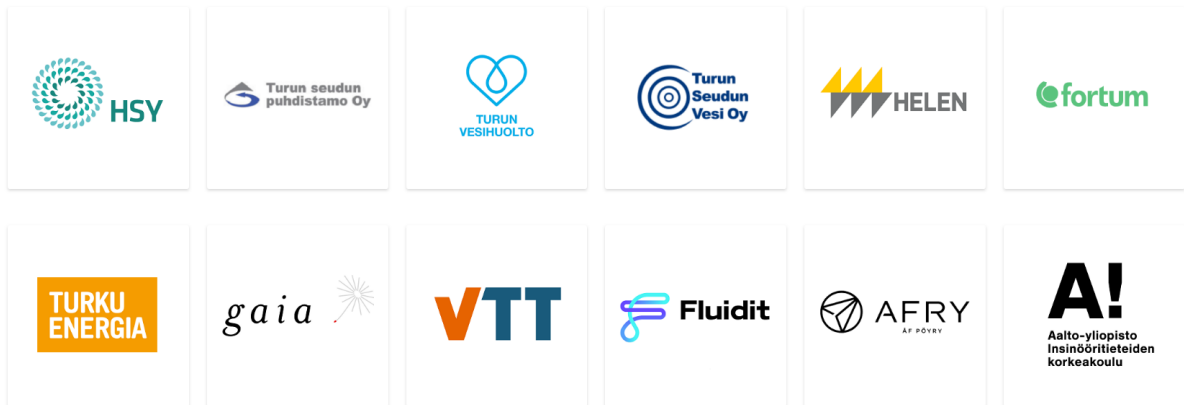


Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn - yhteenveto

16.11.2022



*Toteuttajat: VTT Oy, Fluidit Oy, AFRY Finland Oy, Aalto-yliopisto, Gaia Consulting Oy
Yhteenvedon koostaja: Gaia Consulting Oy*

SISÄLLYS

1	Johdanto	5
1.1	Taustaa	5
1.2	Selvityksen tavoitteet	6
2	Hankkeen kokonaiskuva	7
3	Työpakettien yhteenvedot	9
3.1	Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa	9
3.2	Lämpötilan muutokset ja vaikutus jätevesiverkostossa	11
3.3	Lämpötilan vaikutus typenpoistoon	13
3.4	Lämmönvarastoinnin innovatiiviset menetelmät.....	15
3.5	Jätevesilämmön talteenoton sääntelymahdollisuudet	17
3.6	Lämmön talteenoton ristikkäisvaikutukset	19
4	Johtopäätökset.....	21
4.1	Kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa on merkittävää potentiaalia sekä merkittäviä vaikutuksia yhdyskuntien jätevedenpuhdistukseen	21
4.2	Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen kiinteistökohtaisesti vaatii merkittäviä investointeja	24
4.3	Käyttöveden lämmöntalteenotossa ja jäädytyksessä on potentiaalia, joka on tietyin edellytyksin hyödynnettävissä ilman haittaa eri vesihuoltojärjestelmän osapuolille	26
4.4	Kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto voi vaatia lisäsäätelyä, joka toteutettaisiin ensisijaisesti liittymäsopimusten kautta.....	28
4.5	Jäteveden lämmöntalteenoton järjestelmätason kokonaiskannattavuuden arviointi vaatii lisäselvityksiä.....	29
	LIITE: Jäteveden lämmöntalteenoton ristikkäisvaikutukset	31

Tiivistelmä

Jätevesi sisältää lämpöä, jota hyödynnetään vain osittain. Sen nykyistä tehokkaampaan hyödyntämiseen on alettu kiinnittää huomiota osana laajempaa vihreää siirtymää. Jätevettä ei kuitenkaan voida jäähdyttää ilman sivuvaikutuksia: biologisen jätevedenpuhdistusprosessin typenpoiston tehokkuus riippuu jäteveden lämpötilasta. Lämmön on arvioitu myös pienentävän jäteveden jäätymisriskejä ja vähentävän rasvatukosten mahdollisuutta.

Tässä hankkeessa on selvitetty järjestelmällisesti eri näkökulmista sitä, miten kaupunkimittakaavassa veden ja jäteveden lämpösisältöä kannattaisi hyödyntää. Hankkeen työpaketeteissa on selvitetty

1. Lämmön talteenoton energiatasetta eri näkökulmista kahdessa kaupungissa
2. Lämpötilan muutoksia ja vaikutuksia jätevesiverkostoissa
3. Jäteveden lämmöntalteenoton vaikutuksia aktiivilieteprosessiin suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla
4. Lämmönvarastoinnin uusia ja innovatiivisia mahdollisuuksia osana jäteveden käsittelyä
5. Kiinteistökohtaisen lämmön talteenoton sääntelyn tilaa ja mahdollisuuksia Suomessa ja eräissä vertailumaissa
6. Ristikkäisvaikutuksia so. lämmöntuotannon ja typenpoistotehokkuuden yhteyttä ja yhteydestä seuraavia kustannuskysymyksiä.

Hankkeen kuvaus ja tulokset on koottu tähän yhteenvetoon.

Hankkeen eräs keskeinen tulos on, että isossa jätevesiverkostossa jäteveden lämpötila näyttäisi määrääntyvän pitkälti maaperän lämpötilan perusteella. Lämpötaseen kannalta voisi siis olla perusteltua ottaa lämpöä talteen jo jäteveden syntypaikoilla. Toisaalta liika talteenotto jäähdyttää kuitenkin puhdistamoiden jätevettä niin, että saman typenpoistotuloksen saavuttamiseen tarvitaan enemmän puhdistamokapasiteettia. On karkeasti arvioitu, että tässä työssä lisäpuhdistuskapasiteetti maksaisi ehkä noin 10-30 eur/talteen otettu MWh. Lisäksi tulisivat mm. lämmön talteenoton investointi- ja käyttökustannukset. Myös olemassa olevien keskitettyjen lämmöntalteenottolaitteistojen tuotto pienenee. Nämä vaikutukset johtavat monipolvisiin kysymyksiin hyödynjaosta.

Kiinteistökohtaista lämmöntalteenottoa ei faktisesti säädellä tällä hetkellä. Mikäli sääntelyä tarvittaisiin, liittymäsopimusehdot olisivat ilmeisesti sopiva keino. Sääntelyä voidaan tarvita, mikäli kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto yleistyisi niin, että puhdistamon puhdistustulos häiriintyisi merkittävästi. Hankkeessa todettiin myös, että käyttöveden lämmöntalteenotossa ja jäähdytyksessä on potentiaalia, joka on hyödynnettävissä ilman haittaa eri vesihuoltojärjestelmän osapuolille, jos talteenotto voidaan toteuttaa veden käyttöturvallisuutta vaarantamatta.

Abstract

Wastewater contains heat that is currently utilized only partly. Lately, as part of green transition, heat recovery from wastewater has gained more attention. Especially property level heat recovery is becoming increasingly interesting. However, one cannot recover arbitrarily large amounts of heat from wastewater without side effects: as wastewater cools down, nitrogen removal in activated sludge becomes more inefficient. Heat in sewers has also been deemed important in avoiding icing and grease blocks in sewers. Where in the sewer network should one recover heat?

In this project we have studied extensively from different perspectives the possible ways to utilize wastewater heat recovery in city scale. The work packages of the project have involved

1. Energy balance of wastewater heat recovery in two Finnish cities, Helsinki and Turku
2. Changes of temperature and its effects in sewer networks
3. Effects of pre-treatment heat recovery on activated sludge process in Finnish wastewater treatment plants
4. New innovative methods of storing and circulating heat as part of wastewater treatment
5. The state of the art of legislation and ways to control private property level heat recovery
6. The quantitative connection of heat recovery and nitrogen removal performance in wastewater treatment plants and semiquantitative monetization of results.

One central result of the study is that ground temperature seems to dictate the wastewater temperature in the sewer network. From the heat balance point of view, recovery in upstream could be beneficial. However, as suspected, uncontrolled cooling of wastewater results in a need to enlarge wastewater treatment capacity. In the case studies of the project, it was coarsely estimated that the cost of the additional capacity is about 10-30 eur/recovered MWh upstream. Investment and operational costs of heat recovery would come on top of this. In addition, the performance of possible centralized post treatment recovery suffers, which has to be taken into account. These impacts lead to complex questions on utility sharing and compensation. A more straightforward approach, also identified in the study, is to utilize the heat in domestic water. Since the ground temperature dictates the water temperature, it seems that domestic water could be cooled significantly before supplying it, provided that drinking water quality is not jeopardized in the process.

In Finland, and in reference countries, property level heat recovery is not controlled directly at the moment. There are some indirect controls, but the field is not clear. Should the need for more strict controlling arise, agreements between the water utility and the customers would be the preferred place.

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Jäteveden sisältämä lämpö on merkittävä resurssi, jonka nykyistä tehokkaampaan hyödyntämiseen kohdistuu paljon ja perusteltua kiinnostusta. Jäteveden lämpö on samalla välttämättömyys jäteveden biologiselle käsittelylle, erityisesti typenpoistolle. Typellä on merkittävä rooli Itämeren rehevöittäjänä ja yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla rehevöitymisen ehkäisyssä.

Lämmöntarpeesta jätevesiverkostossa ei tiedetä. Lämmön on arveltu pienentävän jäteveden jäätymisriskejä ja mm. hidastavan jäteveden sisältämän rasvan jähmettymistä, mikä voi vaikuttaa tukosten todennäköisyyteen pienemmillä putkiosuuksilla. Verkoston jäätymiset ja rasvatukokset haittaavat asukkaiden ja yritysten arkea ja muodostavat terveys- sekä ympäristöriskejä.

Ymmärrys jäteveden lämmön energiapotentiaalista ja vaikutuksista jätevedenpuhdistukseen on ollut hajautuneena, jolloin kaikki ympäristövaikutukset huomioon ottavalle päätöksenteolle ei ole ollut työkaluja. Vesihuoltolaitoksilla ei ole tietoa hyödynnettävistä energiamääristä, ja puhdistamoja edeltäviä talteenottoratkaisuita tarkastellaan ainoastaan uhkana. Vesihuoltolaitosten ulkopuolella ei puolestaan tiedosteta, että kiinteistöltä lähtevä jäteveden lämpö ei ole heitetty hukkaan, vaan sitä tarvitaan jätevedenpuhdistuksessa.

Pääkaupunkiseudun ja Turun viemärointialueiden käsitellyn jäteveden lämpöä käytetään keskitetysti ja tehokkaasti hyödyksi kaukolämmön ja kaukokylmän tuotannossa, mitä ei nykyisellään oteta huomioon, kun tarkastellaan kiinteistöjen energiatasetta. Kun tilannetta tarkastellaan ainoastaan yksittäisen kiinteistön näkökulmasta, lämmön talteenotto jätevedestä on alkanut näyttäytyä lähes välttämättömyytenä. Erityisesti talvikuukausina suurten kaupunkien lämmitys on haastavaa toteuttaa hiilineutraalisti.

Hankkeessa tutkitaan, miten lämmön talteenotto jätevedestä ja kausivarastointi esimerkiksi faasimuutosmateriaaleihin olisi mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa, ja miten se voisi vähentää lämmityksen aiheuttamia päästöjä kaupungeissa. Nykytilanteessa kiinteistökohtaista lämmön talteenottoa jätevedestä ei ole täysin kielletty vesilaitosten toimitusehdoissa. Muutamana yksittäisen kiinteistön kohdalla jäteveden lämmön talteenotto ei muodostu ongelmaksi, mutta laajamittaisesti toteutettuna sillä voi olla haitallista vaikutusta. Lämmön talteenoton yleistyminen pakottaa vesihuoltolaitokset jossain vaiheessa toimiin jätevedenpuhdistuksen vaarantumisen estämiseksi. Jotta liittyjät eivät joudu eriarvoiseen asemaan, erilaiset tulevaisuuden skenaariot vaikutuksineen tulee pystyä määrittämään ennen kiinteistökohtaisen talteenoton yleistymistä. Hanke auttaa osaltaan arvioimaan lämmön talteenottoratkaisujen kokonaisedullisuutta kaupunkien mittakaavassa ja välttämään kokonaisuuden kannalta hyödyttömiä tai pitkällä aikavälillä jopa haitallisia osaoptimoimia.

Hanke on toteutettu Etelä-Suomessa, mutta sekä lämmön talteenoton potentiaaliset hyödyt että jätevedenpuhdistuksen haasteet korostuvat pohjoisessa ja hankkeen tulokset ovat

valtakunnallisesti hyödyllisiä. Hankkeen toteutus painottuu voimakkaasti yliopisto- ja suunnittelutoimistoyhteistyöhön ja se tuottaa sekä vesi- että energia-alalle uutta holistista osaamista ja uusia näkökulmia vesihuollon lämpösisältöä koskien.

1.2 *Selvityksen tavoitteet*

Hankkeen päätutkimuskysymys on, mikä on kaupungin mittakaavassa paras tapa hyödyntää veden ja jäteveden lämpösisältöä, kun otetaan huomioon sekä energia että vaikutukset jäteveden käsittelyyn ja viemärointiin.

Hankkeen keskeisiä tavoitteita ovat:

- Tarkastella kokonaisvaltaisesti veden sisältämää lämpöenergiaa sekä lämmön hyödyntämisen että jätevedenkäsittelyn näkökulmasta ja välittää tietoa eri toimijoiden kesken.
- Tuottaa ja levittää tietoa eri talteenottovaihtoehtojen eduista ja haasteista, keskitetyistä kaukolämmön- ja kylmän tuottamisesta ja sen roolista kaupunkien energiataseessa sekä lämmön merkityksestä jätevedenpuhdistuksessa.
- Tuottaa selkeä ja numeerinen, koko kaupungin tai viemärointialueen kokonaisuutena kattava vertailu raakaveden lämmön talteenoton, kiinteistökohtaisen lämmön talteenoton ja puhdistetusta jätevedestä tapahtuvan keskitetyn kaukolämmön ja -kylmän tuotannon kesken.
- Tuottaa selkeä ja numeerinen vertailu puhdistamoa edeltävän lämmön talteenoton ja jäteveden viemärointiin ja puhdistukseen kohdistuvien vaikutusten välillä. Tavoitteena ei ole määrittää jäteveden viemäroinnin tai puhdistuksen kannalta hyväksyttävää minimilämpöä, koska se tarkoittaisi hyväksyttävän minimipuhdistustehon määrittelyä.
- Tuottaa selkeä ja analyttinen loppuraportti ja osaraportit, jotka ovat suoraan hyödynnettävissä useiden eri tahojen toimesta: kaupunkien päätöksentekijät, vesihuoltolaitokset, energiayhtiöt, suunnittelijat, kiinteistöt ja kiinteistökohtaisen lämmön talteenoton parissa työskentelevät, ja välittää tietoa mm. webinaarissa.
- Tukea energianeutraaliuteen ja ympäristövaikutusten minimointiin pyrkiviä kaupunkoja samoin kuin muita lämmön talteenottoon linkittyviä toimijoita niiden päätöksenteossa.

Hankkeessa on tuotettu perusteltua tietoa eri lämmöntalteenottotapojen vaikutuksista koko kaupungin tai viemärointialueen mittakaavassa. Tarkastelu on ollut tapaustutkimustyyppistä, mutta kehitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa missä verkostossa tahansa. Hankkeen tulokset ovat sovellettavissa muihin kaupunkeihin ja ne antavat työkaluja suunnittelulle ja ratkaisujen valinnoille.

Hanke on raportoitu tässä yleistajuisessa yhteenvetoraportissa sekä osahankkeiden syventävinä raportteina. Erityisesti on pyritty tuottamaan selkeitä laskelmia talteenottotapojen keskinäisistä suhteista koko kaupungin tai viemärointialueen mittakaavassa sekä

energiahyödyistä suhteessa ympäristökuormitukseen ja ympäristölupien ehtoihin. Tarkastelu on lopuksi monetisoitu karkeasti niin, että lämmön talteenotolla kerättävälle lämmölle on saatu puhdistamokapasiteetin kasvattamisen tarpeesta syntyvä hintalappu.

Hankkeessa on myös tutkittu lainsäädännöllisiä ja sopimuksellisia ohjauskeinoja tilanteisiin, joissa kiinteistöjen lämmöntalteenottoa olisi perusteltua jotenkin rajoittaa, sekä luotu katsaus tulevaisuuden mahdollisuuksiin lämpöenergian talteenoton ja varastoinnin saralla.

Hankkeen tulokset antavat tietoa valintojen tueksi pyrittäessä energiatehokkuuteen.

2 *Hankkeen kokonaiskuva*

Hanke koostui kuudesta työpaketista, jotka etenivät osin rinnakkain.

Työpaketti 1: Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa. Työpaketissa VTT tarkasteli ja mallinsi eri energiataseen komponentteja ja teki skenaariotarkasteluja lämpöenergiataseeseen vaikuttavista tekijöistä ja niiden välisistä kytkennöistä kaupunkienergiajärjestelmässä. Työpaketin tuloksena saatiin kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton (JVLTO) vaikutus keskitettyjen lämpöpumppulaitosten (Katri Vala Helsingissä ja Kakolanmäki Turussa) energiantuotantoon eri kiinteistökohtaisen JVLTO-tekniikan yleisyysasteilla puhdistamojen vaikutusalueella. Tarkastelussa laskettiin JVLTO:n yleisyyskenaariot (0 %, 25 %, 50 %, 75 % ja 100 %) ja näihin liittyvät energiavaikutukset sekä puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan muutokset eri skenaarioilla. Lisäksi Turussa tarkasteltiin raakaveden lämmöntalteenottoa osana kaupunkienergiajärjestelmää sekä lämmöntalteenoton vaikutusta kiinteistöjen lämpimän veden valmistuksen energiantarpeeseen.

Työpaketti 2: Lämpötilan muutokset ja vaikutus jätevesiverkostossa. Työpaketissa Fluidit Oy selvitti jäteveden lämpötilan muuttumista jätevesiverkostoissa laatimalla lämpötilan kehittymistä simuloivan verkostomallin ja soveltamalla sitä Turun ja HSY:n verkostoissa. Tuloksissa esitetään lämpötilan muuttuminen verkostossa eri tilanteissa ja arvioidaan verkoston jäätymisriskejä ja kovien rasvojen jähmettymistä ja muita mahdollisia lämpötilan ja sen muutosten vaikutuksia.

Työpaketti 3: Jäteveden lämmön talteenoton vaikutus typenpoistoon ja aktiivilieteprosessiin suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Työpaketissa Afry Finland Oy analysoi ja arvioi laskevan lämpötilan vaikutuksia typenpoistoon ja aktiivilieteprosessiin suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla sekä jäteveden lämmön talteenoton soveltuvuutta kyseisiin olosuhteisiin. Laskevan lämpötilan vaikutuksia analysoitiin ja arvioitiin data-analyysin sekä prosessisimulointien avulla.

Työpaketti 4: Lämmönvarastoinnin innovatiiviset menetelmät. Työpaketissa Aalto-yliopisto tarkasteli erilaisia lämmön varastointitapoja erityisesti kausivarastoinnin näkökulmasta (vertaillaan suoraan toisen välittäjäaineen lämmittämistä sekä mahdollisuuksia käyttää erilaisia innovatiivisia faasimuutosmateriaaleja). Työssä kartoitettiin myös mahdollisia käyttökohteita tälle kerätylle lämmölle sekä sen varastoinnin keston aikajännettä.

Työpaketti 5: Käytännöt, ehdot ja ohjauskeinot. Työpaketissa Gaia Consulting Oy selvitti, millaisilla sopimuksellisilla, lainsäädännöllisillä ja hallinnollisilla keinoilla vesihuoltolaitoksilla on mahdollista vaikuttaa kiinteistökohtaisten lämmön talteenottoratkaisuiden käyttöönottoon tällä hetkellä ja millaisia hallinnollisia työkaluja tai lainsäädäntömuutoksia on tarve kehittää, mikäli osoittautuu, että nykyinen säädöskehys ei riittävästi turvaa vesihuoltolaitosten toimintamahdollisuuksia. Työpaketissa selvitettiin myös muiden maiden käytäntöjä, sopimus- ja toimitusehtoja ja mahdollisuuksia vaikuttaa jätevesien lämmön talteenottoon.

Työpaketti 6: Ristikkäisvaikutukset, yhteenveto ja johtopäätökset. Työpaketissa on vedetty yhteen työpakettien 1–5 tulokset ja muodostettu niiden perusteella näkemys kokonaisuudesta ja kaupungin mittakaavassa suositeltavista ratkaisuista.

Ohjausryhmä koordinoi työpaketteja siten, että ne tukevat sekä toisiaan että ristikkäisvaikutusten laskentaa ja analyttisen yhteenvetoraportin laatimista mahdollisimman hyvin. Ohjausryhmään kuului edustus seuraavista toimijoista:

- Helsingin seudun ympäristöpalvelut
- Turun seudun puhdistamo Oy
- Turun Vesihuolto Oy
- Turun seudun vesi Oy
- Helen Oy
- Fortum Oyj
- Turku Energia Oy.

Työ raportoidaan kuutena työpakettikohtaisena raporttina ja tässä yhteenvedossa. Työpakettien 6 tulokset ovat tämän raportin liitteenä.

3 Työpakettien yhteenvedot

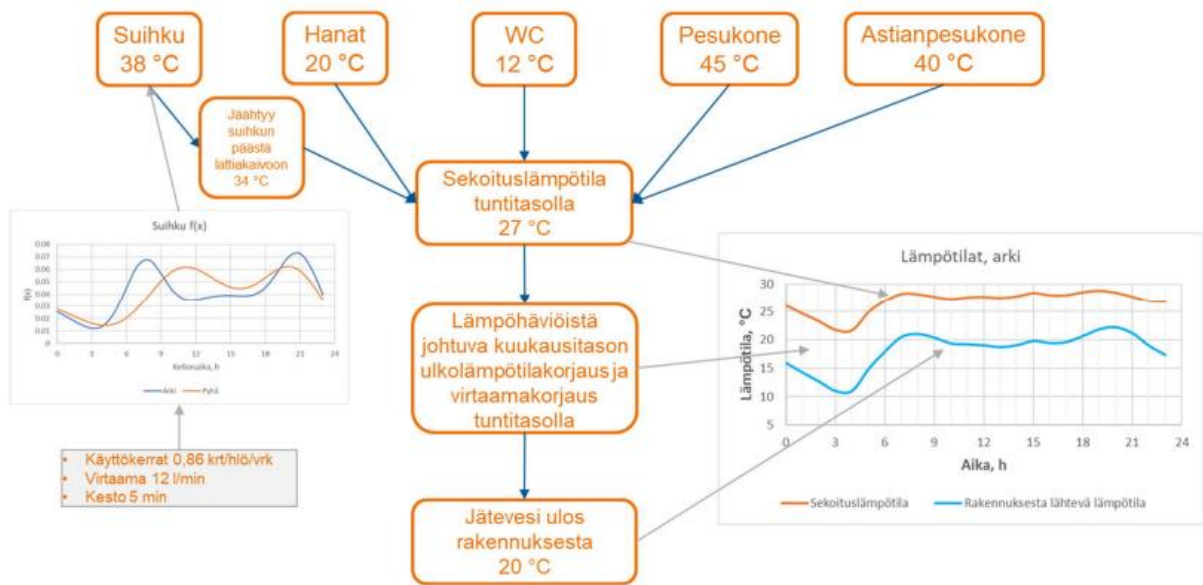
3.1 Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa

Työpaketin keskeiset havainnot:

- Työpaketissa tuotettiin rakennusten jäteveden tuotto- ja jäähtymämalli, jota hyödynnettiin kahden jätevedenpuhdistamon skenaariotarkastelussa yhdessä työpaketissa 2 kehitetyn verkoston jäähtymämallin kanssa
- Hajautetun jäteveden lämmön talteenoton todettiin lisäävän lämmöntuottopotentiaalia verrattuna tilanteeseen, jossa lämpöä otetaan talteen vain keskitetysti puhdistetusta jätevedestä: lämpöenergian kokonaistuoton arvioitiin kasvavan 10–82 %
- Rakennuksilla jätevedestä talteen otettu lämpöenergia oli skenaariosta riippuen 1.9–2.6 kertaa suurempi kuin keskitetyn lämpöpumpun talteenoton vähennys
- Lisäksi myös käyttövedessä on merkittävästi lämmityspotentiaalia ja sitä voidaan hyödyntää myös kaukojäähdytyksessä

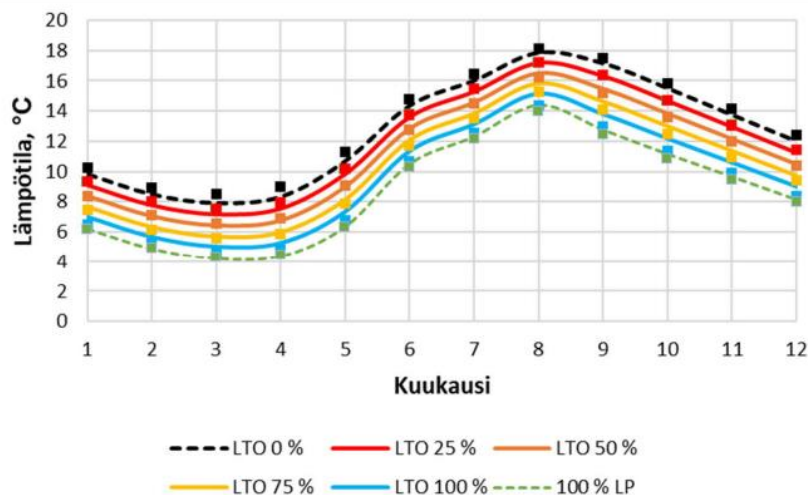
Lämpimät jätevedet ovat yksi rakennetun ympäristön merkittävimmistä hukkaenergiavirroista, ja rakennuskannan eristyksen parantuessa ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton (LTO) yleistyessä jätevesien suhteellinen osuus hukkaenergiasta kasvaa jatkuvasti. Työpaketissa selvitettiin rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton vaikutuksia jäteveden lämpötiloihin puhdistamolle tullessaan sekä vaikutuksia kaupunkitason keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntuottopotentiaaleihin. Keskeisiä käytännön kysymyksiä olivat jäteveden tuottomäärä ja lämpötila rakennuksilla, sekä kuinka jäteveden lämpötila muuttuu lähtiessä vesikalusteista ja kulkiessa rakennuksen sisäisessä viemärissä ja kaupungin viemäriverkostossa.

Työpaketissa kehitettiin mallit rakennuksessa tapahtuvalle jäteveden tuotolle sekä jäteveden jäähtymälle rakennuksen sisäisessä verkostossa ja sovellettiin toisessa osakokonaisuudessa (työpaketti 2) kehitettyä jäähtymämallia kaupungin verkostossa. Malleja hyödynnettiin Turun Kakolanmäen sekä Helsingin Viikinmäen puhdistamojen alueiden skenaariotarkasteluissa, joissa tutkittiin hajautetun LTO:n vaikutuksia jäteveden lämpötiloihin ja keskitetyn LTO-laitoksen tuotantoon eri yleisyysasteilla. Jäteveden LTO-tarkastelujen lisäksi tarkasteltiin Turun käyttövesiverkostoon mahdollisesti asennettavan lämpöpumpun lämmityspotentiaalia sekä vaikutuksia kiinteistöjen käyttöveden lämmitystarpeeseen. Skenaarioissa lämmöntalteenotto- ratkaisujen yleisyysaste rakennuskannassa vaihteli 25 %:sta 100 %:iin. Lämmöntalteenotto- ratkaisuuina tarkasteltiin suihkujen lattiakaivojen lämmönvaihtimia ja kiinteistökohtaisia lämpöpumppuratkaisuja.



Kuva 1. Työpaketissa kehitetty jäteveden tuottomalli virtaamalle ja lämpötilalle

Rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton vaikutus puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilan alenemaan eri skenaarioilla arvioitiin Turun tarkasteluissa vaihtelevan välillä 0,7–4,3 °C ja HSY:n tarkasteluissa vaikutus arvioitiin hieman suuremmaksi 0,9–5,0 °C. Hajautetun jäteveden lämmöntalteenoton todettiin lisäävän kaupunkitasolla lämmöntuotantopotentiaalia verrattuna tilanteeseen, jossa lämpöä otetaan talteen vain keskitetysti puhdistetusta jätevedestä. Turun alueen lämpöenergian kokonaistuoton arvioitiin kasvavan 15–82 % ja Helsingissä 10–45 %, riippuen siitä kuinka suurella osuudella kaupungin pientaloista on lämmöntalteenottoteknologiaa käytössä. Vuositasolla Turun tapauksessa rakennuksilla jätevedestä talteen otettu energia on noin 2,6 ja HSY:n alueella noin 1,9 kertaa suurempi kuin keskitetyn lämpöpumpun talteenoton vähennys rakennusten lämmöntalteenottoskenaariosta riippumatta. Absoluuttisesti hajautettu talteenotto vaikuttaa luonnollisesti myös hyödynjakkoon, sillä se pienentää olemassa olevien keskitettyjen lämmöntalteenottolaitosten saantoa.



Kuva 2. JV-lämpötilat puhdistamolla eri skenaarioilla, Turun laskelmat käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä

Lisäksi käyttövedessä on merkittävä energiamäärä hyödynnettäväksi lämpöpumpulla tuotettuun kaukolämpöön. Laskelmien perusteella käyttövedestä otettavalla lämmöllä, joka laskisi verkostoon syötettävän veden lämpötilaa 4 °C:lla, ei olisi merkittävää vaikutusta kiinteistöjen käyttöveden lämmitysenergian tarpeeseen, koska käyttöveden lämpötila ehtii tasaantua lähelle vallitsevan maaperän lämpötilaa ennen kiinteistöille saapumistaan, joka vastaa tilannetta ilman lämmön hyödyntämistäkin. Turussa arvioitiin käyttövedestä tuotettavaksi lämmityspotentiaaliksi noin 8 % Turun koko kaukolämpötuotannosta. Lämmöntuoton potentiaali kasvaa, jopa kaksinkertaiseksi, jos käyttövedettä on mahdollista hyödyntää myös kaukojäähdytyksessä. Samalla jäähdytysenergian myynnistä saataisiin lisäarvoa. Käyttöveden lämmön talteenoton toteutuksessa tulee huomioida esim. välittäjäaineiden ja kuluttajille johdettavan veden sekoittumisriskin eliminointi.

3.2 Lämpötilan muutokset ja vaikutus jätevesiverkostossa

Työpaketin keskeiset havainnot:

- Työpaketissa kehitettiin uusi toiminnallisuus olemassa olevaan viemärimallinnusohjelmistoon, jonka avulla mallinnettiin Turun ja Helsingin jätevesiverkoston virtaus- ja lämpötekniinen toiminta mm. lämmön talteenottopotentiaalnin analysoimiseksi.
- Mallin herkkyytarkastelun perusteella maaperän lämpötilan todettiin olevan tärkein puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan vaikuttava tekijä.
- Hajautetuissa lämmön talteenottoskenaarioissa jäteveden lämpötila laski jätevedenpuhdistamoilla 9,7–18,2 % tavalliseen tilanteeseen verrattuna. Samalla verkoston lämpöhäviöt pienenevät.
- Mallinnustulosten perusteella lämmön talteenotto ei lisännyt verkoston tukostai jäätymisriskiä, mutta lämpötilan laskeminen voi erityisesti maaliskuussa vaikeuttaa jätevedenpuhdistamon puhdistusprosesseja.
- Hukkalämmön talteenotto voidaan toteuttaa kiinteistöjen sijaan myös jätevedenpumpuilla, mutta vertailu kiinteistöjen LTO-ratkaisujen kanssa vaatisi tarkempia mittauksia.

Jäteveteen päätyneet energia on peräisin verkoston alkupäästä kuten kotitalouksista, joissa viemäriin päätyvät vedet on usein lämmitetty ennen niiden käyttöä. Vesi ehtii kuitenkin jäähtyä huomattavasti verkostossa ennen sen päätymistä jätevedenpuhdistamolle, missä keskitetyt lämpöpumput ottavat hukkalämpöä talteen puhdistuksen jälkeen.

Työpaketissa mallinnettiin jätevesiverkoston virtaus- ja lämpötekniinen toiminta talteenottopotentiaalnin sekä verkoston ja jätevedenpuhdistamon häiriöttömän toiminnan edellytysten

analysoimiseksi eri lämmön talteenottoskenaarioiden yhteydessä. Mallien avulla saatiin myös parempi käsitys jätevesiverkostojen nykyisestä toiminnasta. Työssä rakennetut termodynaamiset jätevesiverkostomallit olivat tähän saakka suurimmat maailmassa.

Koska valmiita tutkimukseen soveltuvia ohjelmistoja ei ollut olemassa, työpaketissa kehitettiin uusi tarvittava toiminnallisuus Fluidit Sewer -mallinnussovellukseen. Kehitys aloitettiin oleellisimpien termodynaamisten prosessien valinnalla, joiden perusteella muodostettiin termodynaaminen simulaattori hydraulisen simulaattorin rinnalle. Termodynaamisen simulaattorin herkkyytarkasteluiden perusteella tärkein parametri prosesseissa oli maaperän lämpötila. Koska maaperän lämpötilamittauksia ei ollut saatavilla, kehitettiin erillinen malli maaperän lämpötilan laskemiseksi tietyllä syvyydellä ilman lämpötilahistorian perusteella. Lisäksi työssä tutkittiin yksittäisen virtauskanavan lämmönsiirtokerrointa jäteveden ja ilman välillä sekä lämpötilagradienttia kanavan ympärillä olevassa maaperässä numeerisella virtausmallinnuksella. Lopuksi simulaattori kalibroitiin ja validoitiin (kahdella eri alueella) Helsingissä ja Turussa tehtyjen mittausten perusteella.

Jätevesiverkostomallit rakennettiin simulaattorin kehityksen ja validoinnin jälkeen. Sekä Turusta että Helsingistä saatiin valmiit jätevesiverkostomallit, joihin tehtiin vain termodynaamisen laskennan vaatimat lisäykset ja muutokset. Nämä parametrit sisälsivät muun muassa virtauskanavien lämpöhäviöihin vaikuttavat lämmönsiirtokerroimet eri putkimateriaaleille ja -halkaisijoille.

Mallinnetut skenaariot kuvasivat verkostojen nykyistä toimintaa sekä toimintaa lämmön talteenoton yhteydessä. Mallinnettaviksi kuukausiksi valittiin maaliskuu-, kesä- ja syyskuu. Mallinustulosten perusteella lämmön talteenotto ei lisännyt verkostojen tukos- tai jäätymisriskiä, ja otollisin aika lämmön talteenotolle oli kesäkuusta joulukuuhun, kun maaperän lämpötila on vielä suhteellisen korkea. Tulosten mukaan hukkalämpöä hyödynnettäessä jäteveden lämpötila voi kuitenkin laskea jätevedenpuhdistamon häiriöttömän toiminnan kannalta liian matalaksi helmi–maaliskuussa. Lämmön talteenotto laski mallinuksissa jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaa 10–18 % riippuen tarkasteltavasta kuukaudesta ja verkostosta. Koska käytetyt verkostomallit olivat hyvin suuria, tarkkojen arvojen ilmoittamiseksi tarvittaisiin enemmän verkostossa tehtyjä lämpötilamittauksia.

Hukkalämmön talteenotto voidaan kiinteistöjen LTO-ratkaisujen sijaan suorittaa myös keskittymmin jätevedenpumppaamoilla, jolloin laitteistokustannuksissa voidaan säästää. Koska pumppaamoja on verkostossa suhteellisen tiheästi, on lämmön talteenottopotentiaali lähes sama verrattuna kiinteistökohtaiseen lämmön talteenottoon. Tutkimuksessa tehtiin alustavat simuloinnit pumppaamokohtaiselle lämmön talteenotolle, mutta niiden vertaaminen kiinteistökohtaiseen lämmön talteenottoon vaatisi tarkempia mallinuksia, joissa täsmälleen sama lämpöenergia otettaisiin talteen kummassakin tapauksessa. Alustavissa tuloksissa suurta eroa lämpötilassa jätevedenpuhdistamolle saapuvassa virtauksessa ei ollut.

Taulukko 1. Hajautetun lämmön talteenoton vaikutus jäteveden lämpötilaan Kakolanmäen (Turku) sekä Viikinmäen (Helsinki) jätevedenpuhdistamoilla

	Puhdistamo [°C]	LTO Puhdistamo [°C]	Muutos [°C]	Muutos [%]
Kakolanmäki				
maaliskuu	8.0	6.8	-1.2	-15.4
syyskuu	17.5	15.6	-2.0	-11.2
kesäkuu	15.6	13.3	-2.2	-14.3
Viikinmäki				
maaliskuu	8.5	7.0	-1.6	-18.2
syyskuu	17.4	15.5	-1.9	-11.2
kesäkuu	14.9	13.5	-1.4	-9.7

3.3 Lämpötilan vaikutus typenpoistoon

Työpaketin keskeiset havainnot:

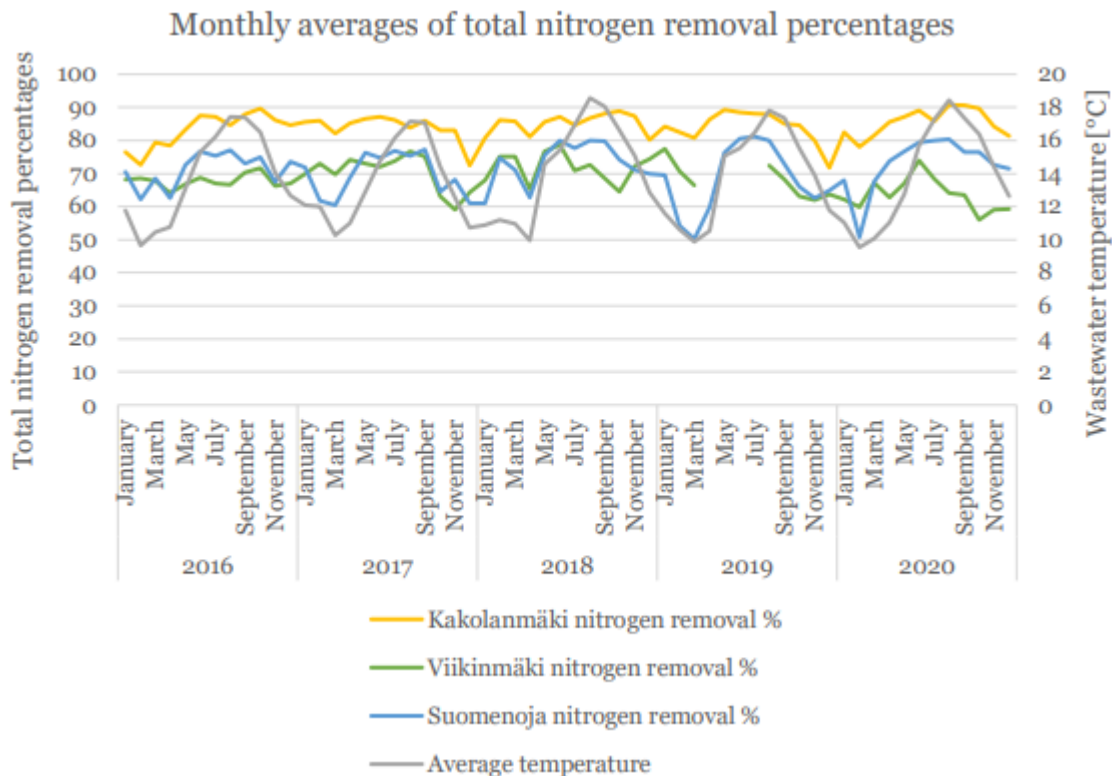
- Jäteveden lämpötilan lasku hankaloittaa typenpoistoa aktiivilieteprosessissa jätevedenpuhdistamoilla.
- Jäteveden lämpötilan laskun vaikutus typenpoiston tehokkuuteen on sitä vahvempi mitä kylmempää vesi on, varsinkin alle 10 °C lukemissa.
- Typenpoiston kannalta haastavaa on myös kevät aika, kun sulaneet lumet tuovat jäteveten isoja virtaamia kylmää vettä.
- Jäteveden lämpötilan laskua voidaan periaatteessa kompensoida lisäämällä biologisen käsittelyprosessin kapasiteettia. Tämä vaatii kuitenkin suuria investointeja ja on usein esim. tilarajoitteiden vuoksi mahdotonta.

Jäteveden lämmön talteen ottaminen ennen jätevedenpuhdistamo laskee jätevedenpuhdistamoille saapuvan jäteveden lämpötilaa, mikä hankaloittaa typenpoistoa aktiivilieteprosessissa. Nykyisin on saatavilla kattavasti tietoa lämpötilan vaikutuksista typenpoistoon, mutta juuri jäteveden lämmön talteenoton vaikutuksia typenpoistoon ja aktiivilieteprosessin toimintaan ei ole tutkittu suomalaisissa olosuhteissa. Typenpoisto jätevedestä on erityisen tärkeää Suomessa, sillä esimerkiksi Itämeri on altis ylimääräisen typen aiheuttamalle rehevöitymiselle.

Työpaketissa analysoitiin ja arvioitiin saapuvan jäteveden lämpötilan vaikutuksia typenpoistoon (ammoniumtyppi) ja aktiivilieteprosessiin Kakolanmäen, Suomenojan sekä Viikinmäen jätevedenpuhdistamoilla sekä jäteveden lämmön talteenoton soveltuvuutta kyseisiin olosuhteisiin. Laskevan lämpötilan vaikutuksia analysoitiin ja arvioitiin kirjallisuuskatsauksen, puhdistamoilta kerätyn datan analysoinnin sekä prosessisimulointien avulla.

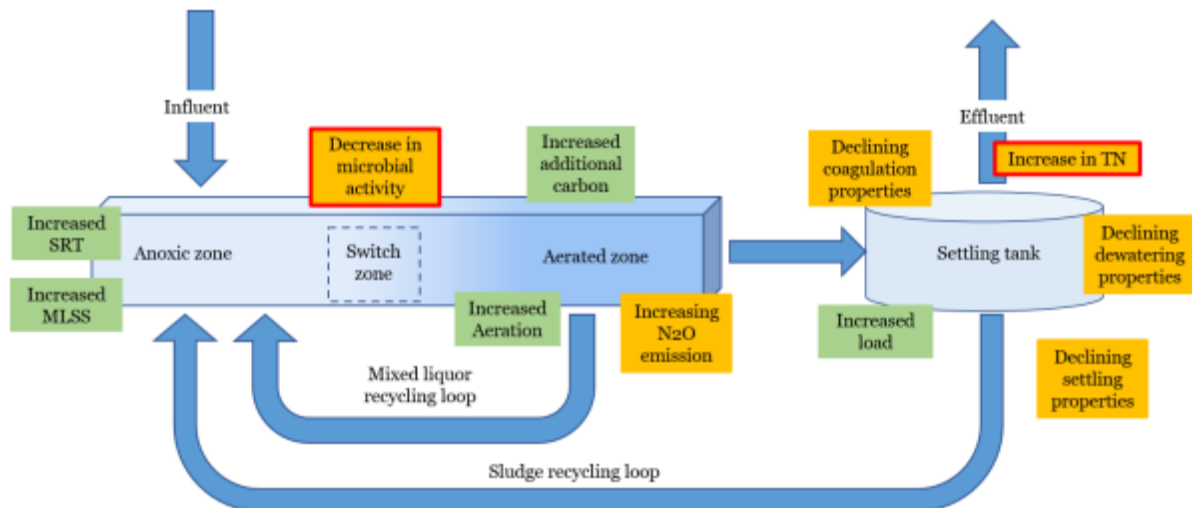
Typenpoiston tehokkuus aktiivilieteprosessissa heikkenee jäteveden ja sen myötä koko prosessin lämpötilan laskiessa. Mahdollisen hajautetun lämmöntalteenoton lisäksi

kirjallisuuskatsauksen perusteella usein keväisin toistuvat suuret kylmän veden virtaamat ovat riski aktiivilieteprosessin toiminnan kannalta. Prosessisimuloinneilla saatiin selville, että jokaisen alenevan lämpötila-asteen vaikutus typenpoistoon korostuu eritoten, kun jäteveden lämpötila laskee alle 10 °C. Simulointiin käytetyssä täyden mittakaavan puhdistamolle kalibroidussa prosessimallissa typestä poistui 85 % jäteveden lämpötilan ollessa 17 °C. Kun lämpötila oli 5 °C, typestä poistui 75 % . Data-analyysin tulokset tukivat sekä kirjallisuuskatsauksen että prosessisimulaatioiden tuloksia.



Kuva 3. Poistetun typen keskimääräinen osuus eri jätevedenpuhdistuslaitoksilla vuosina 2016–2020

Simulointien perusteella selvisi myös, että typenpoiston heikkenemisen kompensointi aktiivilieteprosessin tilavuuden suurentamisella on haastavaa, sillä esimerkiksi jo muutaman asteen jäteveden lämpötilan lasku 17 °C:sta vaatii aktiivilieteprosessin tilavuuden kasvattamista neljänneksellä. Jäteveden lämpötilan ollessa 7 °C aktiivilieteprosessin tilavuuden pitäisi kaksinkertaistua, jotta typenpoisto pysyisi samalla tasolla. Tämänkaltainen tilavuuden kasvattaminen on usein mahdotonta tilarajoitteiden ja taloudellisten rajoitteiden takia. Jäteveden lämpötilan laskiessa jätevedenpuhdistuslaitosten ilmastusaltaat tulee suunnitella suuremmiksi, mikä nostaa investointikustannuksia.



Kuva 4. Jäteveden lämpötilan laskun vaikutukset aktiivilieteprosessiin. Oranssilla merkityt vaikutukset johtuvat suoraan lämpötilan muutoksesta ja vihreällä merkityt ovat seurausta pakollisista kompensointitoimista. Keskeisimmät seuraukset on korostettu punaisella reunuksella.

3.4 Lämmönvarastoinnin innovatiiviset menetelmät

Työpaketin keskeiset havainnot:

- Puhdistamolle saapuvaa jätevettä voi joissakin tapauksissa olla kannattavaa lämmittää muutamalla asteella typenpoiston tehostamiseksi kausivarastoimalla puhdistetun jäteveden lämpöä.
- Saapuvan jäteveden lämmittämisen kannattavuuden rajana voidaan pitää 9 °C:ta, jota alhaisemmissa lämpötiloissa lämmittämisestä aiheutuvat kustannukset nousevat merkittävästi.
- Tuntuvaan lämpöön perustuvat varastot ovat edelleen kustannustehokkain tapa lämpövarastojen toteutukseen, mutta latenttilämpövarastoilla voitaisiin saavuttaa sama kapasiteetti pienemmällä varastointitilavuudella.

Työpaketissa selvitettiin kirjallisuuskatsauksen ja kahden tapaustutkimuksen avulla uusia tapoja hyödyntää puhdistetusta jätevedestä talteen otettavaa lämpöä. Työssä käytettiin dataa Helsingin Viikinmäen ja Espoon Suomenojan jätevedenpuhdistamoilta.

Ensimmäisessä tapaustutkimuksessa tutkittiin, voidaanko jätevedenpuhdistusprosessin tehokkuutta parantaa lämmittämällä puhdistamolle saapuvaa jätevettä jo puhdistetusta vedestä saatavalla lämmöllä. Tavoitteena oli selvittää, kuinka lämpimäksi saapuvaa jätevettä on mahdollista lämmittää, mitkä lämmityksen kustannukset ovat ja miten se vaikuttaa puhdistusprosessin typenpoiston vaatimaan allastilavuuteen.

Tulosten perusteella saapuvan jäteveden lämmitys voi olla kannattavaa joissain tapauksissa, korkeintaan muutamilla asteilla. Esimerkiksi nostamalla Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle

saapuvan veden matalinta lämpötilaa noin 6 °C:sta vuodesta riippuen 11,5–12 °C:een voidaan typenpoiston vaatimaa ilmastustilavuutta pienentää noin 7–8 %. Lämmityksen aiheuttamiksi sähköenergian kuluiksi saatiin tässä tapauksessa noin 157 000–252 000 €/a (tarkasteltujen kuukausien pörssisähkön verollisella keskihinnalla 54,43 €/MWh ennen Euroopan energia-kriisiä), kun taas matalimman puhdistamolle saapuvan veden lämpötilan nostaminen 9 °C:een olisi maksanut sähköenergian osalta 13 200 €. Kannattavuuden lämpötilarajana voidaan pitää 9 °C:ta, jonka yläpuolella lämmityksen kustannukset alkavat kasvaa voimakkaasti.

Toisessa tapaustutkimuksessa selvitettiin jäteveden lämmön kausivarastointiin sopivia lämpövarastointitekniikoita. Tapaustutkimuksen päätavoite oli vertailla latenttilämpövarastojen ja tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen soveltumista jäteveden lämmön kausivarastointiin. Toinen tavoite oli määrittää käytettävälle lämpövarastolle sopiva koko.

Tapaustutkimuksessa selvitettiin, että Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla puhdistettu vesi sisältää riittävästi energiaa suurenkin lämpövaraston lataamiseen, mikäli kesäisin on saatavilla myös muita hiilineutraaleja kaukolämmön lähteitä. Rajoittavaksi tekijäksi muodostuisi tässä tapauksessa lämpövaraston rakentamisen kustannukset. Varastokapasiteetiltaan noin 10 000 MWh:n lämpövarasto olisi teknisesti ja taloudellisesti toteutettavissa.

Tuntuvaan lämpöön perustuvien lämpövarastojen kustannukset ovat edelleen huomattavasti latenttilämpövarastoja matalampia. Toisaalta latenttilämpövarastoa käyttämällä voitaisiin kuitenkin saavuttaa sama varastointikapasiteetti pienemmällä varastointitilavuudella, jolloin varastointikapasiteettia on mahdollista rakentaa enemmän, mikä olisi erittäin hyödyllistä energiajärjestelmän toimivuuden kannalta.

Tiheästi rakennetuilla kaupunkialueilla latenttilämpövarastojen rakentamisesta tulee tehdä tulevaisuudessa lisäselvityksiä. Pienempien kaupunkien ja kuntien jäteveden lämmön varastointiin tuntuvaan lämpöön perustuvat lämpövarastot säilyvät todennäköisesti lähitulevaisuudessa ensisijaisena valintana huomattavasti matalampien rakennuskustannuksien takia. Toisaalta latenttilämpövarastoja käyttämällä lämpöä on mahdollista varastoida pienellä lämpötilaerolla, jolloin lämpötilaa ei tarvitse nostaa lämpöpumpuilla.

3.5 Jätevesilämmön talteenoton sääntelymahdollisuudet

Työpaketin keskeiset havainnot:

- Hajautetun lämmön talteenoton ohjaustarve näyttää olleen vähäistä sekä Suomessa että kansainvälisesti.
- Nykytilanne on osin ristiriitainen sääntelyn osalta, ja suuri osa nykyisistä sopimusehdoista perustuu suosituksiin.
- Ruotsissa edellytetään vesilaitoksen lupaa talteenottolaitteiston asentamiseen, kun taas Norjassa taloyhtiöitä rohkaistaan jätevesilämmön talteenottoon.
- Itävallassa jätevesilämmön talteenotto tapahtuu ennen puhdistamoa runkoviemäreissä.
- Suomessa suositeltava tapa toteuttaa sääntely tarvittaessa on liittymäsopimuksen kautta tai paikallisesti.

Työpaketissa tarkasteltiin sääntelykeinoja ja -mahdollisuuksia jäteveden sisältämän hukkalämmön talteenoton sääntelemiseksi ja hahmotellaan jäteveden talteenoton sääntelymahdollisuuksia ja -tarvetta lainsäädäntökatsauksen, haastattelujen ja kansainvälisen vertailun avulla. Kokonaisuudessaan aiheesta on julkaistu vähän kirjallisuutta, ja haastattelujen perusteella kiinteistökohtaisen jäteveden lämmön talteenoton ohjaustarve on toistaiseksi ollut melko vähäistä sekä Suomessa että kansainvälisesti. Jonkinasteista kiinnostusta asiaan on maissa, joissa ilmasto saattaisi aiheuttaa viemäreiden jäätymistä.

Suomessa jäteveden lämpötilaa tai lämmön talteenottoa ei tällä hetkellä säädellä normeissa. VVY:n, Kuntaliiton ja kuluttaja-asiamiehen laatimissa vesihuollon liittymis- ja käyttösopimusmallisuosituksissa on ehtoja, joita voidaan tarvittaessa soveltaa. Merkittävä osa vesilaitosten nykyisistä sopimusehdoista on laadittu näiden suositusten pohjalta. Ehdot ovat kuitenkin tulkinnanvaraisia.

Jäteveden mukana poistuu kiinteistön kustannuksella tuotettua lämpöä, joten kiinteistön omistajan intressi lämpöön on ymmärrettävä. Toisaalta jos jäteveden jäädyttäminen aiheuttaa verkoston ja puhdistamon toiminnalle haittaa, joku joutuu maksamaan haittojen korjauksien. Yleensä maksaja on asiakas eli kiinteistön omistaja, joka vesihuollon palveluja käyttää. Myös valtion ja kuntien kannalta tilanne on tällä hetkellä ristiriitainen; rakennusten energiatehokkuus ja jäteveden puhdistus kuuluvat eri hallinnonaloille, jotka katsovat usein toimenpiteitä oman hallintokuntansa näkökulmasta. Toimintojen ristikkäisvaikutuksia ei tunneta.

Ruotsissa ei lainsäädännössä oteta kantaa jäteveden lämmöntalteenottoon. Toimitusehtosuosituksissa edellytetään jätevesilämpöpumpuilta vesihuoltolaitoksen lupaa, ja käytännössä jätevesilämpöpumput on vesihuollon sopimuskäytännöllä kielletty useissa kunnissa. Norjassa ei ole lainsäädännössä otettu kantaa jätevesilämpöpumppuihin, ja kiinteistöjä rohkaistaan niiden asentamiseen. Itävallassa jäteveden lämmöntalteenottokapasiteettia on asennettu joihinkin runkoviemäriin, eikä sielläkään asentamista erityisesti säädellä tai rajoiteta lakiteitse.

Suomessa ja EU:ssa kiinteistökohtaisten lämpöpumppujen asentamista edistäisivät lämmön omistajuuskysymyksen lisäksi ilmastotavoitteet, rakennusten energiatehokkuussäätely sekä energiatehokkuuteen liittyvät kustannussäästö- ja liiketoimintamahdollisuudet. Suomessa ei näyttäisi olevan lainsäädännöllistä estettä Ruotsin kaltaiselle sopimussäätelylle, jos sellainen katsotaan kokonaisenergiatehokkuuden kannalta tarpeelliseksi. Sopimukset voitaisiin ottaa käyttöön paikallisella tasolla tai ottaa tilanne huomioon suosituksissa yleisiksi vesihuollon toimitusehdoiksi. Myös esim. viemärien jäätymistä aiheuttavat järjestelmät voidaan kieltää. Tällä hetkellä määräykset eivät yleisesti edellytä lämpötilamittausta kiinteistöjen jätevesijärjestelmiin, joten mahdollisten rajoitustoimien valvottavuus olisi ratkaistava jotenkin.

Sitovampi sääntelyvaihtoehto voisi olla säätää jätevesilämmön talteenotosta kunnan rakentamismääräyksissä rakennusluvan edellytyksenä. Rakennuslupa tarvitaan myös rakennuksen teknisiin järjestelmiin kohdistuviin korjaus- ja muutostöihin, joilla voidaan merkittävästi vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen. Tällä hetkellä ei tiedetä, millaiseksi rakennusluvan tarvesäätely on kehittymässä.

3.6 Lämmön talteenoton ristikkäisvaikutukset

Työpaketin keskeiset havainnot:

- Puhdistamolle saapuvan jäteveden jäädyttäminen voi pahimmillaan heikentää typenpoistoa merkittävästi.
- Typenpoiston näkökulmasta haastavimmat ajat lämmön talteenotolle ovat kevättalvella, kun maa on kylmä ja lämmöntarve suurta.
- Kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton energiahyöty suhteessa ammoniumtyppikuorman kasvuun on suurin kesäkuukausina.
- Tapaustutkimuksissa voidaan arvioida, että typenpoiston kompensointiin tarvitaan merkittäviä puhdistamoinvestointeja.
- Tapaustutkimuksista voidaan karkeasti arvioida, että puhdistamoinvestoinnin hinta per verkostosta talteenotettu energia on suuruusluokkaa 10–30 eur/MWh. Lisäksi on huomioitava luonnollisesti itse talteenoton investoinnit ja käyttökulut sekä puhdistamon käyttökulut.

Työpaketti käsitteli työpaketeissa 1–3 määritettyjen tulosten ristikkäisvaikutuksia. Keskeisenä asiana työpaketissa oli: a) määrittää kiinteistökohtaisesta jäteveden lämmöntalteenotosta laadittujen skenaarioiden energiahyöty suhteessa jätevedenpuhdistamolla tapahtuvaan typpi-kuorman kasvuun; sekä b) arvioida energiahyötyä suhteessa puhdistamokapasiteetin kasvattamisen aiheuttamiin kustannuksiin.

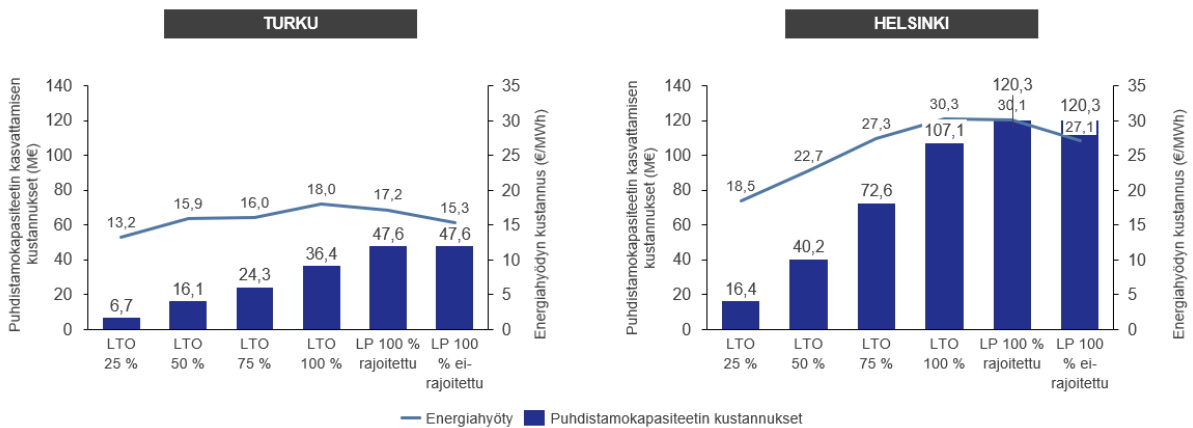
Työpakettien 1 ja 2 skenaariomallinnukset perustuivat Turun ja Helsingin esimerkkitalouksiin. Turussa tarkastelu kattoi Kakolanmäen puhdistamon ja Helsingissä Viikinmäen puhdistamon viemärintialueet. Näin ollen myös lasketut energiahyödyt perustuvat näiden alueiden erityispiirteisiin, kuten virtaamiin, verkostopituuksiin ja jäteveden lämpötiloihin.

Kun jätevettä jäädytetään kiinteistöillä, simulointien mukaan ammoniumtypen pitoisuusmuutos on suurimmillaan loppupalvesta, jolloin maaperän ja puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötila on matalammillaan jo ilman kiinteistökohtaista lämmöntalteenottoakin. Puhdistamolta mereen päätyvän ammoniumtyppipitoisuuden kasvu Turun esimerkkitalouksessa vaihtelee arviolta välillä 1,0–4,2 mg/l ja Helsingissä välillä 1,2–4,6 mg/l. Kakolanmäessä puhdistamolla käsitellyn ja vesistöön johdetun jäteveden keskimääräinen ammoniumtyppipitoisuus on vuonna 2021 vaihdellut kvartaalikeskiarvoina välillä 0,29–0,76 mg/l¹. Viikinmäessä vastaavat pitoisuudet ovat vaihdelleet välillä 1,0–1,8 mg/l.

¹ <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/ymparisto/raportit-ja-luvat>

Valituissa skenaarioissa ammoniumtyppikuorma kasvaa Turun esimerkkitapauksessa suurimmillaan +670 % ja pienimmillään +21 % nykytilanteeseen verrattuna. Suurin muutos tapahtuu maaliskuussa skenaariossa, jossa jätevesi jäädytetään lämpöpumpuilla aina 4 °C asteeseen. Pienin muutos puolestaan nähdään heinäkuussa. Vastaavasti suurin ammoniumtyppikuorman muutos Helsingin esimerkkitapauksessa on +450 % ja pienin +14 %.

Energiahyödyt voidaan arvioida karkeasti vuositasolla summaamalla kuukausittaiset hyödyt ja jakamalla ne tarvittavan puhdistamoinvestoinnin annuiteetilla. Kun käytetään 20 vuoden pitoaikaa ja 5 % laskentakorkoa, lämpöhyödyn hinnaksi tulee noin 10–30 eur/MWh. Energiahyödyn kustannus skaalautuu suoraan puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannusten mukaan (kuva 5).



Kuva 5. Vuotuisen energiahyödyn kustannus suhteessa puhdistamokapasiteetin kasvattamiseen (€/MWh)

4 Johtopäätökset

Lukuun 4 on kerätty hankkeen keskeiset ylätason johtopäätökset, jotka nivovat yhteen eri työpaketeissa tehtyjä päähavaintoja.

Koko hankkeen tuloksista vedetyt keskeiset johtopäätökset:

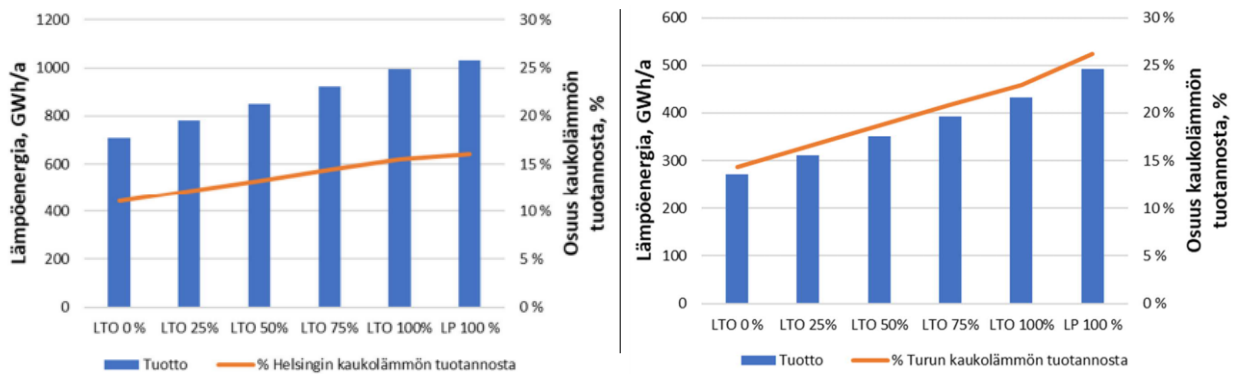
1. Kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa on merkittävää potentiaalia sekä merkittäviä vaikutuksia yhdyskuntien jätevedenpuhdistukseen
2. Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen kiinteistökohtaisesti vaatii merkittäviä investointeja
3. Käyttöveden lämmöntalteenotossa ja jäähdytyksessä on potentiaalia, joka on hyödynnettävissä ilman haittaa eri vesihuoltojärjestelmän osapuolille
4. Kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto voi vaatia lisäsääntelyä, joka toteutettaisiin ensisijaisesti liittymäsopimusten kautta
5. Jäteveden lämmöntalteenoton järjestelmätason kokonaiskannattavuuden arviointi vaatii lisäselvityksiä

Johtopäätösten taustoja ja merkittävyyttä sekä niihin liittyviä tulosten hyödyntämismahdollisuuksia, riskejä sekä jatkotutkimustarpeita työstettiin hankkeen toteuttajien ja rahoittajien työpajassa, ja tulokset on vedetty yhteen alaluvuissa alla.

4.1 Kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa on merkittävää potentiaalia sekä merkittäviä vaikutuksia yhdyskuntien jätevedenpuhdistukseen

Keskeisimpiä hankkeen johtopäätöksiä on, että kiinteistökohtaiseen jäteveden lämmöntalteenottoon liittyy merkittävää lämpöenergian tuottopotentiaalia, vaikka otetaan huomioon lämmöntuotannon pieneneminen jo olemassa olevissa keskitetyissä puhdistetun jäteveden lämmöntalteenottoratkaisuissa. Työpaketissa 1 arvioitiin, että eri skenaarioiden lämpöenergian tuottopotentiaali Helsingissä vaihtelee noin 800 – 1 000 GWh/a välillä, mikä tarkoittaisi noin 12 – 15 % osuutta koko Helsingin kaukolämmön tuotannosta (Kuva 6). Turun esimerkitapauksessa rakennusten vuotuinen lämpöenergian tuottopotentiaali on noin 300 – 500 GWh/a, joka on noin 16 – 26 % koko Turun kaukolämmön tuotannosta (Kuva 6). Lisäksi on hyvä huomioda, että esitetyt lukemat pätevät mallinnetuille verkosto-osille, jotka eivät pidä sisällään tiettyjä jätevesiverkoston osia Helsingin eikä Turun alueella. Mikäli mallinnettaisiin

kaikki verkosto-osat, kasvaksi rakennusten lämmöntalteenoton potentiaali edelleen suhteessa keskitetyn lämmöntalteenottolaitoksen pienentyvään lämmöntalteenottopotentiaaliin.



Kuva 6. Arvioitu kiinteistökohtainen jäteveden kokonaislämpöenergian tuottopotentiaali vuositasolla Helsingissä (vasen kuvaaja) ja Turussa (oikea kuvaaja).

Kiinteistö- tai pumppaamokohtainen lämmöntalteenotto pienentää verkostossa tapahtuvaa lämpöhäviötä verrattuna keskitettyyn talteenottoon. Perussy tälle on se, että maaperän lämpötila näyttäisi määrittävän jäteveden lämpötilaa puhdistamalla. Jätevesiverkosto voi toimia kiinteistöiltä lähtevän jäteveden lämpötilasta riippuen joko lämmönkerääjänä tai lämpöhäviöiden lähteenä. Hajautetun jäteveden hukkalämmön talteenoton terminen kannattavuus vaihtelee kuitenkin vuodenaikojen mukaan. Hukkalämmön talteenotto ei näyttäisi aiheuttavan tukos- tai jäätymisriskejä tarkastelluissa jätevesiverkostoissa.

4.1.1 Tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja jatkotutkimusaiheet

Yleisesti voidaan todeta, että vaikka kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa todetaan olevan merkittävää potentiaalia energiahyödyille, asiaan liittyy useita epävarmuuksia, jotka vaativat lisäselvittämistä. Suurimmat epävarmuudet kohdistuvat jäteveden puhdistusprosessin toimivuuteen alhaisemmassa lämpötilassa sekä mahdollisiin haasteisiin jätevesiverkostossa. Myös tulosten skaalaamisen isompaan mittakaavaan todettiin vaativan lisäselvittämistä. Yhtenä soveltuvana ratkaisuna asian edistämiseksi nähtiin pilotoinnit valituilla verkkoalueilla.

Tulosten hyödyntämismahdollisuudet

- Arvioitu kokonaisenergiahyöty kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa on merkittävä ja potentiaalia arvioidaan olevan laajasti myös tarkasteltujen verkkoalueiden ulkopuolella.
- Jos kiinteistöllä samoja lämpöpumppuja pystytään käyttämään hyödyntämään useampaa hukka- tai ympäristölämpöä, kasvaa järjestelmän kokonaislämmöntuotantopotentiaali sekä kannattavuus.
- Nykytilanteessa viemäriin johdettava vesi voi joissakin teollisuuskohteissa olla jopa liian kuumaa, ja sitä jäähdytetään ennen viemäriin päästämistä. Tällaiset kohteet

olisivat erityisen kiinnostavia kohteita kiinteistökohtaiselle lämmöntuotannolle jätevedestä.

- Seuraava askel tulosten hyödyntämisessä voisi olla kiinteistökohtaisten jäteveden lämmöntalteenottoratkaisuiden pilotointi valituilla alueilla, minkä perusteella mallinnustuloksia voitaisiin validoida.

Tuloksiin liittyvät riskit ja epävarmuudet

- Nyt tehty työ on tapaustutkimus kahdessa viemäriverkostossa ja yhdessä käyttövesiverkostossa, joten ilman lisäselvityksiä tuloksia voidaan yleistää vain rajatusti.
- Jäteveden kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto vaikuttaa jäteveden puhdistusprosessiin ja puhdistetun jäteveden typpipitoisuuteen erityisesti kylminä vuodenaikoina, jolloin pahimmassa tapauksessa koko puhdistusprosessi voisi vaarantua ilman prosessiin tehtäviä investointeja.
- Jos puhdistamon puhdistustulos heikkenee kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton johdosta, suurenevät negatiiviset vaikutukset vesistöön. Viime kädessä ympäristölupaehdot eivät välttämättä enää täyty.
- Tässä saaduista tuloksista huolimatta ei voida olla varmoja siitä, että jäteveden alhaisempi lämpötila ei aiheuttaisi jätevesiverkostossa paikallisia ongelmia, esim. rasvatukoksia, joista on myös käytännön esimerkkejä.
- Jäteveden pitkittynyt alhaisempi lämpötila voi aiheuttaa kerrannaisvaikutuksia jäteveden puhdistusprosessiin esim. aktiivilietteen mikrobipopulaation, laskeutuvuuden ja muiden ominaisuuksien muuttumisen myötä. Jäteveden typpipitoisuus ei ole ainoa mittari prosessin toimivuudelle.

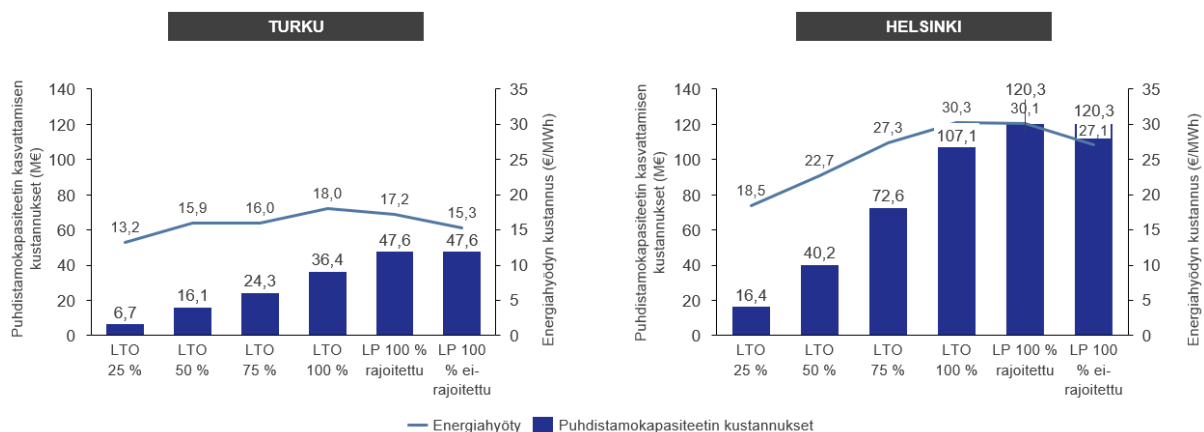
Jatkotutkimustarpeet

- Tulosten yleistettävyys ja skaalaaminen: eri alueiden jätevesiverkostot ovat erilaisia ja niissä on eri määrät vuotoja ja hulevesiä sekä erilaiset olemassa olevat lämmöntalteenottoratkaisut. Miten tulokset olisivat skaalattavissa esim. koko maanlaajuiseksi?
- Miten jäteveden lämmöntalteenotto toimisi kaupungeissa/kunnissa, joissa pakkasjaksoit ovat mallinnettuja Helsingin ja Turun tapauksia pidempiä ja kylmempiä?
- Sähkö- ja energiamarkkinatilanne on muuttunut radikaalisti vuoden 2022 aikana. Miten muuttunut tilanne vaikuttaa mallinnuksen tuloksiin ja johtopäätöksiin?
- Hankkeessa hyödynnettiin rajallista mittausdataa kahdesta jätevesiverkostosta. Aiheen tarkempi mallinnus vaatisi kattavamman mittausdatan keräämisen ja tarkemman datan hyödyntämisen mallinnuksessa.

4.2 Jäteveden hukkalämmön hyödyntäminen kiinteistökohtaisesti vaatii merkittäviä investointeja

Kokonaisuutena kiinteistökohtainen jäteveden lämmöntalteenotto aiheuttaa merkittäviä investointitarpeita, jotka kohdistuvat tapauksesta riippuen eri toimijoille. Jäteveden lämpötilan laskeminen heikentää jäteveden puhdistustulosta, mikä tarkoittaa lisäinvestointitarvetta puhdistamokapasiteettiin sekä kohonneita käyttökustannuksia saman puhdistustuloksen aikaansaamiseksi. Jätevettä saattaa kannattaa myös lämmittää puhdistamolla riittävän puhdistustuloksen aikaansaamiseksi. Huomiotta ei voida jättää myöskään sitä, että olemassa olevien keskitettyjen lämpöpumppulaitosten tuotanto pienenee, jos jäteveden lämpötila laskee.

Suuruusluokalleen hankkeen tapaustutkimuksissa on arvioitu, että ennen puhdistamoalteen otettu lämpö maksaa lisättävänä puhdistamokapasiteettina 10–30 eur/MWh (Kuva 7). Lisäksi tulevat varsinaiset talteenoton investoinnit ja käyttökulut sekä puhdistamon käyttökulut, joita ei tarkasteltu tässä työssä. Talteenoton kustannukset kohdistuvat kiinteistökohtaisessa talteenotossa kiinteistönomistajille ja pumppaamo- ja puhdistamokohtaisessa talteenotossa vesihuoltolaitokselle tai energiayhtiölle. Kiinteistönomistajat joutuvat kuitenkin maksamaan puhdistamokapasiteetin kasvattamisen ja kohonneet puhdistamon käyttökustannukset vesi- ja jätevesimaksuissaan.



Kuva 7. Tapaustutkimuksissa arvioidut investointikustannukset puhdistamokapasiteetin kasvattamiseen

4.2.1 Tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja jatkotutkimusaiheet

Jäteveden kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton aiheuttamia investointitarpeita tarkasteltiin tässä työssä varsin rajallisesti, mutta jo alustavan arvion perusteella voidaan todeta, että investointitarpeet olisivat merkittävät. Työn tapaustutkimuksissa esimerkiksi arvioitiin, että puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannukset liikkuisivat Helsingissä noin 16 – 120 Meur välillä ja Turussa 7 – 48 Meur välillä. Huomioiden Viikinmäen ja Kakolanmäen puhdistamoiden sijainti kallion sisällä, voisi todellinen investointikustannus olla vielä tätä huomattavasti suurempi. Pahimmassa tapauksessa kapasiteetin kasvattaminen ei olisi lainkaan mahdollista. Kiinteistökohtaisten lämmöntalteenottojärjestelmien kustannuksia ei työssä arvioitu, mutta myös niiden voidaan olettaa olevan merkittäviä. Laitoskoon kasvaessa yksikköhinta

yleensä pienenee, eli kiinteistökohtainen kapasiteetti tulee kalliimmaksi kuin keskitetty kapasiteetti, mutta toisaalta kiinteistöillä lämpöä tehdään lämpimämmästä vedestä, jolloin lämpökerroin on yleensä korkeampi.

Tulosten hyödyntämismahdollisuudet

- Kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton yleistyminen avaisi markkinoita suomalaisille alan toimijoille, sekä edesauttaisi niiden teknologian kehittämistä ja vientiä.

Tuloksiin liittyvät riskit ja epävarmuudet

- Kiinteistökohtainen jäteveden lämmöntalteenotto vaikuttaisi puhdistetun jäteveden lämmöntalteenottoon jo tehtyjen investointien kannattavuuteen.
- Lämpöpumppujen asentaminen vaatii toimenpideluvan, joiden myöntämiseen liittyvissä toimintamalleissa on huomattavia kuntakohtaisia eroja. Paikoin puutteelliset toimintamallit ovat saattaneet johtaa asennuksiin, jotka ovat laittomia tai ei-turvallisia. Kiinteistökohtaisten lämpöpumppujen merkittävä yleistyminen vaatisi panostuksia yhteisten maanlaajuisten toimintamallien sopimiseen.
- Jos investointeja kiinteistökohtaisiin ratkaisuihin ei säädellä, voi syntyä merkittävä määrä erilaisia ratkaisuja, mikä vaikeuttaa kokonaisuuden valvontaa ja hallintaa.
- Myös asiakkaiden yhdenvertaisuus tulee huomioida: ei voi olla niin, että ensin toimivat liittymäasiakkaat voivat asentaa kiinteistökohtaisen talteenoton, mutta myöhemmin toimivat eivät.

Jatkotutkimustarpeet

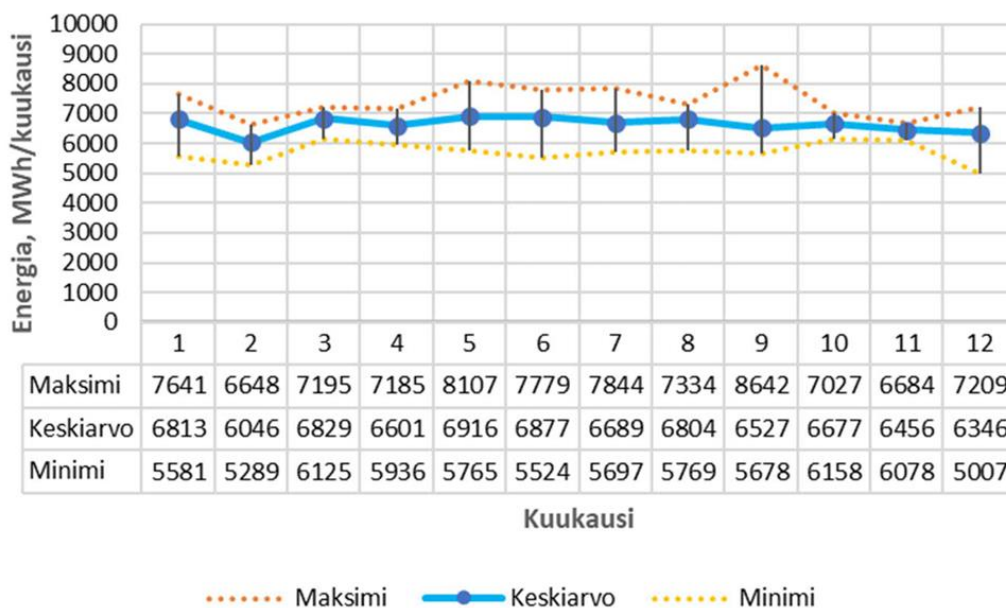
- Minkälaisia erilaisia liiketoimintamalleja kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton yhteyteen voi kehittyä? Kuka toimii investoijana, ja mihin investoinnit kohdistuvat? Minkälaisia toimittaja-asiakassuhteita malleissa voi rakentua, ja kuka maksaa kenelle eri malleissa?
- Mitkä ovat kiinteistökohtaisten lämmöntalteenottoratkaisuiden aiheuttamat investointi- ja käyttökustannukset mallinnetussa mittakaavassa? Entä mitkä olisivat vastaavat kustannukset, mikäli ratkaisuja skaalattaisiin laajemmalle?
- Onko jäteveden lämpötilan laskulla muita vaikutuksia jäteveden puhdistusprosessiin kuin tarve kasvattaa puhdistamokapasiteettia, mitkä muut vaikutukset voivat olla?
- Miten huomioidaan olemassa olevien keskitettyjen lämpöpumppulaitosten tuotannon väheneminen?

4.3 Käyttöveden lämmöntalteenotossa ja jäähdytyksessä on potentiaalia, joka on tietyn edellytyksin hyödynnettävissä ilman haittaa eri vesihuoltojärjestelmän osapuolille

Erityisen lupaavalta lämmöntalteenotto- ja jäähdytysratkaisulta vaikuttaa työpaketissa 1 tutkittu raaka-/käyttöveden lämmöntalteenotto ja/tai siitä tehtävä kaukokylmä. Tapaustutkimuksissa tarkasteltiin Turussa Virttaankankaalta Saramäelle johtavaa käyttövesilinjaa, josta olisi laskelmien mukaan saatavissa vuositasolla noin 120 GWh/a lämmitysenergiaa (Kuva 8). Lisäksi Virttaankankaalta Oripäänkankaan pohjavesiottamon kautta Laakkarin kalliosäiliöön johtavassa linjassa olisi karkeasti noin 30 GWh/a lämmitysenergiapotentiaali. Yhteensä nämä kattaisivat noin 8 % Turku Energian vuonna 2020 toimittamasta kaukolämpöenergiasta.

Käyttövettä olisi mahdollista hyödyntää myös jäähdytykseen. Työpaketissa 1 tehdyissä mallinuksissa arvioitiin, että parhaimmillaan käyttöveden hyödyntäminen jäähdytykseen jopa kaksinkertaistaisi lämmityspotentiaalin, jos jäähdytystä ja lämmitystä voitaisiin hyödyntää täysimääräisesti koko vuoden.

Koska tapaustutkimusten verkostosimulaatioiden perusteella käyttövesi saapuu kuluttajille pitkässä verkostossa joka tapauksessa lämpötilassa, joka on lähellä maaperän lämpötilaa, ei käyttövettä tarvitse lämmittää kiinteistöillä. Tästä johtuen käyttöveden lämmöntalteenotolla ei arvioitu olevan vaikutusta vesiverkoston tai sen osapuolten toimintaan. Käyttövedestä tehtävän lämmön talteenoton toteutuksessa tulee varmistaa, että talteenotto ei missään tilanteessa vaaranna käyttöveden laatua, eli esim. eliminoitava lämmönsiirtoaineen ja veden sekoittumisriski.



Kuva 8. Kuukausitason lämmitysenergian tuottopotentiaaliarviot Turun tapaustutkimuksessa (Virttaankankaalta Saramäelle johtava käyttövesilinja)

4.3.1 Tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja jatkotutkimusaiheet

Tunnistetut käyttöveden lämmöntalteenottoon liittyvät tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja epävarmuudet sekä jatkotutkimustarpeet heijastelevat aiheen uutuutta. Aihetta ja siihen liittyvää potentiaalia ei ole aiemmin juurikaan tutkittu, joten keskeisenä asiana työssä tunnistettiin tarve aiheeseen liittyville ensimmäisille pilotoinneille. Myös erilaisten verkosto-alueiden ja kaupunkien ominaispiirteiden todettiin aiheuttavan tulosten tulkintaan ja skaalaukseen epävarmuutta, joka voi vaatia lisäselvityksiä.

Tulosten hyödyntämismahdollisuudet

- Käyttöveden lämmöntalteenoton potentiaalia ei ole aiemmin tunnettu. Samoin kuin jätevedessä myös käyttöveden lämmöntalteenotossa potentiaalia arvioidaan olevan laajasti myös tarkasteltujen alueiden ulkopuolella.
- Tietoa maaperän vaikutuksista käyttö- tai jäteveden lämpötilaan ei ole aiemmin ollut saatavilla, minkä takia asia ei ole todennäköisesti toteutunut vielä tähän päivään mennessä. Aiheeseen liittyy merkittävää potentiaalia erilaisten lämmöntalteenotto- ja jäähdytysratkaisujen kehittämiseksi.
- Seuraavana vaiheena käyttöveden lämmöntalteenoton pilotointi valitulla alueella, minkä perusteella mallinnustuloksia voitaisiin validoida ja hyödyntää ratkaisujen jatkokehittämisessä.

Tuloksiin liittyvät riskit ja epävarmuudet

- Lämmönsiirtoaineiden sekoittuminen käyttövedeen sekä muut terveysturvallisuuteen liittyvät vaatimukset voivat vaikuttaa ratkaisuiden toteutettavuuteen.
- Käyttöveden lämmöntalteenoton mahdolliset vaikutukset vedenkäsittelyprosessiin.

Jatkotutkimustarpeet

- Eri kaupunkien/kuntien ja niiden vesiverkostojen ominaisuudet ovat erilaiset. Tulosten yleistettävyyden ja skaalaaminen laajemmalla maantieteelliselle alueelle voi vaatia lisätutkimuksia.
- Aiheen tarkempi mallinnus ja analyysi tulosten skaalaamisesta vaatisi tuekseen kattavamman määrän mittausdataa.

4.4 Kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto voi vaatia lisäsäätelyä, joka toteutettaisiin ensisijaisesti liittymäsopimusten kautta

Erityisesti mikäli alueellinen vesihuoltolaitos päätyy keskitettyyn tai verkostoon hajautettuun lämmöntalteenottoon, tai puhdistamokapasiteetin laajentaminen ei ole mahdollista, hajautettua jäteveden lämmöntalteenottoa tulisi säädellä. Jäteveden lämmöntalteenottoa kiinteistöillä voidaan tarvittaessa säädellä lakitasolla, rakennuslupatasolla tai liittymäsopimustasolla. Tällä hetkellä liittymäsopimustaso vaikuttaa näistä soveliaimmalta. Tarvittaessa kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto voidaan kieltää tai sen tehoa voidaan säädellä. Jälkimmäinen edellyttää kuitenkin jäteveden lämpötilamittausta kiinteistöllä ja sen valvontaa.

4.4.1 Tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja jatkotutkimusaiheet

Tulosten hyödyntämismahdollisuudet

- Kiinteistökohtainen jäteveden lämmöntalteenotto on tällä hetkellä varsin vähän säänneltyä toimintaa, mikä mahdollistaa monipuolisesti erilaisten soveltuvien ratkaisujen toteuttamisen.
- Aihetta on käsitelty kansainvälisesti varsin vähän, joten tässä hankkeessa tuotettujen tulosten jatkoksi on hyvä rakentaa tarkempia selvityksiä.

Tuloksiin liittyvät riskit ja epävarmuudet

- Jätevesitoimintaa ohjaavan lainsäädännön mukaan kiinteistöltä viemäriin johdettava jätevesi ei saa aiheuttaa haittaa jäteveden puhdistukselle. Jäteveden kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto erityisesti kylminä vuodenaikoina voi olla ristiriidassa tämän reunaehdon kanssa.
- Kiinteistökohtaisen lämmöntalteenottolaitteiston sijoittaminen voi olla ongelmallista riippuen siitä kuuluuko tonttijohto kiinteistölle vai vesilaitokselle. Teollisuudessa lämmön talteenottaja voi olla vielä kolmas osapuoli tonttijohdon sijaintiin liittyvässä asemelmassa.

Jatkotutkimustarpeet

- Jäteveden lämmöntalteenottoon liittyy perustavanlaatuisia jatkotutkimusaiheita, kuten esim. se, kuka omistaa jäteveden lämmön, ja miten sen talteenoton aiheuttamat lisäkustannukset tulisi jakaa vesihuoltolaitoksen ja asiakkaan välillä.
- Oma kysymyksensä on, miten olemassa oleville, tietyn jäteveden virtaaman ja keskilämpötilan perusteella mitoitetuille keskitetyille lämmön talteenottolaitoksille hyvitetään niiden tuotannon pieneneminen jäteveden jäähtymisen seurauksena.

- Tässä saatujen tulosten näkökulmasta voisi olla perusteltua rajata talteenottoa esim. valitulle maantieteelliselle alueelle tai vai tietyille kalenterikuukausille. Tällaisten rajausten toteutettavuus sääntelyn näkökulmasta vaatisi lisätutkimusta.

4.5 Jäteveden lämmöntalteenoton järjestelmätason kokonaiskannattavuuden arviointi vaatii lisäselvityksiä

Käsillä olevassa työssä on raapaistu kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenottomahdollisuuksien selvittelyn pintaa selvittämällä erilaisten jäteveden kiinteistökohtaisten lämmöntalteenottoratkaisujen toteuttamismahdollisuuksia ja reunaehtoja sekä toteutukseen liittyviä ilmiöitä ja vaikutuksia. Lisäksi on selvitetty karkeasti puhdistamokapasiteetin laajentamisen kustannusvaikutuksia suhteessa talteenotettavaan lämpöenergiaan. Tässä tehdyn työn perusteella on selvää, että ainakin tarkastellun tyyppisissä isoissa verkostoissa talteenottoon liittyy merkittävää potentiaalia.

Kokonaiskannattavuustarkasteluja työssä ei kuitenkaan ole tehty. Kustannuksia ja hyötyjä tulisi jatkoselvityksissä tarkastella eri sidosryhmien näkökulmista vastaavan lämmöntalteenottokapasiteetin rakentamiselle joko kiinteistökohtaisesti, pumppaamotasolla tai keskitetysti puhdistetulle jätevedelle. Samalla tulisi arvioida saatavaa hyötyä, tarvittavia investointeja, hyödyn jakautumista ja mahdollisia menetysten kompensointeja (side payments).

4.5.1 Tulosten hyödyntämismahdollisuudet, riskit ja jatkotutkimusaiheet

Työssä tunnistettiin useita tekijöitä, joiden yksityiskohtainen selvittäminen ei sisällynyt tähän hankkeeseen, mutta jotka vaikuttavat laajamittaisen kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton kokonaiskannattavuuteen. Tällaisia ovat mm. mahdollisuus hyödyntää lämpöpumppuja kiinteistöissä muuhunkin lämmöntuotantoon kuin jätevedestä talteenotettavaan lämpöön. Toisaalta tunnistettiin, että kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton yleistyessä olemassa oleva lämmöntalteenottoinfra jää hyödyntämättä, mikä ei ole kokonaisuuden kannalta optimaalisinta. Lisäksi kiinteistökohtaisten ratkaisujen kokonaisinvestointi- ja -käyttökustannuksia tai jätevedenpuhdistamon käyttökustannuksia ei tarkasteltu, joten ei ollut mahdollista vertailla lämmöntuotannon yksikkökustannusta eri tapauksissa.

Tulosten hyödyntämismahdollisuudet

- Toteutetussa hankkeessa tarkasteltiin vain kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton potentiaalia. Kiinteistöihin asennettavat lämpöpumput mahdollistaisivat myös muun lämmöntuotannon kiinteistöissä, mikä vaikuttaisi myös kokonaisuuden potentiaaliin ja kannattavuuteen.

- Kiinteistökohtaiset lämmöntuotantoratkaisut voisivat olla osa laajempaa matalalämpöistä ja kaksisuuntaista kaukolämpöverkkoa. Tätä mahdollisuutta ei tarkasteltu tässä työssä.
- Tulosten hyödynnettävyys on erityisen mielenkiintoista jätevesiverkostoissa, joissa ei ole vielä puhdistetusta jätevedestä toteutettavaa keskitettyä lämmöntalteenottoa.
- Jäteveden lämmöntalteenoton kokonaisuuteen liittyy erilaisten ratkaisuiden sekä osaamisen vientipotentiaalia, mikä vaikuttaa kokonaisuuden kansantaloudelliseen kokonaiskannattavuuteen.

Tuloksiin liittyvät riskit ja epävarmuudet

- Olemassa oleva puhdistetun jäteveden lämmöntalteenoton infra jää osittain käyttämättä, jos siirrytään kiinteistökohtaisiin ratkaisuihin.
- Kiinteistökohtaiset ratkaisut eivät mahdollista lämmöntarpeen risteilyn hyödyntämistä kokonaisjärjestelmän sisällä toisin kuin keskitetty lämmöntalteenotto puhdistetusta jätevedestä. Mitä tämä tarkoittaisi koko järjestelmän kannattavuuden näkökulmasta?
- Kokonaiskannattavuuteen olennaisesti vaikuttavat jätevedenpuhdistuksen investointitarpeet ja käyttökustannusmuutokset ovat pitkälti tapauskohtaisia ja riippuvat esim. puhdistamojen toteutustavasta ja käytettävissä olevasta kapasiteetista

Jatkotutkimustarpeet

- Mitkä olisivat lämmöntuotannon kokonaisinvestointi- ja -käyttökustannukset kiinteistökohtaisessa jäteveden lämmöntalteenotossa ja miten ne vertautuisivat vastaavaan keskitettyyn ratkaisuun?
- Mikä olisi lämmöntalteenoton yksikköhinta kiinteistökohtaisella ja keskitetyllä ratkaisulla huomioiden talteenottoratkaisut, lämmön jakeluinfra jne.?
- Miten inkrementaalinen siirtymä keskitetystä jäteveden lämmöntalteenotosta kiinteistökohtaiseen hajautettuun lämmöntalteenottoon olisi toteutettavissa?
- Miten kiinteistökohtainen jäteveden lämmöntalteenotto tulisi toteuttaa laajassa mitakaavassa verkostossa, jossa ei ole olemassa olevaa keskitettyä lämmöntalteenottoa?

LIITE: JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTON RISTIKKÄISVAIKUTUKSET

Tuukka Rautiainen, Tuomas Raivio, Ulla Värre
Gaia Consulting Oy

Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn -hankkeen työpaketti 6 käsitteli työpaketeissa 1–3 määritettyjen tulosten ristikkäisvaikutuksia. Keskeisenä asiana työpaketissa 6 oli: a) määrittää kiinteistökohtaisesta jäteveden lämmöntalteenotosta laadittujen skenaarioiden energiahyöty suhteessa jätevedenpuhdistamolla tapahtuvaan typpikuorman kasvuun; sekä b) arvioida energiahyötyä suhteessa puhdistamokapasiteetin kasvattamisen aiheuttamiin kustannuksiin. Näistä kahdesta ristikkäisvaikutuksesta laadittuja analyysejä on esitetty luvuissa 4.2 ja 4.3.

Tarkastelun toteutustapa

Ristikkäisvaikutusten laskentaan saatiin syötteitä työpaketeista 1-3 Kuva 9 mukaisesti. Työpaketissa 1 arvioitiin kiinteistöissä jätevedestä talteen otettavissa olevan ja lämpöpumpuilla tuotettavan lämpöenergian määrää. Lisäksi kyseinen työpaketti arvio kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton kokonaisenergiahyötyä, joka määritettiin huomioimalla pienempi lämpöenergian tuotto keskitetyssä lämmöntalteenotossa jätevedenpuhdistamon jälkeen. Työpaketin 2 syötteenä toimi lämmöntalteenoton vaikutuksien määrittäminen puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan. Työpaketista 3 puolestaan kerättiin tieto alhaisemman jäteveden lämpötilan vaikutuksista puhdistetun jäteveden ammoniumtyppipitoisuuteen (mg/l) sekä toisaalta tarvittavan puhdistamokapasiteetin kasvattamisen tarpeeseen, olettaen, että puhdistetun jäteveden typpikuorman (kg/d) ei sallita kasvavan lähtötilanteesta. Edellä kuvattujen syötteiden perusteella työpaketissa 6 määritettiin kiinteistökohtaisella jäteveden lämmöntalteenotolla saavutettava energiahyöty suhteessa kasvavaan ammoniumtyppikuormaan sekä puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannuksiin eri skenaarioissa.



Kuva 9 Ristikkäisvaikutusten laskennan toteutustapa

Ristikkäisvaikutuksissa on tarkasteltu työpaketissa 3 tehdyn rajauksen mukaisesti typpipitoisuuden ja -kuorman osalta muutoksia ammoniumtypen määrässä. Jätevedessä on tyypeä myös nitraattityyppinä, jonka poistumiseen lämpötilalla on pienempi vaikutus.

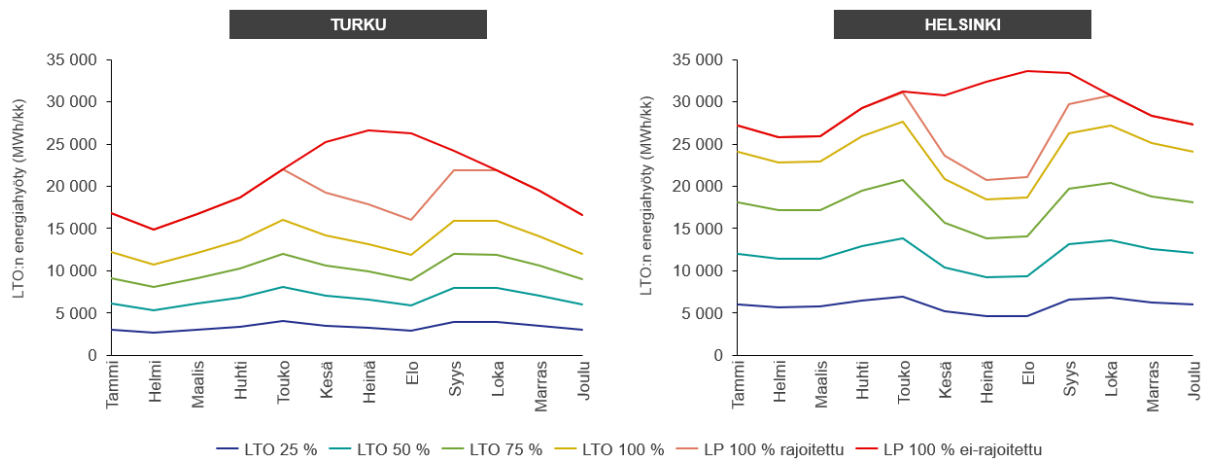
Työpakettien 1 ja 2 skenaariomallinnukset perustuivat Turun ja Helsingin esimerkkitalouksiin. Turussa tarkastelu kattoi Kakolanmäen puhdistamon ja Helsingissä Viikinmäen puhdistamon viemärintialueet. Näin ollen myös lasketut energiahyödyt perustuvat näiden alueiden erityispiirteisiin, kuten virtaamiin, verkostopituuksiin ja jäteveden lämpötiloihin.

Energiahyöty suhteessa kasvavaan typpikuormaan jätevedenpuhdistamoilla

Kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton energiahyötyä tarkasteltiin työpaketissa 1 kuudessa eri skenaariossa, jotka on kuvattu alla.

- 1) 25 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenotoilla ja 25 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 25 %)
- 2) 50 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenotoilla ja 50 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 50 %)
- 3) 75 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenotoilla ja 75 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 75 %)
- 4) kaikkiin pientalot varustettiin suihkujen lämmöntalteenotolla ja kaikki kerrostalot lämpöpumpuilla (LTO 100 %)
- 5) kaikki talot varustettu lämpöpumpuilla, joiden lämmöntuotanto rajataan kiinteistön lämmöntarpeeseen (LP 100 % rajoitettu)
- 6) kaikki talot varustettu lämpöpumpuilla, joiden lämmöntuotantoa ei rajata vaan jätevesi jäähdytetään aina 4 °C asteeseen (LP 100 % ei-rajoitettu)

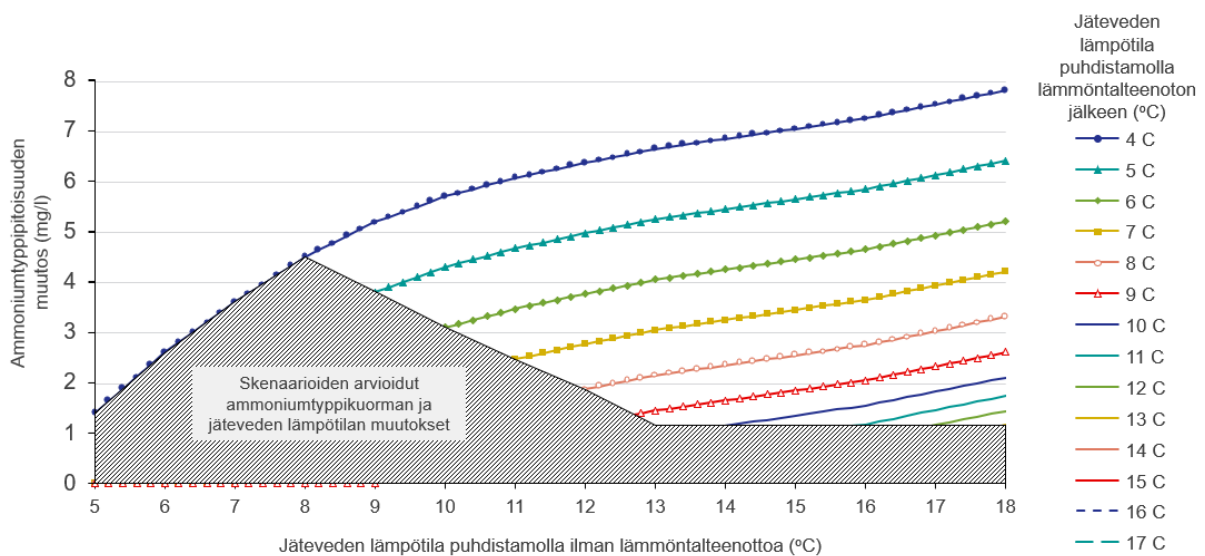
Kyseisten skenaarioiden arvioitu energiahyöty sekä Turun että Helsingin esimerkkitalouksissa on esitetty alla Kuva 10. Kuukausittainen energiahyöty vaihtelee Turussa noin 2 700 - 26 600 MWh/kk välillä ja Helsingissä noin 4 600 - 33 700 MWh/kk välillä. Mikäli jätetään huomioimatta skenaario, jossa lämpöpumppujen tuotantoa ei rajoiteta, on suurin kuukausittainen energiahyöty Turussa 22 000 MWh/kk ja Helsingissä 31 200 MWh/kk. Helsingin alueen suurempi energiahyöty perustuu alueen suurempaan jätevesivirtaamaan. Rakennuksilla talteenotetun kuukausittaisen lämpöenergian energiahyödyssä erottuu selvästi kesäkuukaudet, jolloin lämmöntalteenottoa rajoitetaan lämmöntarpeen mukaan. Kesällä jäteveden lämpöä käytetään vain käyttöveden lämmittämiseen ja kiertojäviöiden kattamiseen.



Kuva 10 Energiahäyöty huomioiden pienempi tuotto keskitetyssä lämmöntalteenotossa (MWh/kk)

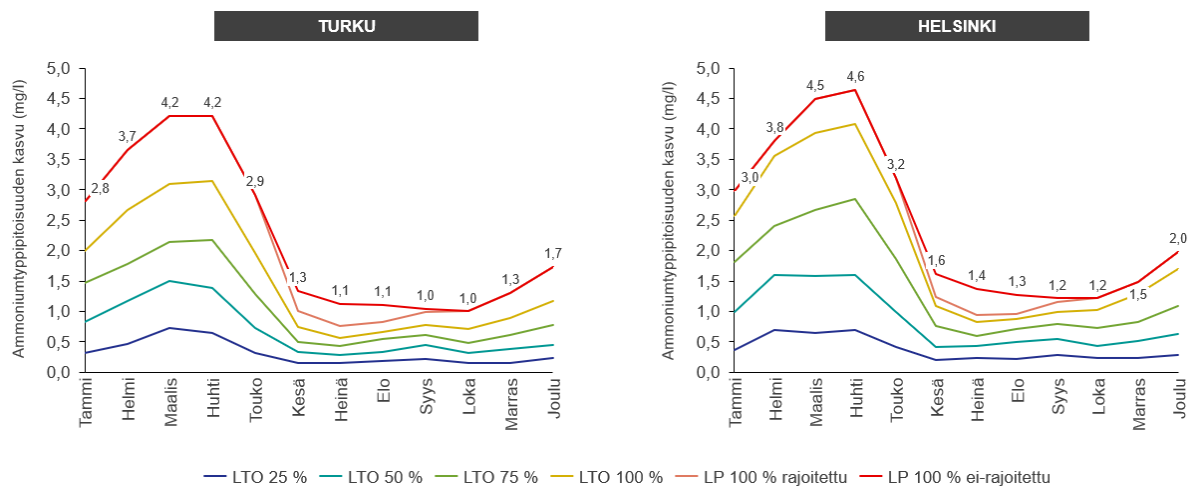
Työpaketti 3 käsitteli jäteveden lämmöntalteenoton vaikutuksia typenpoistoon ja aktiiviliete-prosessiin. Kyseisessä työpaketissa muodostettiin arvio jätevedenpuhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan muutosten vaikutuksista puhdistetun jäteveden ammoniumtyppikuormaan. Keskeisenä tuloksena kyseisestä työpaketistä voidaan todeta, että mitä alhaisempi jäteveden alkulämpötila on, sitä suurempi vaikutus yhden °C asteen muutoksella on ammoniumtyppikuormaan.

Kuva 11 on esitetty arvio ammoniumtyppipitoisuuden muutoksista puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilamuutosten perusteella. Kuvaan on lisäksi merkitty Turun ja Helsingin esimerkkitalpausten perusteella realistisiksi arvioidut lämpötila- ja ammoniumtyppipitoisuusmuutokset. Suurimmillaan lämpötilamuutos on arviolta reilu 5 °C, joka toteutuu loppukesän kuukausina, jolloin maaperän lämpötila on korkeimmillaan. Pienimmillään lämpötilamuutos on puolestaan talvikuukausina. Suurin muutos ammoniumtyppipitoisuudessa saavutetaan matalissa lämpötiloissa, kun lämpötila putoaa 8 °C asteesta noin 4 °C asteeseen. Tällöin ammoniumtyppipitoisuus kasvaa noin 4,6 mg/l.



Kuva 11 Skenaarioiden perusteella arvioitu realistinen ammoniumtyppikuorman muutos suhteessa jäteveden lämpötilan muutokseen puhdistamolla (mg/l)

Kun huomioidaan työpakettien 1 ja 2 tuloksena saadut arviot puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötiloista kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton kanssa sekä ilman sitä, voidaan Kuva 11 dataa hyödyntämällä arvioida ammoniumtyppipitoisuuden kasvu puhdistamolla Turun ja Helsingin esimerkkitaupauksissa. Kuva 12 voidaan todeta, että ammoniumtyppipitoisuuden muutos on suurimmillaan loppupalvesta, jolloin maaperän ja puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötila on matalammillaan jo ilman kiinteistökohtaista lämmöntalteenottoakin. Kun tässä tilanteessa jätevettä edelleen jäädytetään, kasvaa ammoniumtyppipitoisuus huomattavasti enemmän kuin vastaavalla muutoksella kesäkuukausina. Ammoniumtyppipitoisuuden kasvu Turun esimerkkitaupauksessa vaihtelee arviolta välillä 1,0 - 4,2 mg/l ja Helsingissä välillä 1,2 - 4,6 mg/l.



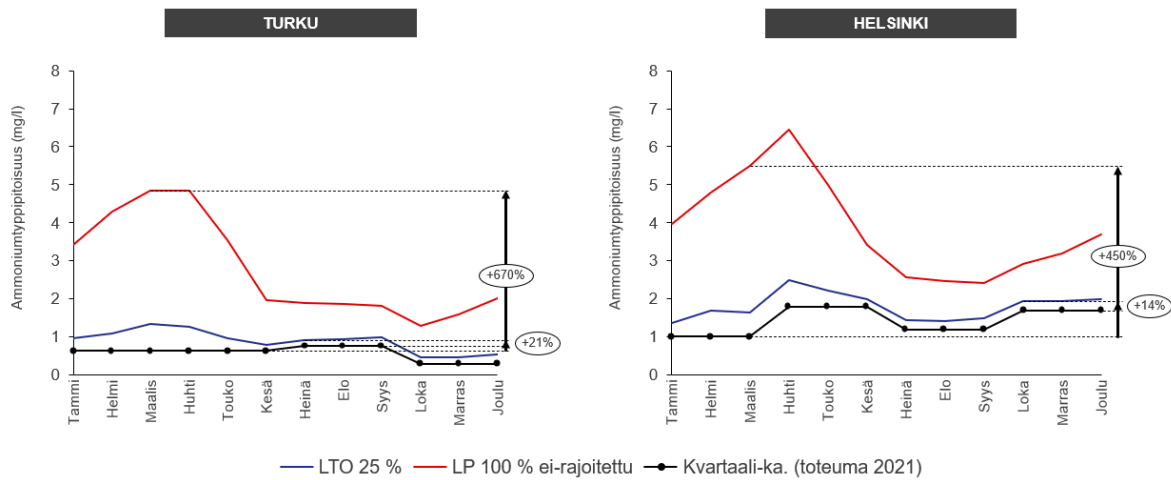
Kuva 12 Ammoniumtyppikuorman suhteellinen kasvu puhdistamolla (mg/l)

Kuva 13 on esitetty ammoniumtyppipitoisuuden kasvu suhteessa Kakolanmäen ja Viikinmäen puhdistamoiden toteutuneisiin puhdistustuloksiin. Kakolanmäessä puhdistamolla käsitellyn ja vesistöön johdetun jäteveden keskimääräinen ammoniumtyppipitoisuus on vuonna 2021 vaihdellut kvartaalikeskiarvoina välillä 0,29 - 0,76 mg/l². Viikinmäessä vastaavat pitoisuudet ovat vaihdelleet välillä 1,0 - 1,8 mg/l³. Kun näihin arvoihin lisätään edellä Kuva 12 esitetyt ammoniumtyppipitoisuuden kasvumäärät, saadaan arvio puhdistusprosessin jälkeisestä jäteveden ammoniumtyppipitoisuudesta tarkastelluissa skenaarioissa. Kuva 13 on selvyden vuoksi tuotu vain skenaarioiden ääriarvot eli skenaario, jossa 25 % kaupungin pientaloista varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenotoilla ja 25 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 25 %), sekä skenaario, jossa kaikki talot on varustettu lämpöpumpuilla, joiden lämmöntuotantoa ei rajata vaan jätevesi jäädytetään aina 4 °C asteeseen (LP 100 % ei-rajoitettu). Valituissa skenaarioissa ammoniumtyppipitoisuus kasvaa Turun esimerkkitaupauksessa suurimmillaan +670 % ja pienimmillään +21 % nykytilanteeseen verrattuna. Suurin muutos tapahtuu maaliskuussa skenaariossa, jossa jätevesi jäädytetään lämpöpumpuilla aina 4

² <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/ymparisto/raportit-ja-luvat>

³ <https://julkaisu.hsy.fi/jatevedenpuhdistus-paakaupunkiseudulla-2021.html>

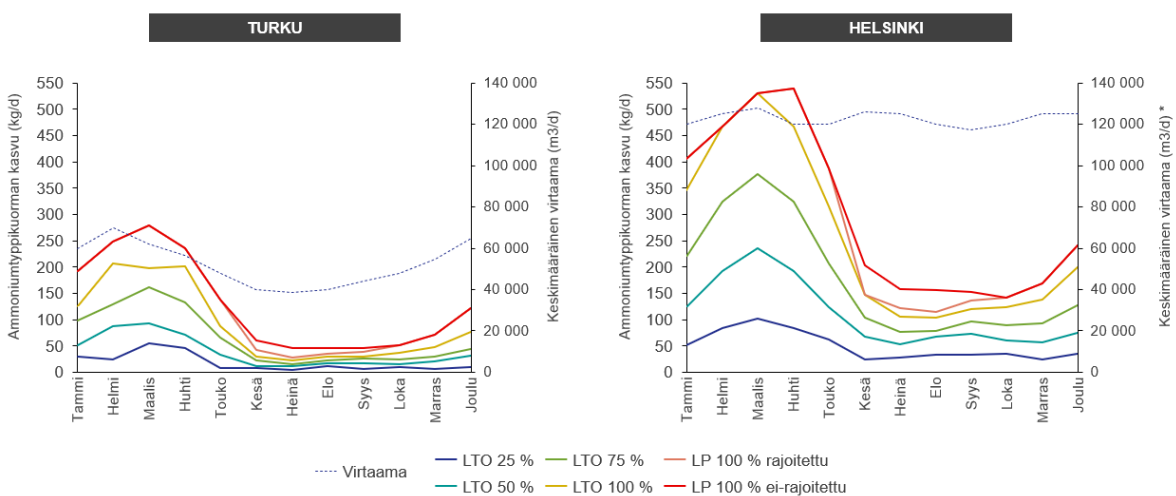
°C asteeseen. Pienin muutos puolestaan nähdään heinäkuussa LTO 25 % -skenaariossa. Vastaavasti suurin ammoniumtyppipitoisuuden muutos Helsingin esimerkkitapauksessa on +450 % ja pienin +14 %.



Kuva 13 Ammoniumtyppikuorma puhdistamolla muutoksen jälkeen (mg/l)

Vastaavat ammoniumtyppikuorman (kg/d) muutokset huomioiden puhdistamolle saapuvan jäteveden virtaama, on esitetty Kuva 14. Turun esimerkkitapauksessa kuukausikohtaiset virtaamatiedot perustuvat toteutuneisiin tietoihin. Helsingin tapauksessa virtaamatietoja on jouduttu arvioimaan, sillä simuloitu alue kattaa vain osan Viikinmäelle saapuvasta jätevedestä. Todellinen virtaamatieto simuloitulle alueelle on saatu vain maaliskuu-, kesä- ja syyskuulle, joiden perusteella on arvioitu muiden kuukausien virtaamat.

Kertomalla Kuva 13, yksikössä mg/l, esitetyt ammoniumtyppipitoisuuden muutokset keskimääräisillä virtaamatiedoilla, saadaan arvio ammoniumtyppikuorman muutoksista yksikössä kg/d. Turun esimerkkitapauksessa ammoniumtyppikuorman muutos vaihtelee skenaarioissa välillä 6,2 - 261,9 kg/d. Helsingin esimerkkitapauksessa vastaavat muutokset ovat 25,2 - 575,2 kg/d. Helsingin alueen suuremmat muutokset perustuvat suurempaan jäteveden virtaamaan.

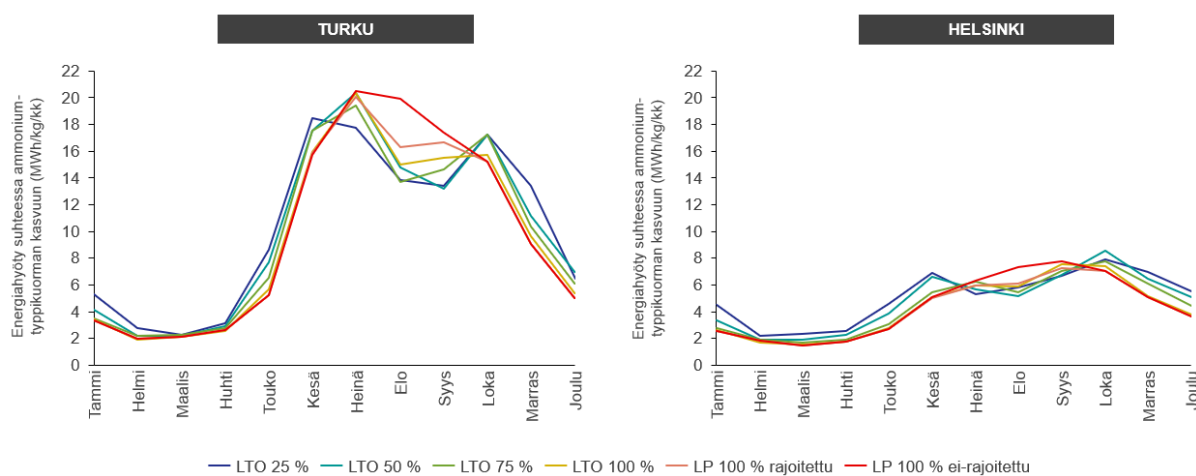


Kuva 14 Ammoniumtyppikuorman absoluuttinen kasvu puhdistamolla (kg/d)

Energiahyöty suhteessa kapasiteetin kasvattamiseen jätevedenpuhdistamoilla

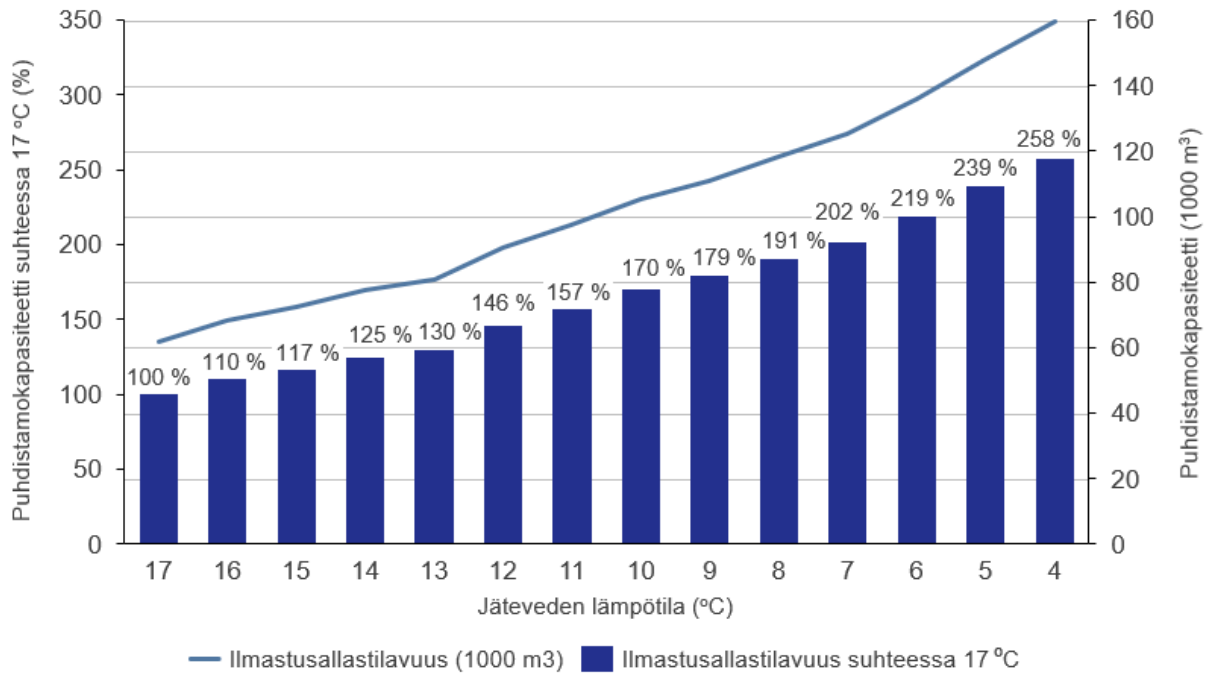
Luvussa 4.3 on tarkasteltu kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton energiahyötyä suhteessa jätevedenpuhdistamokapasiteetin kasvattamiseen. Lähtökohtana tarkastelussa oli, että lämmöntalteenoton seurauksena typpikuorma vesistöissä ei saa kasvaa. Tämä tarkoittaa, että puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan laskiessa, tulee investoida suurempaan puhdistamokapasiteettiin.

Kuva 15 on esitetty yhteenveto aiemmin raportissa esitettyjen kiinteistökohtaisen jäteveden lämmöntalteenoton energiahyödyistä (Kuva 10) sekä ammoniumtyppikuorman kasvusta (Kuva 14). Kuva 15 esittää energiahyödyn suhteessa ammoniumtyppikuorman kasvuun puhdistamolla yksikössä MWh/kg/kk. Kuvasta nähdään, että energiahyöty suhteessa ammoniumtyppikuorman kasvuun on suurin kesäkuukausina huolimatta siitä, että kesäkuukausina lämmöntalteenottoa rajoittaa kiinteistöjen lämmöntarve. Suurempi vaikuttava tekijä tuloksissa on jakolaskun nimittäjällä eli ammoniumtyppikuorman kasvulla, joka on huomattavasti suurempi talvi- kuin kesäkuukausina. Turun esimerkkitapauksen suurempaa energiahyötyä suhteessa ammoniumtyppikuorman kasvuun selittää erityisesti suurempi arvioitu energiahyöty suhteessa jäteveden virtaamaan. Energiahyödyn suuruutta on käsitelty laajemmin työpaketin 1 ja 2 johtopäätöksissä.



Kuva 15 Energiahyöty suhteessa ammoniumtyppikuorman kasvuun puhdistamolla (MWh/kg/kk)

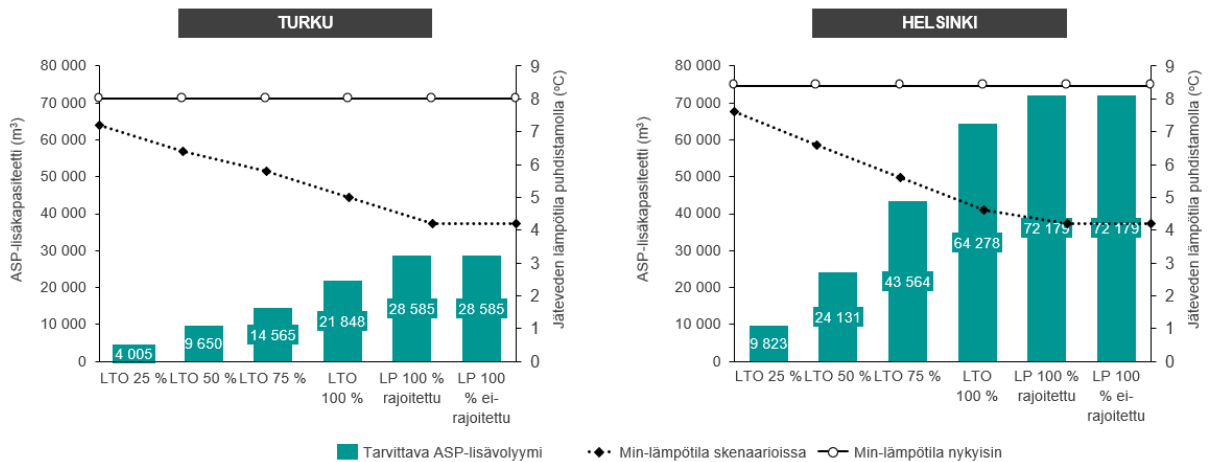
Seuraavaksi ristikkäisvaikutusten osalta tarkasteltiin tarvittavaa puhdistamokapasiteetin kasvattamista. Työpaketissa 3 arvioitiin tarvittavaa ilmastusallastilavuutta suhteessa jäteveden lämpötilaan. Kuva 16 on esitetty arvio ilmastusallastilavuuden kasvusta suhteessa 17 °C asteen jäteveden lämpötilaan. Kuvasta voidaan todeta, että jätevedenpuhdistamon prosessivolyymien kasvutarve on noin 7,5 % jokaista 1 °C asteen jäteveden lämpötilan pienenemistä kohden. Tässä yhteydessä on hyvä todeta, että alle 8 °C asteen jäteveden lämpötiloista on rajallisesti kokemuksia ja etenkin 4 °C astetta lähestyttäessä laskennan epävarmuudet kasvavat merkittävästi.



Kuva 16 Tarvittava puhdistamokapasiteetti suhteessa jäteveden lämpötilaan

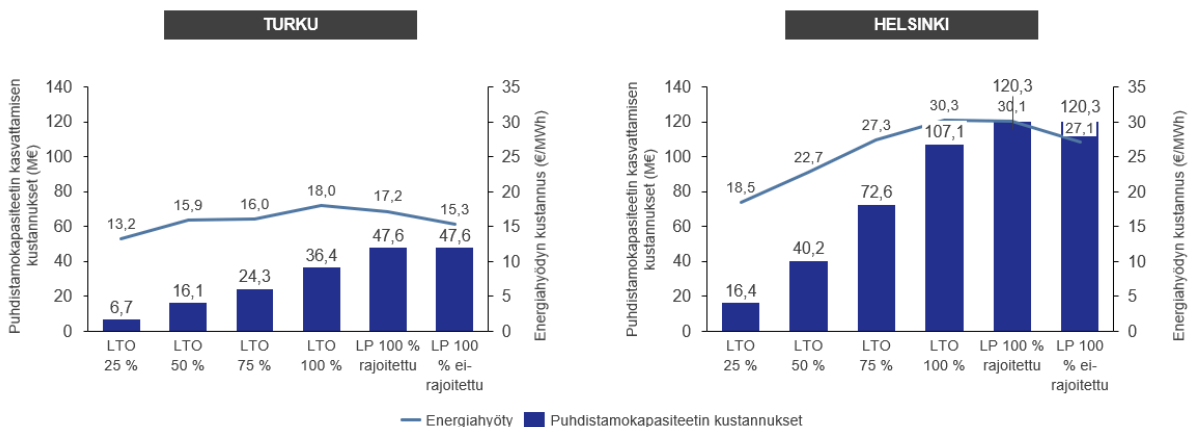
Edellä esitetty arvio jätevedenpuhdistamon kapasiteettitarpeesta perustuu työpaketissa 3 tehtyyn simulaatioon Kakolanmäen jätevedenpuhdistamosta. Simulaatiossa hyödynnettiin mitattuja jäteveden virtaamatietoja 24 päivän jaksolta, minkä perusteella arvioitiin tarvittava puhdistamokapasiteetti. Keskimääräinen virtaama simulaatiossa oli 71 200 m³/d. Jotta arvio tarvittavasta lisäkapasiteetista puhdistamolla on vertailukelpoinen muissa työpaketeissa laskettuihin tietoihin mm. energiahyödyistä, on ilmastusallastilavuus skaalattu käytettyjen virtaamatietojen perusteella oikeaan kokoluokkaan Turun ja Helsingin esimerkkitapauksille.

Kuva 17 on esitetty arvio tarvittavasta puhdistamokapasiteetin kasvusta Turun ja Helsingin esimerkkitapauksissa. Arvio perustuu yksinkertaistettuun oletukseen, että puhdistamokapasiteetti mitoitetaan jäteveden alhaisimman vuosittaisen lämpötilan perusteella. Kuva 17 on esitetty sekä Turun että Helsingin esimerkkitapauksille alhaisimmat puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilat nykytilanteessa (kiinteä viiva valkoisilla palloilla). Samoin kuvassa on esitetty skenaarioissa määritetty jäteveden uusi alhaisin lämpötila, joka on tulosta kiinteistökohtaisesta jäteveden lämmöntalteenotosta (katkoviiva mustilla palloilla). Näiden kahden tuloksena saadaan lämpötilaero, joka määrittelee tarvittavan puhdistamokapasiteetin kasvun. Turun esimerkkitapauksessa tarvittava ilmastusallastilavuuden lisäkapasiteetti vaihtelee skenaarioissa noin välillä 4 000 - 28 600 m³ ja Helsingissä välillä 9 800 - 72 200 m³.



Kuva 17 Tarvittava puhdistamokapasiteetin kasvu suhteessa jäteveden lämpötilaan (m³)

Puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannuksia arvioitiin perustuen oletukseen, että 15 000 m³ lisäpuhdistamolinjan kustannus on 25 M€. Oletus perustuu karkeaan arvioon, joka muodostettiin Viikinmäen jätevedenpuhdistamoinvestoinnin perusteella ja se sisältää sekä ilmastuksen että jälkiselkeytyksen. Kyseisellä yksikköhinnalla arvioituna, edellä Kuva 17 esitettyjen puhdistamokapasiteettien kasvattamisen kustannukset kasvaisivat Turun esimerkkitapauksessa eri skenaarioissa 6,7 - 47,6 M€ tasolle. Helsingissä kustannus olisi puolestaan 16,4 - 120,3 M€. Kustannusarvioihin liittyy merkittävää epävarmuutta jätevedenpuhdistamon sijainnista ja toteutustavasta riippuen. Esimerkkinä Viikinmäen ja Kakolanmäen puhdistamo sijaitsee kallioon louhitussa tilassa ja puhdistamon kapasiteettia ei ole mahdollista kasvattaa ilman kallion lisälouhintaa. Tällöin lisäkapasiteetin rakentaminen Viikinmäelle ja Kakolanmäelle voi kustannuksiltaan olla merkittävästi esitettyä suurempi.



Kuva 18 Vuotuisen energiahäyödyn kustannus suhteessa puhdistamokapasiteetin kasvattamiseen (€/MWh)

Kuva 18 on esitetty lisäksi arvio kiinteistökohtaisella lämmöntalteenotolla saavutettavan energiahäyödyn kustannuksista suhteessa puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannuksiin. Energiahäyödyn kustannus on saatu summaamalla edellä Kuva 10 esitetyt kuukausittaiset energiahäyödyt ja jakamalla saatu arvo puhdistamoinvestoinnin annuiteetilla, joka on laskettu 20 vuoden pitoajalla ja 5 % laskentakorolla. Turun esimerkkitapauksessa energiahäyödyn kustannus vaihtelee välillä 13,2 - 18,0 €/MWh ja Helsingin esimerkkitapauksessa välillä 18,5 -

30,3 €/MWh. Energiahyödyn kustannus skaalautuu suoraan puhdistamokapasiteetin kasvattamisen kustannusten mukaan. Mikäli kustannukset puolittuvat, puolittuu energiahyödyn kustannus. Vastaavasti jos kustannukset tuplaantuvat, tuplaantuu myös energiahyödyn kustannus.



Gaia Group Oy

Bulevardi 6 A,

FI-00120

HELSINKI, Finland

Tel +358 9686 6620

Fax +358 9686 66210

ADDIS ABABA | BEIJING |
BUENOS AIRES | GOTHENBURG |
HELSINKI | SAN FRANCISCO |
TURKU | ZÜRICH

You will find the presentation
of our staff, and their contact
information, at www.gaia.fi