optimointia erityisesti energiankulutuksen suhteen tullaan tutkimaan tulevaisuudessa. Liuotuksen jälkeistä uuttovaiheen energiankulutusta ja kemikaalikulutusta ei tässä vaiheessa prosessin kehittämistä ollut mahdollista arvioida. Typen talteenottoa strippaamalla rejektivedestä tehdään jo nykyisin Gasumilla Turussa. Se on menetelmänä jo melko vakiintunutta, mutta tulosten skaalaaminen Suomen mittakaavaan aiheuttaa epävarmuutta. Tässä työssä tehtyjä ravinteiden talteenoton elinkaarisia ilmastovaikutuksia tulee tulevaisuudessa tarkentaa erityisesti RAVITA-prosessin suhteen. Lisäksi erilaisten ravinteiden talteenottomenetelmien, kuten NPHarvest ja struviittisaostus, olisi syytä sisällyttää tarkasteluun ja vertailla niiden vaikutuksia elinkaarinäkökulmasta.

Taulukko 26. Ravinteiden talteenoton vaikutus jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn valtakunnallisiin kasvihuonekaasupäästöihin (t CO₂-ekv/vuosi) elinkaarivaiheittain

	Ravinteet talteen -skenaario	Nykytilan optimointi + Ravinteet talteen -skenaario
Typen strippaus rejektivedestä		
Prosessipäästöt jätevedenkäsittelyssä	-21 039	-24 914
Päästöt vesistöissä	-2 381	-2 820
Syötteet lietteenkäsittelyssä	+2 214	+2 476
Substituutiot: ammoniakkivesi	-8 659	-10 254
YHTEENSÄ	-29 865	-35 511
Fosforin talteenotto RAVITA-menetelmällä		
Kemikaalikulutus jätevedenkäsittelyssä	+994	+994
Energiankulutus jätevedenkäsittelyssä	-14 001	-21 624*
Prosessipäästöt lietteenkäsittelyssä	-1 243	-1 243
Syötteet lietteenkäsittelyssä	-532	-532
Kuljetus käsiteltäväksi lietteenkäsittelyssä	-186	-186
Hyödyntäminen	-570	-570
Substituutiot: fosforihappo	-5 719	-5 719
YHTEENSÄ	-21 341	-21 341
Typen ja fosforin talteenotto yhteensä	-51 206	-59 116

*sisältää jätevedenkäsittelyn energiatehokkuuden parantamisen

5.3 Tulevaisuuden tutkimustarpeita hiilineutraaliuden saavuttamiseksi

5.3.1 Metaani- ja typpioksiduulipäästöjen hallinta

Työssä tarkastelluissa päästövähennysskenaarioissa ei huomioitu toimia jätevedenkäsittelyn metaani- ja typpioksiduulipäästöjen eikä viemäriverkoston metaanipäästöjen vähentämiseksi riittämättömän tutkimustiedon vuoksi. Näiden päästöjen vaikutus on kuitenkin kokonaisuudessa suurin. Onkin tärkeää, että tutkimustietoa jätevedenkäsittelyn prosessipäästöjen ja viemäriverkostojen päästöistä tuotetaan lähitulevaisuudessa mm. mittaamalla ja päästömalleja kehittämällä. Tiedon lisääntyessä tulee asettaa selkeät suuntaviivat päästöjen vähentämiselle.

Jätevedenkäsittelyn typpioksiduulipäästöjä on tutkittu viime vuosina yhä kiihtyvällä tahdilla. Typpioksiduuli on erittäin voimakas kasvihuonekaasu ja otsonikerroista vahingoittava kaasu. Lähiaikoina on odotettavissa tarkempaa tietoa siitä, miten myös typpioksiduulipäästöihin voidaan puhdistamon toiminnalla vaikuttaa. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ilmastuksen ja liuenneen hapen määrän optimointi, ammoniakkihuippujen estäminen, nitriitin kertymisen välttäminen, riittävä hiilensaanti denitrifikaatio-prosessin loppuun saattamiseksi, pH:n pitäminen neutraalina ja mikrobipopulaation kontrollointi.

Typpioksiduulipäästöjen lisäksi huomiota tulisi tulevaisuudessa kiinnittää enemmän myös metaanipäästöjen vähentämiseen. Metaani on kasvihuonekaasu, jonka lämmittävä vaikutus ilmakehässä on suhteellisen lyhyt mutta erittäin voimakas. Ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta voimakkaiden ja lyhytikäisten kasvihuonekaasujen hillintä on erityisen tärkeää nopeiden vaikutusten kannalta. Metaanipäästöjen vähentäminen onkin yksi välittömimmistä ja tehokkaimmista ilmastonmuutoksen hillintä-strategioista (European Environment Agency 2023). Metaanipäästöjen vähentämistä tukevat mm. maailmanlaajuinen metaanisitoumus ja EU:n metaanistrategia (Euroopan komissio 2020). Maailmanlaajuinen metaanisitoumus esimerkiksi edellyttää vähentämään metaanipäästöjä 30 % vuoteen 2030 mennessä (European Commission 2021).

Jätevesisektorin on arvioitu olevan globaalisti huomattava antropogeenisten metaanipäästöjen lähde kattaen 5–8 % globaaleista metaanipäästöistä (Ocko ym. 2021). Metaanipäästöjä voidaan vähentää tehostamalla lietteenkäsittelyä ja välttämällä pitkiä lietteen välivarastointijaksoja. Metaanipäästöjen vähentämisen keinoja jätevedenkäsittelyssä tunnetaan vielä huonosti ja lisää tutkimustietoa tarvitaan. Metaania muodostuu jätevedenkäsittelyn ja lietteenkäsittelyn lisäksi huomattavia määriä myös viemäriverkostossa. Tutkimustieto viemäriverkostojen kasvihuonekaasupäästöistä on kuitenkin tois-
taiseksi vähäistä, eikä Suomen tai muiden Pohjoismaiden olosuhteista ole mittausdataa lainkaan saatavilla. Viemäriverkostojen kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin ei tällä hetkellä ole kehitetty luotettavia menetelmiä. Viimeisimmät tieteelliset tutkimukset kuitenkin arvioivat, että verkostojen kasvihuonekaasupäästöt ovat huomattavasti suurempia kuin aiemmin on oletettu (esim. Song ym. 2023). Viemäriverkostossa muodostuvia päästöjä voidaan vähentää esimerkiksi kiinnittämällä huomiota verkostojen suunnitteluvaiheessa jäteveden viipymääjan minimointiin. Viemäriverkoston kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin ja niiden vähentämisen keinoihin tulisikin panostaa tulevaisuudessa enemmän ja sisällyttää päästöt myös kansallisiin kasvihuonekaasuinventaarioihin (Song ym. 2023).

5.3.2 Siirtymä kohti energianeutraalia jätevesihuoltoa

Uudistuksen alla olevassa EU:n yhdyskuntajätevesidirektiivissä on esitetty tavoite energianeutraalista jätevedenkäsittelystä vuoteen 2040 mennessä (koskee yli 10 000 AVL laitoksia) (European Commission

2022). Epäselvää tosin vielä on, mitkä toimet energianeutraaliuuden määrittämiseen sisällytetään käytännössä. Mikäli siihen sisällytetään jätevedestä tuotettu kaukolämpö, on Suomen osalta tavoite saavutettu tässä työssä tehdyn valtakunnallisen energiataselaskelman mukaan. Vesihuolto käyttää toimintoihinsa pääosin sähköä, mutta tuottaa huomattavasti omia tarpeitaan enemmän lämpöä, jota nykyisin hyödynnetään kaukolämpönä. Potentiaalia energiantuotantoon on kuitenkin tätäkin enemmän. Jätevedestä tuotetun kaukolämmön kapasiteetti on jo nykyisellään huomattava ja sitä olisi mahdollista lisätä entisestään. Energiantuotannon potentiaalia voitaisiin kasvattaa entisestään ottamalla lämpöä talteen jäteveden lisäksi myös lietteestä sekä raaka- ja talousvedestä sekä lisäämällä aurinkopaneelien käyttöä sähkön tuotannossa. Lämmöntalteenottoa tai sähkön tuotantoa esimerkiksi aurinkopaneelilla vesihuoltolaitosten yhteydessä ei kuitenkaan tilastoida tällä hetkellä. Energianeutraaliustavoitteen saavuttamiseksi ja seuraamiseksi sekä vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen seuraamiseksi valtakunnallisesti tulisi selkeyttää Veeti-järjestelmään kirjattavien energiankulutustietojen ohjeistusta laitoksille sekä mahdollistaa tietojen kirjaaminen riittävällä tarkkuudella.

5.3.3 Lietteenkäsittelyn tutkimustarpeita

Lietteenkäsittely on jätevedenkäsittelyn ohella yksi suurimmista kasvihuonekaasupäästölähteistä vesihuollossa. Lietteenkäsittelyn päästöjen arvioiminen on kuitenkin haasteellista vaihtelevien käytäntöjen ja puutteellisten tilasto- ja seurantatietojen vuoksi. Lietteenkäsittelyssä päästöjen vähentämisen kannalta on tärkeää tehokkaiden käsittelyketjujen varmistaminen, eli minimoida kuljetukset, välivarastointiajat sekä prosessoinnissa muodostuvat kasvihuonekaasupäästöt. Jätevesilietteen mädätyksellä on useita hyötyjä kompostointiin verrattuna ja mädätyksen osuutta tulisikin tulevaisuudessa pyrkiä lisäämään. Mädätyksellä voidaan tuottaa energiaa sähkön ja lämmön tai liikennepolttoaineen muodossa. Samalla se mahdollistaa mädättämättömään lietteeseen verrattuna tehokkaamman typen talteenoton. Mädätyksen yhteydessä on kuitenkin riski metaanipäästöjen muodostumiseen tuotantoketjun eri vaiheista. Viime aikoina tehdyt tutkimukset osoittavat, että mädätyslaitosten metaanipäästöt ovat suurempia, kuin aiemmin on arvioitu (Fredenslund ym. 2023). Huomionarvoista myös on, että ulkomaisten tutkimusten mukaan jätevesilietettä mädättäviltä laitoksilta mitatut metaanipäästöt ovat keskimäärin suurempia, kuin maatalouden sivuvirtoja hyödyntäviltä biokaasulaitoksilta mitatut päästöt (Scheutz & Fredenslund 2019), mutta tutkimustietoa Suomen olosuhteista ei toistaiseksi ole saatavilla. Mädätyksen lisäksi kehitteillä on uusia lietteenkäsittelymenetelmiä, kuten pyrolyysi ja märkähiilto (HTC), joiden käyttöönoton vaikutuksia ei tässä työssä tutkittu.

Lietteenkäsittelymenetelmät vaikuttavat myös orgaanisen aineksen pysyvyyteen ja siten hiilen kiertoon. Näitä vaikutuksia ei tässä työssä arvioitu. Jatkossa tulisi tutkia, miten erilaiset lietteenkäsittelymenetelmät ja lopputuotteen hyödyntämistavat voivat maksimoida lietteen hiilivarastovaikutuksia. Tutkimustietoa tarvitaan myös siitä, onko lietteen sisältämällä haitta-aineilla vaikutusta hiilen varastoitumiseen maaperän mikrobihiilipumpun kautta (Liang ym. 2017).

5.3.4 Kiertotalous vesihuollossa

Ravinteiden tehokkaampi talteenotto ja kierrätyksen lisääminen suurilla jätevedenpuhdistamoilla ja lietteenkäsittelyssä vähentäisi koko vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä tässä työssä tehdyn skenaariotarkastelun mukaan noin 10 %. Ravinteiden talteenotolla saavutettavien hyötyjen toteutuminen edellyttää kuitenkin jätevedestä talteen otettujen ravinteiden jalostamista turvallisiksi ja käyttökelpoiksi, sekä hyväksytyiksi lannoitevalmisteiksi tai teollisuuskemikaaleiksi. Ramboll Oy:n (2023) selvityksen mukaan ravinteiden talteenotto aiheuttaa laitoksille lisäkustannuksia ja toistaiseksi se ei näytä

olevan kannattavaa liiketoimintaa, jolloin erilliset tuet ja pitkäaikaisten markkinanäkymien luonti lain-säädännön keinoin ovat välttämättömiä. Ravinteiden talteenotto ja ravinnevalmisteiden tuottaminen erityisesti jätevedenpuhdistamoilla edellyttäisi uudenlaista osaamista ja liiketoimintamallien kehittämistä. Keskitetyssä lietteenkäsittelyssä lannoitevalmisteiden jalostaminen lietteestä on tällä hetkellä pidemmällä, mutta keskitetyn käsittelyn piirissä oleva lietteen ravinnepotentialiaali on pienempi.

Tulevaisuudessa kiristyvät käsittelyvaatimukset jätevedenkäsittelyssä ja talousveden tuotannossa voivat vaikuttaa päästöjä lisäävästi. Kiristyvien vaatimusten vaikutuksia ei tässä työssä arvioitu. Tiukentuvat haitta-aineiden poistovaatimukset tulevat todennäköisesti lisäämään aktiivihiiilen käyttöä sekä talousveden tuotannossa että jätevedenkäsittelyssä. Kemikaalien käytön osalta aktiivihiihi on merkittävin ilmasto-vaikutuksia lisäävä tekijä, jonka vuoksi vaihtoehtoisten raaka-aineiden tutkimukseen tulee tulevaisuudessa panostaa. Kiristyvät käsittelyvaatimukset voivat tulevaisuudessa nostaa myös energiankulutusta, mikä pienentää energiatehokkuuden parantamisesta ja energiankäytön optimoinnista saatavia päästövähennys-hyötyjä.

Viime aikoina on tutkittu erilaisia kiertotalousmahdollisuuksia erityisesti lietteen sisältämiin arvokkaisiin ainesosiin liittyen. Ravinteiden talteenoton lisäksi lietteen sisältämää hiiltä ja metalleja voidaan erottaa lietteestä ja niistä voidaan jalostaa korkealaatuisia hiilimateriaaleja akkuihin, vedenkäsittelyyn sekä 3D-tulostukseen (LUT-yliopisto 2023). Myös mädätyksen yhteydessä muodostuvan hiilidioksidin talteenottoa sekä hyödyntämistä on tutkittu (EBA 2022). Lisäksi vetytalous tuo uusia mahdollisuuksia lietteenkäsittelylle, sillä esimerkiksi termokatalyyttisellä menetelmällä voidaan tuottaa biokaasusta vetyä sekä korkean arvoluokan hiiltä akkuteollisuuteen ja rengasteollisuuteen ja siten korvata Aasiasta tuotuja materiaaleja (Srilatha ym. 2017; Walker ym. 2018; Helsingin Sanomat 2021; Swartbooi ym. 2022).

6 Johtopäätökset ja suositukset

Tässä tutkimuksessa arvioitiin Suomen vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä ja päästövähennysmahdollisuuksia kokonaisuudessaan ensimmäistä kertaa. Tutkimuksessa tarkastellut skenaariot päästöjen vähentämiseksi osoittavat, että kansalliseen vesihuollon hiilineutraaliustavoitteeseen ei päästä ilman huomattavia päästövähennystoimia ja panostuksia niitä edistävään tutkimukseen.

6.1 Tutkimuksen johtopäätökset

Vesihuolto on koko yhteiskunnalle välttämätön toiminto. Vesihuollon eri osa-alueiden tärkeimpinä tehtävinä on varmistaa puhtaan juomaveden tuottaminen ja jakelu sekä huolehtia jätevedenkäsittelystä ja viemäröinnistä niin, että ympäristölle ja ihmisen terveydelle aiheutuu mahdollisimman vähän haittaa. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi Suomi on asettanut tavoitteeksi olla hiilineutraali vuonna 2035. Tavoite ulottuu myös vesihuoltoon, ja vesihuollolle onkin asetettu kunnianhimoinen tavoite olla hiilineutraali jo vuonna 2030 (VVY 2021).

Kokonaiskuva vesihuollon nykyisistä kasvihuonekaasupäästöistä ja hiilineutraaliutta edistävien toimien vaikuttavuudesta valtakunnallisella tasolla on puuttunut. Tässä työssä arvioitiin kokonaisuudessaan ensimmäistä kertaa Suomen vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä nykytilassa ja päästövähennysmahdollisuuksia vuoteen 2030 mennessä. Tarkastelu kattoi vesihuoltoverkostojen piirissä olevan vesihuollon. Päästövähennystoimiksi pyrittiin valitsemaan sellaisia keinoja, joilla voitaisiin vaikuttaa vesihuollon kasvihuonekaasupäästöihin valtakunnallisella tasolla ja jotka voisivat olla realistisia toteuttaa laajassa mittakaavassa. Tehty työ on tiettävästi myös ensimmäinen Pohjoismaissa ja Euroopassa tehty tutkimus, jossa vesihuollon elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä ja päästövähennyskeinoja on arvioitu kansallisesti vastaavalla laajuudella. Tässä tutkimuksessa vesihuollon hiilineutraaliustavoitteen täyttymistä tarkasteltiin työssä määritettyyn järjestelmärajaukseen pohjautuen.

Tulosten mukaan vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt vastaavat noin 1,6 % Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa raportoiduista päästöistä, ollen yhteensä noin 0,8 miljoonaa tonnia CO₂-ekv vuodessa. Valtaosa elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu jätevedenkäsittelyssä sekä lietteenkäsittelyssä muodostuvista päästöistä, joiden osuus tarkastellusta kokonaisuudesta kattaa noin 56 %. Suurin yksittäinen kasvihuonekaasupäästöjen lähde on jätevedenkäsittelyssä muodostuvat typpioksiduuli- ja metaanipäästöt (30 % koko vesihuollon päästöistä). Muita merkittäviä päästöjen lähteitä ovat energiankulutus (20 % vesihuollon päästöistä), kemikaalien kulutus (10 % vesihuollon päästöistä) ja viemäriverkostossa muodostuvat päästöt (9 % vesihuollon päästöistä). Vesihuollon osa-alueista suurimmat vaikutukset olivat jätevedenkäsittelyllä (44 %), verkostoinfran saneerauksella ja uudisrakentamisella (15 %), jäteveden siirrolla (12 %), lietteenkäsittelyllä (12 %) ja talousveden tuotannolla (10 %). Muiden tarkasteltujen osa-alueiden, vedenjakelun ja kaukolämmön- ja kylmän tuotannon, päästöt kattoivat yhteensä 6 % kaikista elinkaarista kasvihuonekaasupäästöistä.

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää laadittujen skenaariotarkastelujen mukaan noin 14–29 % vuoteen 2030 mennessä, kun substituutiot myydystä energiasta ja hyödynnettävistä ravinteista huomioidaan vältettyinä päästöinä. Substituutioiden muodostamat päästövähennykset kattavat kaikista päästövähennyksistä 3–27 %. Päästövähennystoimien vaikuttavuus vaihteli tarkasteltujen

skenaarioiden välillä. Suurimmat päästöjen vähenemät saavutettiin kuitenkin kaikissa skenaarioissa oletuksella, jonka mukaan valtakunnallisen energiantuotannon päästöt vähenevät vuoteen 2030 WEM-skenaarion mukaisesti. Vesihuoltolaitoksilla tehtävistä päästövähennystoimista merkittävimpiä olivat ravinteiden talteenotto ja kierrätys, kaukolämmön tuotanto jätevedestä, energiankulutuksen vähentäminen sekä kemikaalikulutuksen tarkentaminen.

Työssä tarkastellut päästövähennystoimet eivät olleet riittäviä vuoden 2030 hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisen kannalta. Tarkastellut toimet ovat kuitenkin käytännössä mahdollisia toteuttaa ja niiden edistäminen onkin tärkeää, sillä suurimpien päästölähteiden, eli typpioksiduuli- ja metaanipäästöjen, pienentämiseen ei toistaiseksi ole selkeitä keinoja. Vaikka suurimmat päästöjen vähenemät saavutettiin skenaariotarkastelussa valtakunnallisen energiantuotannon päästöjen pienemisellä, ei vesihuollon päästövähennystyötä kuitenkaan voida ulkoistaa energiasektorille, vaan vesihuollon on tehtävä niitä päästövähennystoimia, jotka ovat vesihuoltolaitoksista riippuvaisia. Hiilineutraaliustavoitteen saavuttamista tukemaan tarvitaankin lisää tutkimusta ja mittaustietoa suurimmista päästölähteistä sekä systemaattisen päästöjen seurannan kehittämistä valtakunnallisesti.

Vesihuollolla on myös muita ympäristövaikutuksia, kuten rehevöityminen, haitta-aineet ja vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen. Ilmastovaikutusten rinnalla tulisi arvioida vesihuollon kokonaiskestävyyttä huomioiden myös muut siihen vaikuttavat tekijät. Vesihuollon päästövähennystoimet tulee suunnitella huolella ottaen huomioon koko vesihuoltoketju elinkaarinäkökulmasta ja mahdolliset ristikkäisvaikutukset muiden ympäristövaikutusten kanssa.

6.2 Suositukset vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi

Tavoitteiden selkeyttäminen ja vaikutusten seuraaminen

- Vesihuollon hiilineutraaliustavoitteen ja sen rajauksen tarkentaminen ja täsmentäminen. Tavoitteen tarkentamista, täsmentämistä ja saavuttamista tukemaan tarvitaan esimerkiksi valtakunnallinen tiekartta tai strategia päästöjen vähentämiseksi, lisää tutkimustietoa, panostuksia tiedon keruuseen ja tilastointiin, sekä systemaattisen päästöjen seurannan kehittämistä valtakunnallisesti (mukaan lukien valtakunnallisen kasvihuonekaasuinventaarion tarkentaminen vesihuollon päästöjen osalta).
- Veeti-järjestelmän kehittäminen. Veeti-järjestelmässä energiankulutustietojen kirjaaminen tulee mahdollistaa vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen seurantaa tukevalla tarkkuudella.
- Hiilineutraaliustavoitteen jalkauttaminen vesihuollossa osa-alueittain ja huomioiminen strategiatyössä (mm. tuleva lietestrategia).
- Haja-asutuksen vesihuollon kasvihuonekaasupäästöjen ja päästövähennystoimien selvittäminen ja tavoitteiden asettaminen.

Tutkimustiedon ja mallinnustyökalujen tuottaminen

- Typpioksiduulipäästöjen mittaaminen suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla pitkällä aikavälillä sekä päästövähennyskeinojen kartoittaminen ja niiden käyttöönoton edistäminen ja vaikutusten seuraaminen. Selkeiden suuntaviivojen asettaminen päästöjen vähentämiselle.

- Viemäriverkostossa, jätevedenkäsittelyssä sekä lietteenkäsittelyssä muodostuvien metaanipäästöjen tutkiminen ja mallinnusmenetelmien kehittäminen sekä päästövähennystoimien tutkiminen ja edistäminen (taustalla sitoumukset ja mm. metaanistrategia). Tavoitteena tulisi olla päästöjen sisällyttäminen kansalliseen kasvihuonekaasuinventaarioon.
- Erilaisten ravinteiden talteenottomenetelmien ja lietteenkäsittelymenetelmien sekä käsitellyn lietteen loppukäytön skenaarioiden (maatalous/viherrakentaminen) tarkastelu elinkaarinäkökulmasta (sisältäen vaikutukset hiilitaseisiin ja orgaanisen aineen säilymiseen).
- Kiertotalouden edistämisen mahdollisuuksien tutkiminen ja potentiaalin selvittäminen jäteveden- ja lietteenkäsittelyn yhteydessä. Mm. arvokkaiden metallien ja hiilen talteenotto ja jalostaminen teollisuuden käyttöön, vetytalouden mahdollisuudet ja hiilidioksidin talteenotto.
- Verkostoinfran elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen tutkiminen (maankäytön vaikutukset huomioiden) sekä vuotovesien vähenemisen vaikutusten arviointi.
- Kaukolämmön tuotantopotentiaali jäteveden hukkalämmöstä – valtakunnallinen tarkastelu sekä muiden vesihuollon hukkalämpökohteiden kartoittaminen.
- Aktiivihiilen korvaaminen vähäpäästöisemmillä materiaaleilla.

Laitoskohtaisia toimia

- Biokaasutuotannon lisääminen, prosessien ja ravinteiden talteenoton tehostaminen, sekä kestävien käytäntöjen edistäminen biokaasun tuotannossa (mm. metaanivuotojen vähentäminen), lämmön talteenotto jätevesistä ja muista toiminnoista, kemikaalien käyttömäärien optimointi, energiatehokkuuden parantaminen ja energiankäytön optimointi sekä aurinkosähkön tuottaminen.
- Laitoskohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen arviointi ja seuranta sekä päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi.

Lähteet

- Adouani, N., Limousy, L., Lendormi, T. & Sire, O. 2015. N₂O and NO emissions during wastewater denitrification step: influence of temperature on the biological process. *Comptes Rendus Chime* 18: 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2014.11.005>
- AFRY Finland Oy. 2021. Puhdistamolietteen termisten käsittelymenetelmien hiilijalanjälki. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 61. https://www.vvy.fi/site/assets/files/6494/vvy_lietteen_termisten_kasittelymenetelmien_hiilijalanjalki_2021-02-23.pdf
- Alhola, K. & Seppälä, J. 2014. Hiilineutraalisuus käsitteenä. Julk.: Seppälä, J. (toim.). Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Suomen ilmastopaneeli. S. 8–43. https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Hiilineutraalisuus_tastaraportit_2014.pdf
- Awaitey, A. 2020. Carbon footprint of Finnish Wastewater Treatment Plants. Aalto-yliopisto, Espoo. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202101311753>
- Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S. & Muller, J. 2018. Ammonia and methane emissions during drying of dewatered biogas digestate in a two-belt conveyor dryer. *Bioresource Technology* 247: 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.099>
- Bakkaloglu, S., Lowry, D., Fisher, R.E., France, J.L., Brunner, D., Chen, H. & Nisbet, E.G. 2021. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. *Waste Management* 124: 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.011>
- Barillon, B., Canler, J. P., Gourdon, R., Le Hyaric, R. & Naquin, P. 2009. Characterization of screenings from three municipal wastewater treatment plants in the Region Rhone-Alpes. *Water Science & Technology* 60(2): 525–531. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.391>
- Bengtsson, S., Fujii, D., Arnell, M., Andersson, S., Carlsson, B., Held, H. & Gustavsson, D. 2019. Effektiv luftning – Design, drift, underhåll och upphandling av luftningsutrustning för kommunala avloppsreningsverk. Svensk Vatten AB, Tukholma. Rapport Nr 2019–23. <https://www.svenskvatten.se/contentassets/cb70c3482f844c56b5c2a109136a5a6e/srt-19-ab23.pdf>
- Brandão, M., Milà i Canals, L. & Clift, R. 2011. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: implications for GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass Bioenergy* 35: 2323–2336. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.019>
- Celestina, C., Hunt, J.R., Sale, P.W.G. & Franks, A. E. 2019. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil and Tillage Research* 186: 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.002>
- 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: 116168. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116168>
- Chen, X., Mielczarek, A.T., Habicht, K., Andersen, M.H., Thornberg, D. & Sin, G. 2019. Assessment of full-scale N₂O emission characteristics and testing of control concepts in an activated sludge wastewater treatment plant with alternating aerobic and anoxic phases. *Environmental Science & Technology* 53 (21): 12485–12494. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04889>
- Chenu, C., Angers, D.A., Barre, P., Derrien, D., Arrouays, D. & Balesdent, J. 2019. Increasing organics stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188: 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Clemens, J & Haas, B. 1997. Nitrous oxide emissions in sewer systems. *Clean Soil Air Water* 25(2): 96–99. <https://doi.org/10.1002/aheh.19970250207>
- CO2data. 2023. Infrarakentamisen päästötietokanta. <https://co2data.fi/infra/> [Viitattu 25.5.2023.]
- de Foy, M., Schauer, J., Lorente, A. & Borsdorff, T. 2023. Investigating high methane emissions from urban areas detected by TROPOMI and their association with untreated wastewater. *Environmental Research Letters* 18(4): 044004. DOI 10.1088/1748-9326/acc118

- Defratyka, S. M., Paris, J.-D., Yver-Kwok, C., Fernandez, J. M., Korben, P. & Bousquet, P. 2021. Mapping urban methane sources in Paris, France. *Environmental Science & Technology* 55 (13): 8583– 8591. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00859>
- Duan, H., Zhao, Y., Koch, K., Wells, G.F., Weißback, M., Yuan, Z. & Ye, L. 2021. Recovery of Nitrous Oxide from Wastewater Treatment: Current Status and Perspectives. *ACS EST Water* 1(2): 230-250. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00140>
- EBA. 2022. Biogenic CO₂ from the biogas industry. A mature business opportunity to enhance sustainable carbon cycles and untap the circularity and climate benefits of biogas production. European Biogas Association. Belgium. [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/10/Biogenic-CO₂-from-the-biogas-industry_Sept2022-1.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/10/Biogenic-CO2-from-the-biogas-industry_Sept2022-1.pdf)
- Ecoinvent. 2021. Ecoinvent v3 database. Versio 3.8 2021.
- Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Marin, D., Amores, M. J., Aldea, X., Rieradevall, J. & Gabarrell, X. 2015. Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: a review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3(3): 2084–2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>
- EnviDan. 2022. The Road Towards a Nordic Climate Neutral Water Sector. A Cooperation Of The Nordic Water Associations: DANVA – Danish Water and Wastewater Association, FIWA – Finnish Water Utilities Association, Norwegian Water, Swedish Water and Wastewater Association. EnviDan, September 2022. <https://www.danva.dk/media/8868/14-09-2022-the-road-towards-a-nordic-climate-neutral-water-sector.pdf>
- Ervasti, S., Winquist, E. & Rasi, S. 2018. Typen talteenotto lantaperäisestä nesteestä – tekninen toteutettavuus ja prosessin kannattavuusarviointi. Luonnonvarakeskus, Helsinki. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2018. https://ju-kuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/541453/luke-luobio_4_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Euroopan komissio. 2020. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. EU:n strategia metaanipäästöjen vähentämiseksi. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52020DC0663> [Julkaistu 14.10.2020.]
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2020/2184/EU, annettu 16 päivänä joulukuuta 2020, ihmisten käyttöön tarkoitetun veden laadusta, Euroopan unionin virallinen lehti L435/1–62.
- European Commission. 2021. Launch by United States, the European Union, and Partners of the Global Methane Pledge to Keep 1.5C Within Reach. Statement 21/5766. Brussels, 2 November 2021. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_21_5766
- European Commission. 2022. Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-revised-urban-wastewater-treatment-directive_en [Julkaistu 26.10.2022.]
- European Environment Agency. 2023. Methane emissions in the EU: the key to immediate action on climate change. <https://www.eea.europa.eu/publications/methane-emissions-in-the-eu/methane-emissions-in-the-eu> [Päivitetty 26.4.2023.]
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz M. & Van Dorland, R. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Julk.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (toim.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Fredenslund A.M., Hinge, K., Holmgren, M.A., Rasmussen, S.G. & Scheutz, C. 2018. On-site and ground-based remote sensing measurements of methane emissions from four biogas plants: A comparison study. *Biore-source Technology* 270: 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.080>
- Fredenslund, A.M., Gudmundsson, E., Falk, J.M. & Scheutz, C. 2023. The Danish national effort to minimize methane emissions from biogas plants. *Waste Management* 157: 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.035>

- Gruber, W. & Joss, A. 2021. Off-gas monitoring system for wastewater treatment. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://doi.org/10.25678/0003WD>
- 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: 100122. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100122>
- Gutierrez, O., Duan, H., Wu, Z. & Sharma, K. R. 2022. Mechanisms, source, and factors that affect methane emissions. Julk: Ye, L., Porro, J. & Nopens, I. (toim.). Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. IWA Publishing. Scientific and Technical Report Series No. 26. S. 43–62. <https://doi.org/10.2166/9781789060461>
- GWl. 2022. Mapping water's carbon footprint: Our net zero future hinges on wastewater. Global Water Intelligence. [Julkaistu: 14.11.2022.]
- Haapakoski, J. 2022. Vesihuollon verkostosaneerausten hiilijalanjäljen pienentäminen. Tampereen yliopisto, Tampere. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202205185075>
- Haimi, H. & Antikainen, J. 2023. Projektipäällikkö, projektijohtaja, FCG. Haastattelu 27.2.2023.
- Havukainen, J., Saud, A., Astrup, T. F., Peltola, P. & Horttanainen, M. 2022. Environmental performance of dewatered sewage sludge digestate utilization based on life cycle assessment. *Waste Management* 137: 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.005>
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik, P. & Regina, K. 2021. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. *Carbon Management* 12 (4): 359–376. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1947386>
- Helsingin Sanomat. 2021. Suomalaisten siivu vetybuumista. <https://www.hs.fi/visio/art-2000008346218.html> [Päivitetty 1.11.2021.]
- Hilander, H. 2022. Nitrous oxide emission dynamics and emission factors of two Finnish wastewater treatment plans. Aalto-yliopisto, Helsinki. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202210165895>
- Horttanainen, M., Deviatkin, I. & Havukainen, J. 2017. Nitrogen release from mechanically dewatered sewage sludge during thermal drying and potential for recovery. *Journal of Cleaner Production* 142 (4): 1819–1826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.102>
- HSY. 2013. Mädätys HSY:n jätevedenpuhdistamoilla. Seminaariesitys, Määdätyksen rakenne- ja laitetekniikkaseminaari 15.10.2013. https://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Tommi_Fred_HSY.pdf [Viitattu 22.6.2023.]
- HSY. 2017. Koekohde ravinteiden talteenottoon jätevedestä ja lietteenkuivauksen rejektistä. RAVITA-DEMO -koekohde jätevedenpuhdistamon ravinnevirtojen talteenottoon. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä.
- HSY. 2018. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2017 - Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. HSY:n julkaisu.
- HSY. 2019. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2018 – Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. HSY:n julkaisu 3/2019. <https://julkaisu.hsy.fi/jatevedenpuhdistus-paakaupunkiseudulla-2018.html> [Viitattu 2.8.2023.]
- HSY. 2021. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2020 – Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. HSY:n julkaisu 3/2021. <https://julkaisu.hsy.fi/jatevedenpuhdistus-paakaupunkiseudulla-2020.html> [Viitattu 2.8.2023.]
- HSY. 2022. Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2021 – Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. HSY:n julkaisu 3/2022. <https://julkaisu.hsy.fi/jatevedenpuhdistus-paakaupunkiseudulla-2021.html> [Viitattu 2.8.2023.]
- HSY. 2023. Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn. <https://www.hsy.fi/jatevesilampo/> [Viitattu 2.5.2023.]

- Huber Technology. 2023. Energy-efficient sewage sludge drying at Innsbruck with HUBER Belt Dryer BT. <https://www.huber.de/huber-report/ablage-berichte/sludge-treatment/energy-efficient-sewage-sludge-drying-at-innsbruck-with-huber-belt-dryer-bt.html> [Viitattu 29.5.2023.]
- Huoltovarmuusorganisaatio. 2020. Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen Suomen vesihuollossa. Kansallinen selvitys lyhyen ja pitkän aikavälin vaihtoehtoista. https://www.vvy.fi/site/assets/files/3226/kemiallisen_saostuksen_huoltovarmuuden_parantaminen.pdf [Viitattu: 4.7.2022.]
- Härkki, H. 2023. Vedenpuhdistuksen yksikönpäällikkö, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. Haastattelu 10.3.2023.
- Ilmastolaki 423/2022, annettu Naantalissa ja Helsingissä 10.6.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423>
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- ISO 14040. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Standardisation Organisation, European Committee for Standardization, Brussels.
- ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Standardisation Organisation, European Committee for Standardization, Brussels.
- ISO 14067. 2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification. International Standardisation Organisation, European Committee for Standardization, Brussels.
- Jin, P., Gu, Y., Shi, X. & Yang, W. 2019. Non-negligible greenhouse gases from urban sewer system. Biotechnology for Biofuels 12: 100. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1441-8>
- Jortikka, J. 2016. Jäteveden siirtopumppauksen energiatehokkuuden kehittäminen. Turun ammattikorkeakoulu, Turku. Opinnäytetyö. https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/wp-content/uploads/2019/03/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6_Janne_Jortikka-ID-19771.pdf
- Jortikka, J. 2023. Jätevedenpuhdistamon ilmastusprosessin energiatehokkuuden parantaminen uuden kompressorin avulla. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto, Lappeenranta. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023022828871>
- Kettunen, R. 2023. Tuotantojohtaja, Tampereen Vesi Liikelaitos, Tampere. Haastattelu 27.2.2023.
- Kinnarinen, T. 2022. Lietekierto-hankkeen loppuraportti. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Lappeenranta. LUT Scientific and Expertise Publications, Research reports 119/2022.
- Kinnunen, O. 2021. Study of microbial population involved in nitrogen removal and nitrous oxide emission at wastewater treatment plants. Aalto-yliopisto, Espoo. Diplomityö <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202201301529>
- Kinnunen, V., Kymäläinen, M., Tiainen, S., Koskela, O., Honkasaari, M., Järvi, S., Kunttu, I., Somersalo, V., Vartiainen, P., Alhonoja, K., Karjala, R., Alarotu, M. & Mykkänen, E. 2023. Jäteveden ravinteet keskittäen kiertoon (Järkki). Gasum Oy ja Hämeen ammattikorkeakoulu (HAMK). VN/24341/2020 – Loppuraportti rahoittajalle.
- Konttinen, T. 2013. Pohjavedenkäsittelylaitosten prosessit ja tehostamistarpeet Itä-Suomessa. Savonia Ammattikorkeakoulu. Kuopio. Opinnäytetyö.
- Koppanen, M. 2018. Aktiivihiilisuodatus talousveden tuotannossa. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201808142141>
- Kosonen, H., Heinonen, M., Mikola, A., Haimi, H., Mulas, M., Corona, F. & Vahala, R. 2016. Nitrous Oxide Production at a Fully Covered Wastewater Treatment Plant: Results of a Long-Term Online Monitoring Campaign. Environmental Science and Technology 50 (11): 5547–5554. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04466>
- Kouvolan Vesi Oy. 2022. Mäkilän jätevedenpuhdistamon jätevedenkäsittelyn energiatehokkuus. RAKI hankkeen loppuraportti.
- Kumlin, K., Thu Tran Mihn, A. & Helle, T. 2021. Selvitys vesihuoltolaitosten palvelujen tuottamistavoista, lietteen käsittelystä sekä vesiliiketoiminnan viennistä. Etelä-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 9/2021. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-314-908-3>

- Kuokkanen, A. 2023. Projektipäällikkö, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, Helsinki. Haastattelu 16.3.2023.
- Kuokkanen, A., Blomberg, K., Mikola, A. & Heinonen, M. 2021. Unwanted mainstream nitrification–denitrification causing massive N₂O emissions in a continuous activated sludge process. *Water Science and Technology* 83(9): 2207–2217. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.127>
- Kuokkanen, A. & Stapf, M. 2021. Applying the CWPharma Guideline for advanced API removal – Feasibility study for Viikinkaari WWTP. CWPharma 2, clear water from pharmaceuticals. https://projects.au.dk/fileadmin/www.waterpurification.au.dk/CWP2_GoA2_2_Feasibility_study_VKM_final.pdf [Viitattu 28.4.2023]
- Kuronen, M. 2014. Energiatehokkuuden parantaminen talousveden jakelussa. Aalto-yliopisto, Espoo. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201412243324>
- Kuulas, A., Renko, T. & Kuivamäki, R. 2020. Vesihuollon investointitarpeet vuoteen 2040. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 63. https://www.vvy.fi/site/assets/files/5239/vesihuollon_investointitarpeet_vvy_10092020_final.pdf
- Kyung D., Dongwook, K., Nosuk, P. & Woojin, L. 2013. Estimation of CO₂ emission from water treatment plant – Model development and application. *Journal of Environmental Management* 131: 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.019>
- Kähkönen E. 2023. Aluemyyntipäällikkö, Kemira. Haastattelut 27.2.2023 ja 21.3.2023.
- Laakso, T., Vahala, R. & Dubovik, M. 2018. Vesihuoltoverkostojen kunnon ja saneeraustarpeen arviointi. Julk.: Berninger, K., Laakso, T., Paatela, H., Virta, S., Rautiainen, J., Virtanen, R., Tynkkynen, O., Piila, N., Dubovik, M. ja Vahala, R. (toim.). Tulevaisuuden kestävä vesihuolto – ennakointi, ohjaus ja järjestäminen. Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 56/2018. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-607-2>
- Laanti, J. & Malmikare, E. 2023. Laatu- ja ympäristöpäällikkö, sähkökäytönjohtaja, Turun seudun puhdistamo, Turku. Haastattelu 9.3.2023.
- Lahti, H., Vieno, N. & Kaunisto, T. 2011. Talousveden käsittelykemikaalit ja standardisointi. Vesi-Instituutti WANDER, Rauma. Vesi-Instituutin raportteja 3. <https://www.samk.fi/wp-content/uploads/2016/06/20110302raporttikansi.pdf> [Viitattu 11.4.2023]
- Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S. 2014. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 3/2014. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/43199>
- Laitinen, A. & Wallin, A. 2022. Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa. Teknologian tutkimuskeskus VTT OY. VTT tutkimusraportti VTT-R-00582–22. https://www.hsy.fi/globalassets/ymparistotieto/projektisivustot-ja-hanke-esittelyt/tiedostot/jatevesilampo/vtt_tutkimusraportti_tp1_230622.pdf [Viitattu 2.5.2023]
- Lam, K. L., Zlatanovic, L. & van der Hoek, J. P. 2020. Life cycle assessment of nutrient recycling from wastewater: A critical review. *Water Research* 173: 115519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115519>
- Lapinlampi, T. 2021. Vesihuoltolaitokset 1970–2014. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 21 | 2021. <http://hdl.handle.net/10138/329025>
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/47694/978-951-39-3075-2.pdf?sequence=2>
- Lehtoranta, S., Laukka, V., Vidal, B., Heiderscheidt, E., Postila, H., Nilivaara, R & Herrmann, I. 2022a. Circular Economy in Wastewater Management – The Potential of Source-Separating Sanitation in Rural and Peri-Urban Areas of Northern Finland and Sweden. *Frontiers in Environmental Science* 10: 804718. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.804718>
- Lehtoranta, S., Malila, R., Fjäder, P., Laukka, V., Mustajoki, J. & Äystö, L. 2021. Jätevesien ravinteet kiertoön turvallisesti ja tehokkaasti. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 18/2021. <http://hdl.handle.net/10138/328632>

- Lehtoranta, S., Malila, R., Särkilahti, M. & Viskari, E.-L. 2022b. To separate or not? A comparison of wastewater management systems for new city district of Hiedanranta, Finland. *Environmental Research* 208: 112764. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112764>
- Lemos, D., Dias, A.C., Gabarrell, X. & Arroja, L. 2013. Environmental assessment of an urban water system. *Journal of Cleaner Production* 54: 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.029>
- Liang, C., Schimel, J. P. & Hastrow, J. D. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology* 2: 17105. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Clemens, J., Hafermann, C., Friehe, J. & Weiland, P. 2013. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. *Water science and technology* 67(6): 1370–1379. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.005>
- Linjama, J. 2021. Jätevedenpuhdistamot ja vesilaitokset energiatehokkaiksi. Canemure best practices 1.7.2021. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Saatavilla: https://issuu.com/suomenymparistokeskus/docs/canemure_jatevedenpuhdistamot_verkkoon_01_07_2021?fr=sYzI1ODM5MjMwNjM [Viitattu 5.6.2023.]
- Liu, Y., Ni, B.-J., Sharma, K. & Yuan, Z. 2015. Methane emission from sewers. *Science of the Total Environment* 524–525: 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.029>
- Lu, H., Matthews, J. & Iseley, T. 2020. How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production* 261: 121215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121215>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Rasi, S., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Winqvist, E., Lång, K., Timonen, K. & Silfver, T. 2023. Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>
- LUT-yliopisto. 2023. Lietteen roolin vahvistaminen kiertotaloudessa. <https://www.lut.fi/fi/projektit/lietteen-roolin-vahvistaminen-kiertotaloudessa> [Viitattu 14.8.2023.]
- Maktabifard, M., Awaitey, A., Merta, E., Haimi, H., Zaborowska, E., Mikola, A. & Makinia, J. 2022. Comprehensive evaluation of the carbon footprint components of wastewater treatment plants located in the Baltic Sea region. *Science of the Total Environment* 806: 150436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150436>
- Malmikare, E. 2023. Lyhyt yhteenveto Kakolan jätevedenpuhdistamon energioista. Turun seudun puhdistamo Oy. (Ei julkaistu).
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Tur-tola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppi, J., Koskiahio, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. & Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvarakeskus, Helsinki. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. http://ju-kuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/540214/luke-luobio_45_2017.pdf?sequence=12
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.191>
- Meriläinen, T. 2021. Hukka- ja ympäristölämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkoissa. Kooste Suomen ympäristökeskuksen keväällä 2021 toteuttaman kyselyn tuloksista. <file:///D:/Users/E1007882/Downloads/Hukka-%20ja%20ymparistolampokysely%20yhteenveto%202021-05-17.pdf> [Viitattu 2.5.2023]
- Mikola, A., Heinonen, M., Kosonen, H., Leppänen, M., Rantanen, P. & Vahala, R. 2014. N₂O emissions from secondary clarifiers and their contribution to the total emissions of the WWTP. *Water Science and Technology* 70(4): 720–728. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.281>
- MMM. 2022. Vesitalousstrategia 2030. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisu 2022:1. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163938/MMM_2022_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Viitattu 5.6.2023.]
- Moore, D., Li, N., Wendt, L., Castaneda, C., Falinski, M., Zhu, J.-J., Song, C., Ren, Z. & Zondlo, M. 2023. Underestimation of sector-wide methane emissions from United States wastewater treatment. *Environmental*

Science & Technology 57(10): 4082–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05373?urlap-pend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>

- Motiva. 2011. Energiatohokkaat pumpput. Opas energiatoikkaiden pumppujen hankintaan ja pumppausjärjestelmän energiatoikkisuuden parantamiseen. Motiva, Helsinki. https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatohokkaat_pumput.pdf [Viitattu 6.6.2023.]
- Motiva. 2018. Energiatohokas vesihuoltolaitos. https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/vesihuoltolaitos [Viitattu 19.5.2023.]
- Mölsä, K. 2019. Life cycle assessment of a wastewater treatment and a sludge handling process – current state and future scenarios. Aalto yliopisto, Espoo. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202001261830>
- Nevalainen, M. 2023. Avainasiakaspäällikkö, Nordkalk. Sähköposti 25.4.2023.
- Niemeläinen, T. 2021. Saneerattujen jätevedenpumppaamojen pumppujen kustannus- ja energiasäästöt Joensuu alueella. Karelia ammattikorkeakoulu, Joensuu. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021060313989>
- Nissinen, P., Seppälä, P., Kämäräinen, K., Aurola, A-M., Herttuainen, J., Anttonen, E. & Nevala, M. 2023. Vesihuoltolaitoksen ilmastotyökalut. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 83. https://www.vvy.fi/site/assets/files/7592/vesihuoltolaitoksen_ilmastotyokalut_x-1.pdf
- Ocko, I. B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, A. N., Pacala, S. W., Mauzerall, D. L., Xu, Y., & Hamburg, S. P. 2021. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. Environmental Research Letters 2021, 16(5): 054042. DOI: 10.1088/1748-9326/abf9c8
- Pakarinen, K. 2023. Liiketoiminnan kehitys, Xylem Oy. Sähköposti 15.5.2023.
- Paukkunen, M. 2023. Liiketoimintajohtaja, Flowplus Oy. Sähköposti 12.5.2023.
- Peng, L., Ni, B., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.01.021>
- Pillot, J., Catel, L., Renaud, E., Augeard, B. & Roux, P. 2016. Up to what point is loss reduction environmentally friendly?: The LCA of loss reduction scenarios in drinking water networks. Water Research 104: 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.025>
- Ramboll Finland Oy. 2023. Yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenoton menetelmäselvitys raportti. Ympäristöministeriö. https://ym.fi/documents/1410903/73050749/Yhdyskuntien+j%C3%A4tevesien+ravinteiden+talteenoton+menetelm%C3%A4selvitys_raportti+28.4.2023.pdf/07a08a7f-713b-3160-2534-fa65c8d65f6c/Yhdyskuntien+j%C3%A4tevesien+ravinteiden+talteenoton+menetelm%C3%A4selvitys_raportti+28.4.2023.pdf?t=1683646440065 [Viitattu 5.6.2023.]
- Reinelt, T., Delre, A., Westerkamp, T., Holmgren, M. & Liebetrau, J. 2017. Comparative use of different emission measurements to determine emissions from a biogas plant. Waste Management 68: 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.053>
- Reinelt, T., McCabe, B.K., Hill, A., Harris, P., Baillie, C. & Liebetrau, J. 2022. Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. Waste Management 137: 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012>
- Rintala, J. & Britschgi, R. 2023. Pohjavedenottamot ja rantaimetyminen. (Tulossa).
- Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P. 2020. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> [Viitattu 5.6.2023.]
- Ronkainen, J. 2016. Vuotovesien merkitys jätevesihuollossa. LUT-yliopisto, Lappeenranta. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2016052312619>
- Rontu, M. 2018. Suomen putkisanerausmarkkinat tällä hetkellä ja lähivuosien kehitys. Vesihuolto 2018 ja FiSTT:n kolmas vuosikonferenssi 24.5.2018.

- Rossi, L., Reuna, S., Fred, T. & Heinonen, M. 2018. RAVITA technology – new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery. *Water Science and Technology* 78(12): 2511–2517. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.011>
- ROTI. 2019. Rakennetun omaisuuden tila 2019. https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti_2019_raportti.pdf [Viitattu 22.6.2023.]
- Salminen, J., Määttä, K., Haimi, H., Maidell, M., Karjalainen, A., Noro, K., Koskiahho, J., Tikkanen, S. & Pohjola J. 2022. Water-smart circular economy – conceptualisation, transitional policy instruments and stakeholder perception. *Journal of Cleaner Production* 334: 130065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130065>
- Salminen, J., Määttä, K., Noro, K., Raatikainen, J., Maidell, M., Haimi, H., Pohjola J., Horne, P., Karjalainen, A. & Junttila, V. 2021. Vesiviisaan bio- ja kiertotalouden kannusteet. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:9. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-832-8>
- Salo, H. 2017. A life cycle assessment of potable water treatment plant. Aalto-yliopisto, Espoo. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201712188059>
- Sandelin, M. 2021. Jätevedenpuhdistamon energiatehokkuuden kehittäminen. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Pori. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202201211563>
- Scheutz, C. & Fredenslund, A.M. 2019. Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. *Waste Management* 97: 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>
- Selonen, S., Maunuksela, L., Palojarvi, A., Johansson, A., Kauppi, S., Räisänen, M., Sillanpää, M., Turja, R., Peltomäki, K. & Dahlbo, H. 2023. Mikromuovit maatalousmaassa – päästöt, vaikutukset ja vähentäminen. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 21/2023. <http://hdl.handle.net/10138/359639>
- Seppälä, J., Alestalo, M., Ekholm, T., Kulmala, M. & Soimakallio, S. 2018. Hiilineutraalisuuden tavoittelu – mitä se on missäkin yhteydessä. Suomen ilmastopaneeli. <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Hiilineutraalisuuden-tavoittelu-mita-se-on-missakin-yhteydessa.pdf>
- Seppälä, J., Saikku, L., Soimakallio, S., Lounasheimo, J., Regina, K. & Ollikainen, M. 2019. Hiilineutraalius ilmastopolitiikassa – valtiot, alueet ja kunnat. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 5a/2019. https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/09/Hiilineutraalius_ilmastopaneeli_2019_FINAL.pdf
- Sieranen, M. 2023. Nitrous oxide emissions at three Finnish wastewater treatment plants – Mechanisms behind nitrous oxide emissions and potential of process modelling in emission quantification. Aalto-yliopisto, Helsinki. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202305213332>
- Sitra. 2021. Missä mennään kuntien ilmasto- ja luontotyössä? Sitra, Helsinki. Sitran selvityksiä 190. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2021/05/sitra-missa-mennaan-kuntien-ilmasto-ja-luontotyossa.pdf>
- Slagstad, H. & Brattebo, H. 2014. Life cycle assessment of the water and wastewater system in Trondheim, Norway – A case study. *Urban Water Journal* 11(4): 323-334. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.795232>
- Soimakallio, S. 2020. Specific emissions for district heat, district cooling and electricity used in buildings. <https://co2data.fi/reports/REPORT-ENERGY-SERVICE-02022021.pdf> [Viitattu 2.6.2023.]
- Song, C., Zhu, J.-J., Willis, J. L., Moore, D. P., Zondlo, M. A. & Ren, Z. J. 2023. Methane emissions from Municipal Wastewater Collection and Treatment Systems. *Environmental Science & Technology* 57(6):2248-2261. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04388>
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laadusta ja valvonnasta sekä rakennusten vesilaitteistojen riskienhallinnasta 1352/2015, annettu Helsingissä 17.11.2015. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2015/20151352>
- Spérandio, M., Lang, I., Sabha, F., Nerenberg, R., Vanrolleghem, P., Domingo-Félez, C., Smets, B.F., Duan, H., Ni, B. & Yuan, Z. 2022. Modelling N2O production and emissions. Julk.: Ye, L., Porro, J. ja Nopens, I. (toim.). Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. Scientific and Technical Report Series No. 26. IWA Publishing, London. <https://doi.org/10.2166/9781789060461> S. 167-196.

- Srilatha, K., Bhagawan, D., Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. 2017. Sustainable fuel production by thermocatalytic decomposition of methane – A review. *South African Journal of Chemical Engineering* 24: 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.10.002>.
- Statistics Finland. 2022. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2020. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. <https://unfccc.int/documents/461893>
- Su, Q., Domingo-Félez, C., Zhang, Z., Blum, J.-M., Jensen, M.M. & Smets, B.F. 2019. The effect of pH on N₂O production in intermittently-fed nitrification reactors. *Water Research* 156: 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.015>
- Swartbooi, A., Kapanji-Kakoma, K. & Musyoka, N. 2022. From biogas to hydrogen: A Techno-Economic study on the production of turquoise hydrogen and solid carbons. *Sustainability* 14(17):11050. <https://doi.org/10.3390/su141711050>
- Särkiniemi, P. 2023. CEO/Partner, Flowplus Oy. Sähköposti 12.5.2023.
- Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E., Rahtola, M. & Heinonen, S. 2018. Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuotajille. Luonnonvarakeskus, Helsinki. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2018. https://ju-kuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/542240/luke-luobio_37_2018_2X.pdf?sequence=8&isAllowed=y
- TEM. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto – ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2022:53. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>
- Tihinen, H., Ahonen, M., Huntus, E., Pirilä, M., Kuivamäki, R., Vilpanen, M., Ristimäki, J., Ijäs, M. & Herttuainen, J. 2023. Kiertotalous vesihuollossa. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 84. https://www.vvy.fi/site/assets/files/7633/kiertotalous_vesihuollossa_17022023.pdf
- Tilastokeskus. 2014. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla syntyvän lietteen käsittely vuosina 1998–2012. Ympäristötilasto, Vuosikirja 2014. https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/ymparistotilasto2014/data/liettesij.xls
- Tilastokeskus. 2021a. Biokaasukyselyn yksikköaineisto vuosilta 2020–2021. Luovutettu tutkimuskäyttöön. 19.12.2022. Jouko Petäjä, Syke.
- Tilastokeskus. 2021b. Tilastokeskuksen tuottama aineisto Suomen ympäristökeskukselle jätevedenpuhdistamoliitteitä koskevan direktiivin (86/278/EEC) raportointia varten. Luovutettu tutkimuskäyttöön 11.4.2023. Kirsi Merilehto, Syke.
- Tilastokeskus. 2021c. Energianhankinta ja kulutus – Biokaasun tuotanto ja kulutus laitostyypeittäin 2017-2022. https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_127t.px
- Tilastokeskus. 2022. Liikenteen energiankulutus 2018–2020. https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12sz.px [Viitattu 22.6.2023.]
- Tilastokeskus. 2023a Polttoaineluokitus. https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html [Viitattu 22.6.2023.]
- Tilastokeskus. 2023b. Päästökerroin. <https://www.stat.fi/meta/kas/paastokerroin.html> [Viitattu 22.6.2023.]
- Tukiainen, T. 2009. Vesihuoltolaitosten kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. Diplomityö.
- Tuomi, J. 2023. Tuotantoinsinööri, Turun seudun puhdistamo Oy. Sähköposti 27.4.2023.
- Turun Vesihuolto. 2021. Vähähiilisempää vettä – Turun Vesihuollon tiekartta päästöjen vähentämiseen. Seminaariesitys, Vesiyhdistyksen seminaari 11.11.2021. https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2021/11/5_TVH_vahahiilisempaa_vetta_2021-11-11_final.pdf [Viitattu 5.6.2023.]
- Ukko, E.-M. 2023. Laitospäällikkö, Kymen Vesi Oy. Sähköposti 28.3.2023.
- Valtanen, M., Paavilainen, P., Jalonen, J., Sopanen, S., Suvanto, S. & Haapalainen, J. 2023. Selvitys hulevesien laadusta. Suomen Kuntaliitto ry, Helsinki. <https://www.kuntaliitto.fi/julkaisut/2023/2220-selvitys-hulevesien-laadusta>

- Valtioneuvosto. 2019. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019. Osaava ja osallistava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Valtioneuvosto, Helsinki. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-808-3>
- Valtioneuvosto. 2023. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. Vahva ja välittävä Suomi – hallituksen visio. Valtioneuvosto, Helsinki. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>
- Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023, annettu Helsingissä 12.1.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230064>
- Valtioneuvoston asetusluonnos lannoitevalmisteista 6234/2023.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.022>
- Vasilaki, V., Pijuan, M., Duan, H. & Katsou, E. 2022. Full-scale emission results (N₂O and CH₄). Julk.: Ye, L., Porro, J. ja Nopens, I. (toim.). Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. IWA Publishing, London. Scientific and Technical Report Series No. 26. <https://doi.org/10.2166/9781789060461> S. 133-166.
- Vento, M. 2021. Viikinmäen jätevedenpuhdistuksen energiatehokkuus paranee ja ilmastovaikutukset pienenevät. Kuntatekniikka 2/2021. <https://kuntatekniikka.fi/2021/02/02/viikinmaen-jatevedenpuhdistuksen-energia-tehokkuus-paranee-ja-ilmastovaikutukset-pienenevat/>
- Vergote, T.L.I., Bodé, S., De Dobbelaere, A.E.J., Buysse, J., Meers, E. & Volcke, E.I.P. 2020. Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure mono-digestion. Biosystems Engineering 196: 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.011>
- vesi.fi. 2023. Yhdyskuntien jätevesien typpikuormitus Suomessa vuosina 1971–2019. <https://vesi.fi/aineistopankki/yhdyskuntien-jatevesien-typpikuormitus-suomessa-vuosina-1971-2019/> [Viitattu 5.9.2023.]
- Vesihuoltolaki 119/2001. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20010119>
- Viholainen, J. 2021. Näkökulmia ja toimenpiteitä jätevesisektorin ilmastotyössä pääkaupunkiseudulla. Seminaariesitys, Ilmastomuutoksen torjunta jätevesisektorilla -seminaari 11.11.2021. https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2021/11/4_Nakokulmia-ja-toimenpiteita-jatevesisektorin-ilmastotyossa-paakaupunkiseudulla_11112021-1.pdf [Viitattu 5.6.2023.]
- Vilén, A-E. 2021. Environmental impact of activated carbon production from various raw materials. Aalto-yliopisto, Espoo. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202110319854>
- Vilpanen, M., Herttuainen, J., Sahlstedt, K., Nieminen, S., Nurmesniemi, E-T., Arvas, J., Seppälä, P. & Aurola, A-M. 2022. Suunnitteluohjeet kemiallisen saostuksen toimintavarmuuden parantamiseksi vesihuollossa. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 74. https://www.vvy.fi/site/assets/files/6395/saostuksen_suunnitteluohjeet_28012022.pdf
- Vilpanen, M. & Pyykkönen, S. 2023. Nenäinniemen puhdistamon uusi alkalointiasema – kiertotaloutta ja huoltovarmuutta. Seminaariesitys, Vesihuoltopäivät 10.-11.5.2023.
- Vilpanen, M. & Seppälä, P. 2021. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 71. https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen_kasittelyn_ja_hodyntamisen_nykytilannekatsaus_2021.pdf
- VVY. 2016. Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42. https://www.vvy.fi/site/assets/files/1666/jatevedenkasittelyn_teknis-taloudellinen_selvitys_21042016.pdf
- VVY. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen_termiset_kasittelymenetelmat_ja_niiden_soveltuvuus_suomeen.pdf
- VVY. 2020. Taloudellisesti ja ympäristön kannalta kestävä vedenkäytön tehostaminen talousvesihuollossa Suomessa. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 60.

[https://www.vvy.fi/site/assets/files/3479/taloudellisesti ja ympariston kannalta kestävä veden-
kaytto.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/3479/taloudellisesti_ja_ympariston_kannalta_kestava_veden_kaytto.pdf)

VVY. 2021. Vesilaitosyhdistyksen strategia: Visio 2030 ja tiekartta 2021–2030. [https://www.vvy.fi/ajankoh-
taista/uutiset/vesilaitosyhdistyksen-strategia-visio-2030-ja-tiekartta-2021-2030/](https://www.vvy.fi/ajankoh-taista/uutiset/vesilaitosyhdistyksen-strategia-visio-2030-ja-tiekartta-2021-2030/) [Viitattu 5.6.2023.]

Walker, S. B. Son, D, Kidon, D, Siddiqui, A., Kuner, A. Fowler, M., & Simakov, D. 2018. Upgrading biogas produced at dairy farms into renewable natural gas by methanation. International journal of energy research 42(4): 1714–1728. <https://doi.org/10.1002/er.3981>

Weppling, K. 2015. Osaavissa käsissä kalkkikivi muuttuu moneksi. 2. painos. Nordkalk Oy Ab.

Wu, L., Peng, L., Wei, W., Wang, D. & Ni, B. 2020. Nitrous oxide production from wastewater treatment: The potential as energy resource rather than potent greenhouse gas. Journal of Hazardous Materials 387: 121694. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121694>

Ye, L., Porro, J. & Nopens, I. (toim.). 2022. Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789060461>

Ympäristöministeriö. 2022. Rahoitetut hankkeet. <https://ym.fi/rahoitetuthankkeet> [Viitattu 5.6.2023.]

Äystö, L, Högmander P., Fjäder P., Salminen J. 2022. Haitalliset aineet kierrätyslannoitteissa ja niiden raaka-aineissa. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 27/2022. <http://hdl.handle.net/10138/345153>

Liite 1. Suomen vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt

Alla olevissa taulukoissa on esitetty vesihuollon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt vesihuollon eri osa-alueisiin jaoteltuna. Vedenjakelun päästöjä ei ole taulukoitu tässä, sillä ne on esitetty kattavasti luvussa 5.1.3.

Talousveden tuotanto (t CO ₂ -ekv/v)	Pohjavesi	Tekopohjavesi	Pintavesi	Yhteensä
Kemikaalit (sis. kuljetukset)	9 314	3 120	16 570	29 443
Energiankulutus	19 365	6 375	16 817	42 557
Prosessipäästöt			8 204	8 204
Yhteensä	28 818	9 542	41 838	80 204

Talousveden tuotanto (g CO ₂ -ekv/m ³)	Pohjavesi	Tekopohjavesi	Pintavesi	Yhteensä
Kemikaalit (sis. kuljetukset)	47	47	118	73
Energiankulutus	97	96	118	104
Prosessipäästöt	0	0	57	20
Yhteensä	144	143	293	197

Jäteveden siirto	t CO ₂ -ekv/v
Energiankulutus (yhteensä)	26 128
Sähkö	26 016
Lämpö	112
Verkostopäästöt (yhteensä)	70 644
Metaani	65 834
Typpioksiduuli	4 810

Jätevedenkäsittely (t CO ₂ -ekv/v)	Suuret laitokset (> 10 000 m ³ /vrk)	Keskisuuret laitokset (1 000–10 000 m ³ /vrk)	Pienet laitokset (<1 000 m ³ /vrk)	Yhteensä
Prosessipäästöt (yhteensä)	168 770	54 975	10 440	234 185
Energiankulutus (yhteensä)	27 479	8 660	1 689	37 828
Kemikaalit	35 237	7 270	2 249	44 756
Päästöt vesistöissä	14 801	6 686	1 842	23 330
Välpe	2 723	977	146	3 846
Kaikki yhteensä	247 791	78 316	16 288	342 395

Lietteenkäsittely (t CO ₂ -ekv/v)	Prosessi- päästöt	Syötteet	Varastointi	Kuljetus käsiteltäväksi	Hyödyntäminen	Yhteensä
Kompostointi	11 634	6 723	929	601	1 673	21 511
Mädätys	10 002	6	7 806	2 273	4 540	24 627
Mädätys ja kompostointi	23 494	9 297	999	3 182	2 029	39 063
Mädätys ja terminen kuivaus	1 462	1	125	303	521	2 142
Kemiallinen käsittely	3 386	2 234	349	253	627	6 848
Poltto	121	77	0	76	0	273
Yhteensä	50 095	18 337	10 209	6 686	9 183	94 510

Vesihuollon kasvihuonekaasupäästöt Suomessa ja päästövähennystoimien vaikuttavuuden arviointi



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute

Teemme tiedolla toivoa.

ISBN 978-952-11-5599-4 (PDF)
ISSN 1796-1726 (verkkokj.)