

VTT Technical Research Centre of Finland

Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa

Laitinen, Ari; Wallin, Andrei

Published: 23/06/2022

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Laitinen, A., & Wallin, A. (2022). *Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-00582-22



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.





Kuva: HSY

Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa

Kirjoittajat: Ari Laitinen
Andrei Wallin

Luottamuksellisuus: VTT Public

Raportin nimi Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY Anna Kuokkanen Ilmalantori 1 00240 HELSINKI	Asiakkaan viite Ostotilaus 000027946
Projektin nimi JV-Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa	Projektin numero/lyhytnimi 129988 / JV-lämpö
Raportin laatija(t) Ari Laitinen, Andrei Wallin	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 82/2
Avainsanat Jätevesi, lämmöntalteenotto, skenaario, käyttövesi, lämpöpumppu	Raportin numero VTT-R-00582-22
Tiivistelmä Tässä raportissa julkaistut tulokset ovat osa ympäristöministeriön rahoittamaa hankekokonaisuutta "Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn (JV-LÄMPÖ)". Tässä työpaketissa kehitettiin mallit rakennuksessa tapahtuvalle jäteveden tuotolle sekä jäteveden jäähtymälle rakennuksen sisäisessä verkostossa ja sovellettiin toisessa osakokonaisuudessa kehitettyä jäähtymämallia kaupungin verkostossa. Jäteveden jäähtymät kaupunkitasolla määriteltiin erilaisilla rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton skenaarioilla ja jäähtymien perusteella arvioitiin vaikutuksia jäteveden puhdistamon jälkeisten keskitettyjen kaukolämpöpumppujen lämmöntuottopotentiaaleihin. Skenaarioissa lämmöntalteenottoratkaisujen yleisyysaste rakennuskannassa vaihteli 25 %:sta 100 %:iin. Lämmöntalteenottoratkaisuna tarkasteltiin suihkujen lattiakaivojen lämmönvaihtimia ja kiinteistökohtaisia lämpöpumppuratkaisuja. Skenaariotarkastelut tehtiin Turussa Kakolanmäen puhdistamon sekä Helsingissä Viikinmäen puhdistamon viemäröntialueille. Rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton arvioitiin alentavan puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaa 0.7 - 5 °C riippuen lämmöntalteenoton yleisyydestä kaupungin rakennuskannassa. Alhaisempi jäteveden lämpötila huonontaa jäteveden puhdistustuloksia aiheuttaen kapasiteettiongelmia jäteveden puhdistukselle ja lisäksi pienentää puhdistamon jälkeisten keskitettyjen kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen lämmöntuotantopotentiaalia. Kokonaisuutena tarkasteltuna kaupungin tasolla rakennuksilla tapahtuva jäteveden lämmöntalteenotto kasvattaa jätevedestä saatavaa lämpöenergian kokonaisuusmäärää. Lämpöenergian kokonaisuusmääräkasvaa eri skenaarioilla Turussa 15 - 82 % pelkästään keskitettyyn lämmöntuotantoon verrattuna ja Helsingissä 10 – 45 %. Käyttövedessä on merkittävä energiamäärä hyödynnettäväksi lämpöpumpulla tuotettuun kaukolämpöön. Turussa arvioitiin käyttövedestä tuotettavaksi lämmityspotentiaaliksi noin 8 % Turun koko kaukolämpötuotannosta. Lämmöntuoton potentiaali kasvaa, jopa kaksinkertaiseksi, jos käyttövettä on mahdollista hyödyntää myös kaukojäähdytyksessä. Samalla jäähdytysenergian myynnistä saataisiin lisäarvoa.	
Luottamuksellisuus	VTT Public
Espoo 23.6.2022	
Laatija  Ari Laitinen Senior Scientist	Tarkastaja  Ismo Heimonen Senior Scientist
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT Puh. vaihde 020 722 111 https://www.vtt.fi/	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) HSY VTT	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Hyväksyminen

TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä: 23.6.2022

Allekirjoitus:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jari Shemeikka', is shown on a light yellow background.

Nimi: Jari Shemeikka

Asema: Research Team Leader

Alkusanat

Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn (JV-LÄMPÖ) hankkeessa tarkastellaan kokonaisvaltaisesti veden sisältämää lämpöenergiaa sekä lämmön hyödyntämisen että jätevedenkäsittelyn näkökulmasta. Hanke ajoittuu vuosille 2021–2022. Hanke jakautuu kuuteen erilliseen työpakettiin, joista kustakin tuotetaan oma loppuraporttinsa:

- TP1. Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa
- TP2. Lämpötilan muutokset ja vaikutus jätevesiverkostossa
- TP3. Lämpötilan vaikutus typenpoistoon
- TP4. Lämmönvarastoinnin innovatiiviset menetelmät
- TP5. Käytännöt, ehdot ja ohjaukskeinot
- TP6. Ristikkäisvaikutukset, yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä raportissa esitettävät tulokset kattavat työpakettin 1 (TP1), ja siinä hyödynnetään myös työpakettin 2 tuloksia.

Koko 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. Tarkastelut tehtiin Helsingin ja Turun tapauksille. Hankkeen tulokset ovat sovellettavissa muihin kaupunkeihin ja ne antavat työkaluja suunnittelulle ja ratkaisujen valinnoille. Hanke on saanut ympäristöministeriön myöntämää valtionavustusta Ravinteiden kierrätyksen ja jätevesien käsittelyn energiatehokkuuden hankkeiden avustushaussa 2020. Lisäksi tutkimusta rahoittivat hankekonsortioon kuuluvat yritykset.

Hankekonsortioon kuuluu HSY, Turun seudun puhdistamo Oy, Turun Vesihuolto Oy, Turun Seudun Vesi Oy ja energialaitoksista Helen Oy, Fortum Power and Heat Oy ja Turku Energia.

Hanketta koordinoi Gaia Consulting Oy. Työpakettien toteuttajat olivat VTT Oy (TP1), Fluidit Oy (TP2), Afry Oy (TP3), Aalto yliopisto (TP3 ja TP4) ja Gaia Consulting Oy (TP5 ja TP6).

Hankkeen johtoryhmään kuuluivat Riikka Malila Ympäristöministeriö, Tommi Fred HSY, Mari Heinonen HSY, Jouni Kivirinne Helen Oy, Juhani Aaltonen Helen Oy, Mika Karbin Turku Energia, Osmo Puurunen Turun Seudun Vesi Oy, Eeva-Leena Rostedt Turun Vesihuolto Oy, Mirva Lepomäki Turun seudun puhdistamo Oy, Simon Lintu Fortum Oyj. Hanketta koordinoi Tuomas Raivio Gaia Consulting Oy ja Ulla Värre Gaia Consulting Oy.

Sydämelliset kiitokset kaikille hankkeeseen osallistuneille hyvästä yhteistyöstä.

Espoo 23.6.2022

Tekijät

Sisällysluettelo

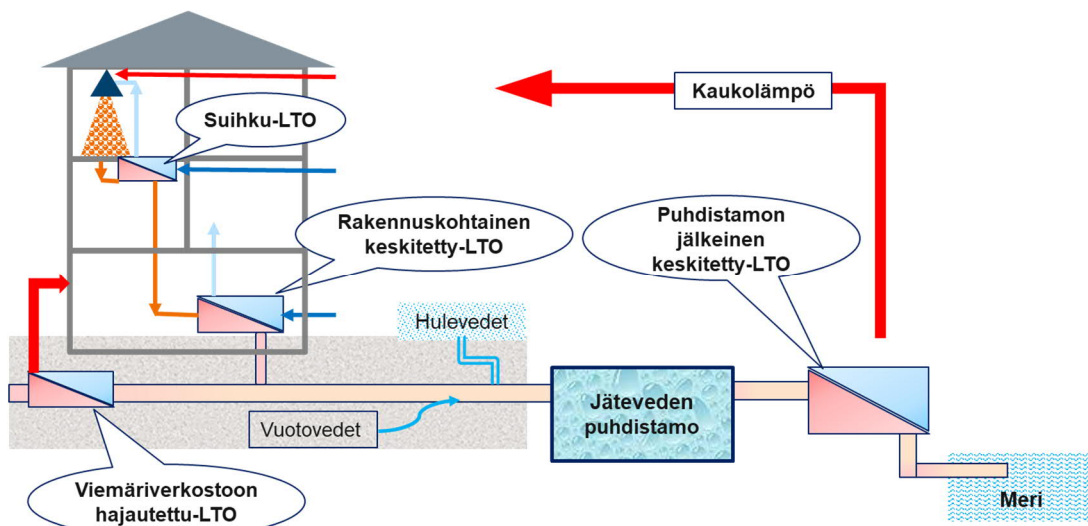
Alkusanat	3
1. Johdanto.....	6
2. Kirjallisuuskatsaus	9
2.1 Jäteveden lämmöntalteenoton tekniikat.....	9
2.1.1 Kiinteistöjen jäteveden LTO-laitteet	9
2.1.2 Suurkuluttajien LTO-laitteet.....	10
2.1.3 Kiinteistöjen jäteveden LTO-tekniikoiden hyötysuhteet.....	10
2.2 Järjestelmätason tutkimukset.....	12
2.2.1 Håva-tutkimushankkeen tuloksia	12
2.2.2 SEQWENS-tutkimushankkeen tuloksia	12
2.2.3 Muut tutkimukset	13
3. Kaukolämpökulutusdata-aineisto ja analysointimenetelmät	16
3.1 Data-aineisto	17
3.2 Lämpöhäviön erittely	17
3.3 Tilalämmityksen erittely	19
3.4 Analyysityökalun validointi	20
3.4.1 Validointi simuloitulla datalla.....	20
3.4.2 Validointi todellisella datalla.....	21
4. Kaukolämpödata-analyysin tulokset.....	22
4.1 Kaukolämmön kulutuskomponentit	22
4.2 Lämpimän käyttöveden kulutuksen vuorokausiprofiilit.....	24
4.3 Lämpimän käyttöveden kuukausikulutukset.....	25
4.4 Lämpimän käyttöveden vuosikulutukset	26
4.5 Lämpöhäviöt.....	28
5. Jäteveden jäähtymä 1970-luvun kerrostalossa	29
6. Jäteveden tuottomalli.....	31
6.1 Kalustekohtaiset virtaamat ja lämpötilat.....	32
6.1.1 Suihku	33
6.1.2 Hanat	34
6.1.3 WC.....	35
6.1.4 Astianpesu	36
6.1.5 Pyykinpesu.....	37
6.2 Jäähtyminen vesikalusteesta viemäriin.....	38
6.3 Jäähtyminen rakennuksen viemäriverkostossa.....	38
6.4 Tuottomallin validointi	40
7. Jäteveden lämmöntalteenoton skenaariotarkastelut	42
7.1 Mallinnetut viemäriverkostot	42
7.1.1 Turun viemäriverkoston malli.....	42
7.1.2 HSY:n viemäriverkon malli	44
7.2 Jäteveden jäähtymämalli maahan kaivetussa verkostossa	45
7.3 Jäähtymämallin validointia.....	47

7.4	Rakennusten lämmöntalteenottoskenaariot	48
7.5	LTO-skenaarioiden lämpötilavaikutukset (Turku ja HSY)	49
7.6	LTO-skenaarioiden energiavaikutukset (Turku ja HSY)	51
7.6.1	LTO:n vaikutukset vuositasolla, Turku	54
7.6.2	LTO:n vaikutukset vuositasolla, HSY	57
7.7	Tulosten vertailua muihin tutkimuksiin	60
7.8	Tulosten tarkastelu	61
8.	Käyttövesilämpöpumpun tarkastelua Turun seudun vesijärjestelmässä.....	63
8.1	Turun seudun käyttövesiverkosto	63
8.2	Lämpöpumpun vaikutukset ja tuottopotentiaali	70
9.	Yhteenveto	74
9.1	Kirjallisuusanalyysi	74
9.2	Data-analyysi.....	75
9.3	Jäteveden tuottomalli.....	75
9.4	Jäteveden jäähtymämallit	75
9.5	Skenaariotarkastelut.....	76
9.5.1	Skenaariotarkastelujen tulokset.....	76
9.6	Käyttövesiverkon lämpöpumppu.....	77
	Lähdeviitteet.....	78
	Liite 1. Lasketut viemäriverkoston lämpötilat taulukkoina.....	81

1. Johdanto

Energian hintojen nousu, sekä poliittiset tavoitteet uusiutumattomista energianlähteistä irtautumiseksi ovat 2000-luvulla lisänneet mielenkiintoa energiatehokkuuden parantamiseksi eri toimialoilla. Tässä oleellisessa asemassa on energian talteenotto erilaisista ainevirroista. Lämpimät jätevedet ovat yksi rakennetun ympäristön merkittävimmistä hukkaenergiavirroista. Rakennuskannan eristyksen parantuessa ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton (LTO) yleistyessä jätevesien suhteellinen osuus hukkaenergiasta kasvaa jatkuvasti.

Suuri osa jäteveden lämpöenergiasta on mahdollista ottaa talteen eri kohdissa jätevesijärjestelmää, alkaen kiinteistöiltä ja päättyen ennen puhdistetun jäteveden siirtämistä vesistöihin (kuva 1). Suomessa onkin nykyään useassa kaupungissa puhdistetun jäteveden lämpöenergiaa hyödyntäviä lämpöpumppulaitoksia, joiden tuottama energia syötetään kaukolämpö- ja kaukokylmäverkostoon. Markkinoilla on niin ikään kiinteistöille sijoitettavia, lämpöpumpun kera tai ilman toimivia LTO-laitteita, joilla kiinteistöt voivat pienentää omaa energiankulutustaan, tai lämpöpumppua hyödyntämällä jopa kattaa osan omasta lämmitysenergiantarpeestaan. Näiden kahden ratkaisun väliin mahtuvat vielä viemäriverkosta lämpöä ottavat järjestelmät, joita on käytössä esim. Keski-Euroopassa.



Kuva 1. Jäteveden lämmöntalteenoton (LTO) vaihtoehtoja viemäriverkoston eri kohdista.

Hajautetut, viemäriverkoston ylävirtaan sijoitetut järjestelmät laskevat jäteveden lämpötilaa, mikä voi heikentää jätevedenpuhdistamon puhdistustehoa, sekä laskea puhdistamon jälkeisten keskitettyjen LTO-laitosten hyötysuhdetta ja lämmöntuottopotentiaalia. Toisaalta, jätevesi menettää energiasisältöään välittömästi viemäriin siirryttyään lämpöhäviöiden vuoksi, mistä näkökulmasta mahdollisimman varhaisella lämmöntalteenotolla saadaan suurempi osa energiasta talteen. Koska jäteveden lämpötilan muutos verkoston sisällä on monimutkainen ilmiö, joka riippuu alkulämpötilasta, virtaamista (jätevesi+vuodot+hulevedet), ja itse verkoston rakenteesta, jätevesiverkoston matemaattinen mallinnus ja energiataselaskenta on nähty käytännössä ainoiksi keinoiksi saada hajautetun LTO:n vaikutuksista käsitys. 2010-luvun jälkipuoliskolla kirjallisuudessa on esitelty tähän tarkoitukseen monia fysikaalisia, virtauksen ja lämmönsiirron laskevia malleja.

Vaikka joitakin aiempia kaupunkikohtaisia tutkimuksia hajautetun jäteveden LTO:n vaikutuksista löytyy kirjallisuudesta, jokaisen maan ja kaupunginkin jätevesiverkko on omanlaisensa, ja eri maiden viemäriverkostoille tehtyjä tutkimuksia ei voida käyttää tarkkojen laskelmien pohjana toisessa maassa. Eroihin vaikuttavat itse viemärijärjestelmien erojen lisäksi esimerkiksi ilmasto-olosuhteet sekä vedenkulutustottumukset.

Hajautetun jäteveden LTO:n vaikutuksia kokonaisvaltaisesti tutkiva järjestelmämalli koostuu useasta osasta. Lähteessä (Saagi *et al.*, 2022) erotellaan järjestelmämallin osat:

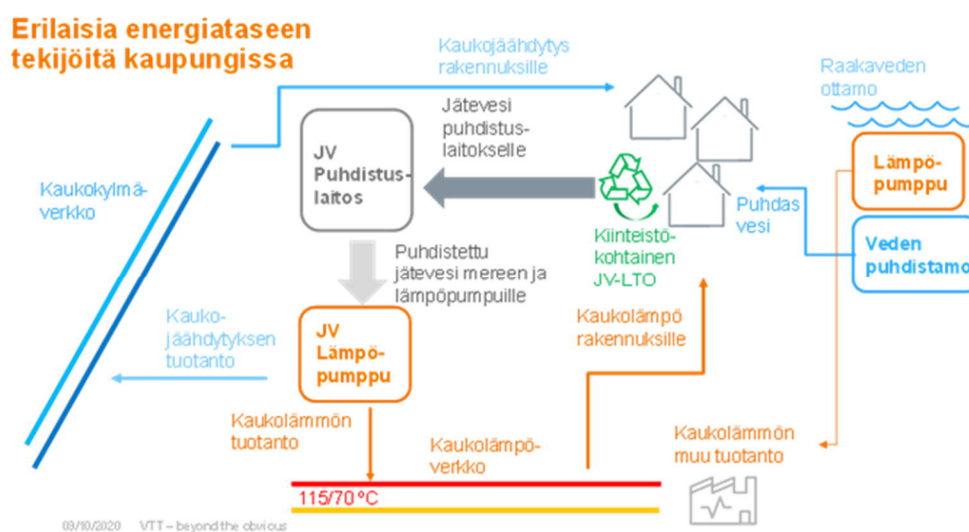
1. Jäteveden tuoton lähtötiedot (virtaamat, lämpötilat, sisääntulopisteet)
2. Viemärin virtaus- ja lämmönsiirtomalli (ml. reunaehdot, kuten maaperän lämpötilan)
3. LTO-laitteiston malli
4. Jätevedenpuhdistamon malli

Tässä raportissa julkaistavat tulokset ovat osa laajempaa hankekokonaisuutta: Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn (JV-LÄMPÖ). Hankeessa tarkastellaan kokonaisvaltaisesti veden sisältämää lämpöenergiaa sekä lämmön hyödyntämisen että jätevedenkäsittelyn näkökulmasta. Hankekokonaisuus jakautuu kuuteen erilliseen työpakettiin, joista kustakin tuotetaan oma loppuraporttinsa:

1. Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa
2. Lämpötilan muutokset ja vaikutus jätevesiverkostossa
3. Lämpötilan vaikutus typenpoistoon
4. Lämmönvarastoinnin innovatiiviset menetelmät
5. Käytännöt, ehdot ja ohjaukseen
6. Ristikkäisvaikutukset, yhteenveto ja johtopäätökset

Tämä raportti kattaa työpaketin 1 tulokset ja muiden työpakettien tulokset julkaistaan erillisinä raporteina.

Käyttö- ja jäteveden lämpöenergian hyödyntämisen vaikutukset kaupunkitasolla ovat moninaiset, kuten kuvasta 2 nähdään. Käyttövedestä on mahdollista tuottaa lämpöpumpuilla kaukolämpöä, mutta onko sillä vaikutusta rakennusten käyttöveden lämmitykseen? Miten rakennuksilla jätevedestä hyödynnettävä lämpö vaikuttaa jäteveden puhdistukseen ja puhdistamon jälkeisen keskitetyn kaukolämpöä tuottavan lämpöpumpun toimintaan? Kuinka paljon jäteveden lämmöntalteenotto säästää energiaa? Näihin ja ohessa muihinkin kysymyksiin löytyy vastauksia tässä tutkimuksesta.



Kuva 2. Lämpöenergiataseeseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden välisiä kytkentöjä kaupunkienergiajärjestelmässä. Puhtaan veden, jäteveden ja lämpöenergian kierto kaupungissa on monimuotoinen kokonaisuus.

Koko 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. Hankkeessa tuotetaan perusteltua tietoa eri lämmöntalteenottotapojen vaikutuksista koko kaupungin tai viemärointialueen mittakaavassa, verrattuna nykytilanteeseen, jossa lämmön talteenoton vaikutuksia tarkastellaan ainoastaan yksittäisen kiinteistön tai laitoksen tasolla. Tulokset antavat työkaluja suunnittelulle ja ratkaisujen valinnoille tarkasteltujen Helsingin ja Turun lisäksi myös muihin kaupunkeihin, ja eri tahoille, kuten kaupunkien päätöksentekijöille, vesihuoltolaitoksille, energiayhtiöille, suunnittelijoille, kiinteistönomistajille ja kiinteistökohtaisen lämmön talteenoton parissa työskenteleville. Hanke tuottaa sekä vesi- että energia-alalle uutta tietoa ja osaamista. Hankkeen tulokset antavat tietoa valintojen tueksi pyrittäessä energiatehokkuuteen sekä ympäristövaikutusten minimointiin, ja auttavat varmistamaan vesilaitosten liittyjien tasapuolisen kohtelun tulevaisuudessa.

Tässä tutkimuksessa tehdään järjestelmätason tarkastelut Turun ja HSY:n viemärointialueille; tutkimus on ensimmäinen laatuaan Suomessa. Kummallakin alueella otetaan jätevedestä lämpöä talteen puhdistamoprosessin jälkeen, Helsingissä Katri Valan lämpöpumppuasemalla Helenin toimesta, Espoon Finnoolla Fortumin toimesta ja Kakolanmäellä Turku Energian toimesta. Tutkimuksessa jäteveden tuotannon lähtötietoina käytetään ja kehitetään kiinteistöjen jäteveden tuotantomallia, joka perustuu (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017):n alun perin kehittämään, ja (Wärff, 2020) muokkaamaan malliin. Jotta malli saadaan mahdollisimman hyvin vastaamaan suomalaista vedenkulutusta, työssä tutkitaan helsinkiläisten asuinrakennusten lämpimän käyttöveden kulutusta data-analyysin keinoin, ja käytetään tuloksia jäteveden tuotantomallin kalibrointiin.

Viemäriverkoston tarkastelua tehdään Fluidit Oy:n fysikaalista virtaus - ja lämmönsiirtomallilla työpaketissa 2 laskettuja tuloksia hyödyntämällä (Pitkänen, 2022). Itse viemäriverkoston lisäksi jäteveden jäähtymä kiinteistöjen sisällä on energiataseen kannalta keskeinen kysymys, jota ei ole aiemmin perusteellisesti tutkittu. Työn aikana kehitettiin mittauksiin perustuva soviteyhtälö, jota käytetään jäteveden rakennusten sisäisen jäähtymän mallinnukseen. LTO-laitteet mallinnetaan lämmönsiirron yhtälöillä, soveliaat parametrit selvitettiin kirjallisuudesta ja kaupallisten laitteiden tiedoista. Jätevedenpuhdistamon toiminnan mallinnus sisältyy työpakettiin 3 (Ahonen, 2021), joten asiaa ei käsitellä tässä raportissa.

Raportin rakenne on seuraava: luvussa 2 esitellään aiempia verkostotutkimuksia, sekä yksittäisiä LTO-tekniikoita ja niiden hyötysuhteita. Data-analyysin aineisto ja menetelmät esitellään luvussa 3, ja luvussa 4 tulokset, joita käytettiin reunaehtoina kiinteistöjen jäteveden tuotantomallille. Luvussa 5 esitellään mittauksiin ja data-analyysin perustuva uusi malli jäteveden jäähtymälle kiinteistön sisällä. Kiinteistöjen jäteveden tuotantomalli esitellään luvussa 6. Luvussa 7 esitellään Turun ja HSY:n alueen viemäriverkostomallit, malleilla toteutetut jäteveden LTO-skenaariotarkastelut, sekä tarkastelujen tulokset. Luku 8 on erillinen kokonaisuus, jossa analysoidaan käyttövesilämpöpumpun potentiaalia ja vaikutuksia Turun seudun vesijärjestelmässä. Lopuksi luvussa 9 tehdään yhteenveto tutkimuksen tuloksista.

2. Kirjallisuuskatsaus

Tämän luvun ensimmäisessä osassa esitellään hajautetun LTO:n tekniikoita ja niille tyypillisiä hyötysuhteita, joita käytetään järjestelmämallissa myöhemmissä luvuissa. Toisessa osassa luodaan yleiskatsaus aiemmin tehtyihin jäteveden LTO:n järjestelmätason tutkimuksiin. Tavoitteena on selvittää käytettyjä menetelmiä sekä tutkimuksissa saatuja tuloksia, joita voidaan verrata tässä tutkimuksessa saatuihin tuloksiin. Kumpikin alaluku käsittää koostetaulukot oleellisimmista löydöksistä.

2.1 Jäteveden lämmöntalteenoton tekniikat

Tässä luvussa käydään läpi kirjallisuus- ja kaupallisia lähteitä erilaisista jäteveden LTO:n tekniikoista. LTO-hyötysuhteiden numeerisia arvoja esitetään luvun lopussa koontitaulukossa.

2.1.1 Kiinteistöjen jäteveden LTO-laitteet

Nykvist (Nykvist, 2012) esittelee diplomityössään erilaisten laite- ja talotason LTO-tekniikoiden toimintaperiaatteita sekä parametrejä. Työssä esiteltiin tekniikoihin sisältyvät suihkulämmönvaihtimet, keskitetyt pysty- ja vaakasuuntaiset lämmönvaihtimet, säiliöperiaatteella toimivat keskitetyt vaihtimet, sekä säiliötä hyödyntävät, sekundääripiirillä varustetut lämpöpumppuratkaisut.

Tyypillinen suihkulämmönvaihdin on sijoitettu suihkun lattialle, tai lattiakaivoon. Lämmönvaihtimessa lämmitetään jätevedellä suihkun sekoittimelle saapuvaa kylmää vettä, mikä vähentää tarvittavan kuuman veden määrää, ja siten energiankulutusta. Järjestelmä voi toimia painovoimaisesti, tai erillistä pumppua hyödyntämällä. Kaupallisia laitteita tarjoavat esimerkiksi suomalainen Ensavetec (*Ensavetec - Energy Saving by Shower water - Intelligent Floor Drain*, no date), sekä englantilainen Recoup (*Recoup WWHRS - Waste Water Heat Recovery (WWHRS) for showers*, no date).

Tyypillisessä pystysuuntaisessa lämmönvaihtimessa hanavesiputki on sijoitettu jätevesiputken ympärille. Kaupallisia toteutuksia tällaisesta laitteesta on esimerkiksi Ecodrainin ja Recoupin tuotteet. Diplomityössä (Nykvist, 2012) mainitaan pystyvaihtimien haitaksi se, että jätevesi ja hanavesi käytännössä liikkuvat putkissa usein eri aikaa, ja koska lämmönvaihtimen varastointikyky on pieni, laite ei välttämättä toimi optimaalisesti.

Toiseksi kiinteistökohtaiseksi lämmönvaihdintyyppiä mainitaan vaakaputkilämmönvaihtimet, jossa vaihdin sijaitsee tyypillisesti talon kellarissa. Ruotsalaisissa tutkimuksessa, jossa käsitellään olemassa olevien laitteiden mittaustietoa, laitteet ovat tyypiltään vaakaputkilämmönvaihtimia (Wallin, 2021).

Säiliötyyppisessä lämmönvaihtimessa jätevettä kerätään syklisesti tai jatkuvasti tyhjenevään säiliöön, jonka läpi lämmitettävä vesi johdetaan. Kaupallinen esimerkki säiliötyyppisestä lämmönvaihtimesta on suomalaisen Ecopalin Ecowec-hybridivaihdin (*Ecopal – Älykkäät energiaratkaisut*, no date), jota on käytössä mm. taloyhtiöissä ja uimahalleissa. Lämmönvaihtimessa jätevesi kulkee säiliön läpi spiraaliputkessa ylhäältä alas (tai alhaalta ylös, mikäli käytössä on erillinen pumppu). Lämmönvaihdinta voidaan käyttää joko lämpimän käyttöveden (LKV) esilämmitykseen, tai maalämpöpiiriin nesteen lämmittämiseen. Valmistajan mukaan lämmönvaihtimen soveltuu käytettäväksi myös WC-istuilta johdettavan jäteveden kanssa.

Wallin (Wallin, 2021) tutki neljän erillisen kiinteistökohtaisen jäteveden LTO-laitteen suorituskykyä mittaustietojen pohjalta, motivaationaan olettaen, että standardoitujen mitoitusohjeiden puute on yksi syy, joka jarruttaa jäteveden LTO-järjestelmien yleistymistä Ruotsissa. Laitteille lasketaan suorituskykyindikaattorit, kuten lämpötilahyötysuhde sekä energiahyötysuhde. Tuloksista johdetaan vakioarvo, jota esitetään käytettäväksi laskentayhtälöissä LTO-lämmönvaihdinten suuntaa antavaan mitoitukseen.

2.1.2 Suurkuluttajien LTO-laitteet

Hepbasli et al. (Hepbasli *et al.*, 2014) tutkivat kirjallisuusanalyysin keinoin olemassa olevien jäteveden LTO-lämpöpumppujen (pääosin suurten, ei kiinteistötason laitteiden) toiminta-arvoja, kuten kapasiteetteja sekä lämpökertoimia (COP). Artikkeleihin sisältyy koostetaulukko kaikista löydöksistä.

ATHCO Engineering - yrityksen Therm-X- lämmönvaihdin (*ATHCO-Engineering A/S | Customized Process Equipment*, no date) on suuren kulutuksen kohteisiin suunnattu harmaan veden LTO-laite. Laitteen lämpöpintojen mainitaan itsepuhdistuvan moottoritoimisten harjaosien avulla. Virtaama-alueeksi suositellaan 10 m³/h - 200 m³/h, lämpötehoalueeksi 100 kW - 2 MW. Laitetta käytetään Suomessa uimahalleissa sekä teollisuudessa.

Huberin ThermWin – järjestelmä (*Energy from Wastewater - HUBER SE*, no date) ottaa yksittäiselle suurkuluttajalle, kuten kerrostalolle, lähellä sijaitsevasta viemäriputkesta lämpöä ja kylmää lämpöpumpun avulla. Järjestelmässä jätevesi pumpataan viemäriputken pohjalta erilliseen pieneen altaaseen, jossa siitä erotellaan kiintoainesta suodattimella ja ruuvimekanismilla. Suodatettu jätevesi pumpataan maan päälle, jossa se luovuttaa lämmönvaihtimella lämpöä lämpöpumpun höyrystimen suljettuun kiertoon. Järjestelmälle suositellaan viemäriin minimivirtaamaa 5 l/s, minimilämpötehoa n. 40 kW, ja jäteveden minimilämpötilaa 10 °C. Joitain olemassa olevia sovelluksia löytyy Sveitsistä, ja yksi esimerkkitalaus on kuvattu artikkelissa (Ceconet *et al.*, 2019).

Thermowatt on unkarilainen yritys (*THERMOWATT LTD.*, no date), joka tarjoaa palveluna toimintaperiaatteeltaan samankaltaista järjestelmää kuin yllä mainittu Huber ThermWin. Kohdeyleisöksi mainitaan pinta-alaltaan suuret, yli 10 000 m² rakennukset.

2.1.3 Kiinteistöjen jäteveden LTO-tekniikoiden hyötysuhteet

LTO - laitteiden lämmönsiirron hyötysuhteelle käytetään eri lähteissä eri indikaattoreita, mikä vaikeuttaa eri tekniikoiden ja lähteiden vertailua, varsinkin jos kulloinkin käytetty indikaattori ja/tai testijärjestelyt on puutteellisesti kuvailtu. Tyypillisiä indikaattoreita ovat:

1. Lämmönsiirtimen tehokkuus, joka kuvaa lämmönsiirtimen teknistä hyötysuhdetta. Yhtälössä maksimilämpövirta on hetkellisillä kylmän ja kuuman puolen arvoilla suurin saavutettavissa oleva lämpövirta.

$$\varepsilon = \frac{q_{LTO}}{q_{max}}, \quad (1)$$

missä q_{LTO} on toteutunut lämmönsiirtoteho (W), ja

$$q_{max} = \min(q_{m,vesi}, q_{m,jätevesi}) \cdot c_p \cdot (T_{jätevesi} - T_{vesi}) [W], \quad (2)$$

missä $q_{m,vesi}$ on lämpöä vastaanottavan veden virtaama, kg/s,
 $q_{m,jätevesi}$ on jäteveden virtaama, kg/s,
 c_p on veden lämpökapasiteetti, J/kgK,
 T_{vesi} on lämpöä vastaanottavan veden virtaama, °C,
 $T_{jätevesi}$ on jäteveden lämpötila, °C.

2. Lämmönsiirron hyötysuhde (η_q) on toteutuneen lämmönsiirtotehon suhde teoreettisesti suurimpaan saatavilla olevaan lämpötehoon, kaava (3).

$$\eta_q = \frac{q_{LTO}}{q_{max}}, \quad (3)$$

$$q_{max} = q_{m,jätevesi} \cdot c_p \cdot (T_{jätevesi} \cdot T_{jätevesi,min} - T_{jätevesi,min}), \quad (4)$$

Tässä $T_{jätevesi,min}$ on jätevedelle määritelty minimilämpötila (°C), esim. (Wallin, 2021):ssa käytetään lämpötilaa, jossa kylmä vesi saapuu kiinteistölle.

Alla on koottu taulukkomuotoon kirjallisuudesta löytyneitä ja laitetoimittajien esittämiä arvoja LTO-tekniikoiden hyötysuhteille. Löytyneiden arvojen perusteella valittiin hyötysuhdearvot, joita käytettiin myöhempien lukujen skenaariotarkasteluissa.

Taulukko 1. Kiinteistötason jäteveden LTO-tekniikoiden hyötysuhteiden koontitaulukko.

Tekniikka	Hyötysuhde (epsilon tai muu ilmoitettu)	Lisätietoja	Lähde
Suihku-LTO	$\epsilon = 0.68$	Testikonfiguraatio: kylmän veden lämpötilanmuutos 5 → 28 °C, virtaama 9 - 10 l/min. Suihkun kokonaisvirtaama 14-16 l/min	(Nykivist, 2012) Testit SEA
Suihku-LTO	$\epsilon = 0.65, \eta_q = 0.40$	Testikonfiguraatio: kylmän veden lämpötilamuutos 5 → 28 °C, virtaama 8 l/min. Suihkun kokonaisvirtaama 13 l/min, sekoituslämpötila 39 °C	(<i>Ensavetec - Energy Saving by Shower water - Intelligent Floor Drain</i> , no date)
Pystyviemärin lämmönvaihdin	$\epsilon = 0.43 - 0.66$	Nimellisteho 8-12 kW, nimellisvirtaama 9.5 l/min molemmilla puolilla	(<i>EcoDrain</i> , no date)Ecodrain VT-1000
Pystyviemärin lämmönvaihdin	$\epsilon = 0.44 - 0.52$		(Wärff, 2020), (Wallin, 2021)
Vaakaviemärin lämmönvaihdin	$\epsilon = 0.335 - 0.381$		(Wärff, 2020), (Soto, 2015), (Wallin, 2021)
Vaakaviemärin lämmönvaihdin	Tapaus 1: $\epsilon = 0.50, \eta_q = 0.17$ Tapaus 2: $\epsilon = 0.42, \eta_q = 0.42$ Tapaus 3: $\epsilon = 0.74, \eta_q = 0.32$ Tapaus 4: $\epsilon = 0.41, \eta_q = 0.38$	Tapaus 1: Asuinrakennus, LKV:n esilämmitys. Tapaus 2: Asuinrakennus, LKV:n esilämmitys. Jätevesi kerätään tankkiin ja pumpataan vaihtimen läpi. Tapaus 3: Liiketila, LKV:n esilämmitys. Tapaus 4: Liiketila, lämpöpumppuavusteinen, lämpö kerätään lämmitysjärjestelmän kierto.	(Wallin, 2021)
Keskitetty (kiinteistö)	$\eta_q = 0.17$	Jäteveden poistolämpötilan alarajaksi oletettu 5 °C	(Golzar and Silveira, 2021)
Keskitetty (kiinteistö) + LP	$\eta_q = 0.32$	Jäteveden poistolämpötilan alarajaksi oletettu 5 °C	(Golzar and Silveira, 2021)
Putki- vaippa-lämmönvaihdin (spiraaliputki)	$\epsilon = 0.3 - 0.7$ kytkennästä ja virtauksista riippuen	Tehokäyrästöt saatavilla eri kytkennöille & virtaussuunnille	(“Ecopal – Älykkäät Energiaratkaisut” n.d.) Ecowec

LTO:n hyötysuhteisiin vaikuttaa itse lämmönvaihtimen teknisen toteutuksen lisäksi muita tekijöitä, kuten jäteveden tuotto profiili sekä sekundääripuolen virtaama ja lämpötila, mistä syystä kirjallisuudesta löytyneissä arvoissa on melko laajalti hajontaa. Analyysin perusteella saatiin kuitenkin luotua käsitys siitä, minkälaisilla hyötysuhteilla laajamittaisesti käytössä oleva kiinteistökohtainen jäteveden LTO keskimääräisesti toimii.

2.2 Järjestelmätason tutkimukset

Järjestelmätason tutkimuksia on tehty erityisesti Ruotsissa (esim. HÅVA - ja SEQWENS - projektit), mutta myös Länsi- ja Keski-Euroopassa.

2.2.1 Håva-tutkimushankkeen tuloksia

Reyes (Reyes, 2019) tutki diplomityössään pumppausasemilla tapahtuvan lämmön talteenoton vaikutusta jäteveden lämpötilaan jätevedenpuhdistamolla, Malmössä. Työssä mallinnettiin jäteveden energiatase kaupungin kolmen asuinkäyttöön painottuvan valuma-alueen pumppausasemilta jätevedenpuhdistamolle. Tutkimuksessa hyödynnetään em. pumppausasemien sekä kahden huoltokaivon lämpötila - ja virtaamamittauksia. Viemäriverkkoa mallinnetaan Matlabilla toteutetulla BSM-UWS - mallilla, jota myös kalibroidaan erillisillä mittauksilla. Pumppaamoille saapuvan jäteveden virtausprofiili muodostuu kotitalouksien jäteveden, huleveden, sekä vuotoveden superpositiosta. Kotitalouksien virtausprofiili selvitetään pumppaamoiden virtaamamittauksista. Huleveden virtaama on laskettu sadantadatasta, tietyllä valumakertoimen oletuksella, ja vuotovesien virtaaman on oletettu noudattavan vuosittaista sinikäyrää, kuitenkin siten että vuotovedet riippuvat myös sadannasta, koska tämä vaikuttaa pohjavesien korkeuteen. Artikkelissa esitetään, että n. 30 % valuma-alueiden yhdistetystä virtaamasta on vuotovettä. Tuloksissa todetaan, että päiväsaikaan (klo 10 - 22) tapahtuva lämmöntalteenotto ei vaikuta puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan vuorokautiseen vaihteluväliin, koska minimi saavutetaan yöaikaan.

Wärff et al. (Wärff *et al.*, 2020) arvioivat tutkimuksessaan kiinteistökohtaisen lämmön talteenoton potentiaalia. Viemäriverkoston puoleisiin asioihin ei tässä tutkimuksessa oteta kantaa. Artikkelissa käytetään kotitalouksien jäteveden virtaamille ja lämpötiloille tilastollista mallia, joka perustuu Hillebrandin (Hillebrand, 2015) ja Sitzenfrei et al. (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) esittämiin malleihin. Lämmönvaihtimille käytetään kirjallisuusarvoihin perustuvia lämpötilahyötysuhteita. Tutkimuksessa (Wärff *et al.*, 2020) on eroteltu skenaariot, joissa käyttövesi on peräisin pintavedestä (kotitalouksille saapuvan käyttöveden vuosittainen lämpötilanvaihtelu 0 - 20 °C), ja pohjavedestä (käyttöveden lämpötila vakio 7.5 °C). Vuosittaisen LTO-energiahyötysuhteen (prosentteja LKV:n energiankulutuksesta) todetaan LTO-laitteiden lämpötilahyötysuhteesta riippuen olevan 11.3 % - 17.5 % (skenaario 1) ja 11.5 - 18 % (skenaario 2).

Arnell ja Saagi esittelivät artikkelissaan (Arnell and Saagi, 2020) HÅVA-projektin järjestelmätason mallissa (Wärff *et al.*, 2020) käytetyt lämmönvaihdin- ja lämpöpumppumallit. LTO-lämmönvaihtimille esitetään lämpötilahyötysuhteeseen perustuvat yhtälöt vakiohyötysuhteella. Lämpöpumppujen COP oletetaan vakioksi. Artikkelissa eritellään myös tapaus, jossa lämpöpumppu hyödyntää lämmönlähteenä puhdistamatonta jätevettä; tällöin lämpöpumpun höyrystimellä on erillinen, suljettu nestekierto, joka on yhteydessä jätevedeen lämmönvaihtimen välityksellä. Lämmöntuotannon rajoittavaksi tekijäksi mainitaan höyrystimen suljetun nestekierron lämpötila, joka ei saa laskea 0 °C:n alapuolelle. Esitetyissä malleissa ei oteta kantaa lämpötilahyötysuhteen tai COP-arvon muutoksiin lämpötilojen tai virtaaman funktiona.

2.2.2 SEQWENS-tutkimushankkeen tuloksia

Golzar et al. (Golzar, Nilsson and Martin, 2020) esittävät artikkelissaan uudenlaisen viemäriverkostomallin, joka perustuu neuroverkkoon. Mallin eduksi fysikaalisiin verkostomalleihin verrattuna mainitaan yksinkertaisuus; koska neuroverkkomalli perustuu historiallisen datan hyödyntämiseen, simulaatioon tarvittavia parametreja on vähemmän. Tarvittaviksi parametreiksi on listattu ulkolämpötila, rakennuksilta lähtevän jäteveden lämpötila ja virtaama, hulevesivirtaama, vuotovesivirtaama, vuorokaudenaika ja päivä (vuodesta). Esitetty neuroverkkomalli on opetettu ja testattu Tukholmassa mitatulla datalla.

Golzar ja Silveria (Golzar and Silveira, 2021) tutkivat kiinteistökohtaisen jäteveden lämmön talteenoton vaikutusta keskitetyn lämmön talteenoton tuotantoon, käyttäen aiemmin esiteltyä neuroverkkoihin perustuvalla viemärimallia. Tutkittu alue on Tukholman Henriksdalin puhdistamon valuma-alue. Kyseisen puhdistamon biokaasuprosessi vaatii n. 37 °C:n lämpötilan, ja hajautetun lämmön talteenoton vaikutus

puhdistamon lämmöntarpeeseen sisältyy tutkimukseen. Kotitalouksien jäteveden virtaamille ja lämpötiloille käytetään aiempien mittaustietojen keskiarvoja 7.5 - 8.4 l/h/henkilö ja 25 °C. Kotitalouksilta poistuvan jäteveden lämpötilanalenema LTO-laitteissa on huomioitu tunnitteisissa profiileissa, joista on artikkelissa kuvaajat. LTO-laitteiden suorituskykytiedot perustuvat SEQWENS-projektissa tuotettuun mittausdataan. Keskitetyn lämmön talteenoton energiapotentiaali lasketaan käyttäen poistolämpötilalle alarajaa 5 °C. Hajautetun lämmön talteenoton levinneisyydelle on käytetty kolmea eri skenaariota, 10 %, 20% ja 40 %. 20 %:n skenaariossa vuosittainen lämmöntalteenotto rakennuksilla on 44 GWh, kun samalla keskitetyn lämmön talteenoton lämmönsaanti vähenee 27 GWh, ja puhdistamon lämmöntarve kasvaa 0.3 GWh. Viemärissä tapahtuvien lämpöhäviöiden todetaan vähentyvän 26 GWh. Puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan vuosittaisen minimin ja keskiarvon todetaan laskevan arvoista 8 °C ja 16.25 °C arvoihin 7.4 °C ja 15.5 °C. Artikkelissä sisältää myös pienimuotoisen hinta-analyysin jäteveden LTO:lla talteenotetun lämmön hinnasta; lämmönvaihtimilla tuotetun lämmön hinta sijoittuu kaukolämmön kesä - ja talvihintojen väliin, kun taas lämpöpumpulla tuotettu lämpö on kaukolämpöä kalliimpaa korkeamman investointikustannuksen takia.

2.2.3 Muut tutkimukset

Sitzenfrei et al. (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) tutkivat hajautetun lämmön talteenoton vaikutusta keskitetyn lämmön talteenoton potentiaaliin. Tutkimuksessa käytettiin TEMPEST-ohjelmistoa mallintamaan yksi pääviemäriin, jonka valuma-alueella asuu 10 000 ihmistä. Asukkaiden jätevedentuotannolle esitetään tilastollinen malli, jota on modifioituna käytetty myöhemmin HÄVA-projektissa, sekä tässä projektissa. Artikkelissa hajautettua lämmön talteenottoa edustavat suihkujen laitekohtaiset vaihtimet, joiden oletetaan laskevan suihkuilta viemäriin poistuvan veden lämpötilaa 37 °C:stä 25 °C:een. Keskitetyn LTO-laitoksen oletetaan sijaitsevan pääviemäriinlinjassa. Hajautetun lämmön talteenoton vaikutusta tutkitaan eri yleisyyksillä; esim. 100 % yleisyydellä keskitetyn LTO-laitoksen tuottama lämpöteho laskee noin 40 %.

Abdel-aal et al. (Abdel-Aal *et al.*, 2018) tutkivat hajautetun LTO:n potentiaalia verkostomallin avulla Antwerpenin valuma-alueella, johon kuului 79500 asukasta. Verkostomallina käytetään kaupallisen Infoworks CS-ohjelmiston hydraulista mallia, johon kirjoittajat ovat lisänneet oman lämmönsiirtomallinsa. Mallissa käytetään jäteveden virtaamaprofiilina valuma-alueen populaation keskimääräistä jätevedentuotantoa per henkilö, jaettuna empiiriselle, viemäriverkon mittauksilla kalibroidulle jätevesiprofiilille. Jäteveden tulovirtaukselle käytetään vakiolämpötilaa 15 °C. Tutkimuksessa mallinnetaan vain sateettomia päiviä (eli hulevesien vaikutusta ei ole huomioitu), ja vuotovesien huomiointista ei ole mainintaa artikkelissa.

Hajautetun lämmön talteenoton vaikutuksia tutkitaan artikkelissa skenaariotarkastelulla. LTO-laitteistot toimivat jatkuvasti vakioteholla 200 kW, ja ne oletetaan sijoitettavaksi viemäriverkostoon siten, että eri skenaarioissa LTO-laitteiston minimivirtaamavaatimus on 25, 50, 100 tai 200 l/s, koko verkoston lämmön talteenoton ollessa tällöin ensimmäisessä tapauksessa suurinta. Lämmön talteenoton toiminnalle asetetaan myös minimilämpötilavaatimus, 9 °C ennen LTO-laitetta. Skenaariot laaditaan erikseen kolmelle vuodenajalle, siten että tutkittavat kuukaudet ovat tammikuu, maaliskuu ja helmikuu, kustakin kuukaudesta on mallinnettu yksi päivä. Vuodenaikojen välisiä eroja mallissa ovat päivittäisen virtauksen määrä, viemäriin ilman lämpötila (8.6 °C - 15.5 °C), maaperän lämpötila (9 °C - 10 °C), sekä lämmönsiirtoparametrit. Tutkimuksessa lähestytään hajautettua lämmön talteenottoa nimenomaan potentiaalintarkastelun kautta; mallissa asetetaan kiinteiksi lämpötilarajoiksi 5 °C viemäriverkossa, ja 9 °C puhdistamolle sisään tulevalle virtaukselle, ja näissä rajoissa tarkastellaan maksimaalista saavutettavissa olevaa LTO-energiämäärää.

Tuloksissa esitetään LTO-potentiaalintarkastelun vaihtelevan vuorokauden mittaan siten, että kello 3 - 4 saatavilla on pienin potentiaali, ja kello 10-11 suurin. Tulos on johdettavissa virtaamaprofiiliin, koska lämpötilaprofiili oletettiin vakioksi. Toukokuun LTO-potentiaali todetaan noin 80 % suuremmaksi tammikuuhun verrattuna (207 MWh vs. 116 MWh). LTO-energian todetaan vastaavan noin 7 - 18 % valuma-alueen lämmöntarpeesta.

Abdel-aal et al. (Abdel-Aal *et al.*, 2019) tutkivat toisessa artikkelissa viemäriverkoston lämpötilavaihteluiden (alueella 5 - 20 °C) vaikutusta jäteveden biokemiallisiin prosesseihin: rasvojen jähmettymistä tutkitaan laboratoriotesteillä, ja rikkivedyn muodostumista simulaatio-ohjelmalla (WATS). Tutkimuksessa ei saada todisteita rasvojen jähmettymisen lämpötilariippuvuudesta; todetaan että riippuvuussuhteet ovat monimutkaiset, ja jäteveden koostumuksella on suuri merkitys. Rikkivedyn muodostumisnopeuden havaitaan riippuvan käänteisesti jäteveden lämpötilasta, ja todetaan että teoreettisesti jäteveden LTO:ta voidaan käyttää säätelemään viemäriverkoston biokemiaa halutunlaiseksi, mutta lisätutkimuksen tarve on ilmeinen.

Hadenque et al. (Hadengue *et al.*, 2021) käyttävät aiemmin kehitettyjä WaterHub - ja SWMM-HEAT-malleja mallintamaan sveitsiläisen Fehraltorfin kylän jätevesiverkostoa. Artikkelissa tarkastellaan vastavirtatyypisiä suihkulämmönvaihtimia, yleisyysasteilla 25 %, 50 %, 75 % ja 100 %. SWMM-HEAT-malliin sisältyvät viemäriin tonttijohdot (kiinteistöiltä kunnalliseen verkkoon johtavat ohuet putket, joiden merkitystä lämmönsiirtoon artikkelissa korostetaan. Skenaariotarkasteluissa suurimmallakin LTO:n yleisyysasteella saadaan vain 0.3 K vaikutus jäteveden puhdistamolle saapuvaan keskilämpötilaan. Vaikutus mainitaan pienemmäksi kuin esimerkiksi Sitzenfrei *et al.*:in (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) arvioima ja syyksi tähän esitetään tonttijohdojen sisällytystä viemärimalliin.

Saagi et al. (Saagi *et al.*, 2022) tekivät jäteveden lämmön talteenoton skenaarioanalyysin 180 000 asukasta käsittävälle Linköpingin alueelle. Teollisuusalueiden jätevedet sisältyvät malliin. Tutkimuksessa yhdistetään aiemmin kehitetyt mallit viemäriverkostolle, jäteveden tuotannolle, LTO-laitteille sekä jätevedenpuhdistamolle. Skenaariot on laadittu neljälle vaihtoehdolle: suihku-LTO:lle, rakennusten keskitetylle LTO:lle, viemäriin pumppausasemilla sijaitseville lämpöpumpuille, sekä puhdistamon jälkeisille lämpöpumpuille. Lämpöpumpuille oletettiin sekundääripiiri minimilämpötilalla 0 °C. Ensimmäistä kolmea LTO-ratkaisua tarkasteltiin kolmella peittoasteella (16 %, 42 % ja 77 %), puhdistamon jälkeisellä lämpöpumpulla otettiin talteen kaikki saatavilla oleva lämpö. Tarkastelut tehtiin lisäksi erikseen kahdelle noin kolmen viikon ajanjaksolle, tammikuulle ja huhtikuulle. Tuloksista perusteella tarkasteluajanjakso vaikuttaa eri tavalla eri LTO-ratkaisuihin. Kiinteistöille sijoitetut LTO-ratkaisut tuottavat enemmän lämpöä tammikuussa, koska tällöin kiinteistöille saapuva vesi on artikkelin mukaan kylmempää (vesi otetaan ilmeisesti pintavedestä). Pumppaamolle sijoitettu LTO puolestaan tuottaa enemmän lämpöä huhtikuussa, koska tällöin jätevesi jäähtyy vähemmän matkalla pumppaamolle. Tammikuussa eniten lämpöä saatiin talteen suihku-LTO:lla (127 MWh/päivä), huhtikuussa suihku-LTO:lla ja pumppaamo-LTO:lla yhtä paljon (96 MWh/päivä). Puhdistamon jälkeisellä lämmön talteenotolla saatiin kummallakin ajanjaksolla vähiten energiaa (54 MWh/päivä). Lämpöpumppuratkaisuilla (pumppaamo & puhdistamo) tuotetusta energiasta on vähennetty kulutetun sähkön määrä.

Artikkelin mukaan suihku-LTO:n ja rakennusten keskitetyn LTO:n vaikutus puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan on pienempi kuin pumppaamo-LTO:n, mikä johtuu viemäriin lämmönsiirtodynamiikasta rakennuksen ja pumppaamoiden välissä. Suurin puhdistamolle saapuvan jäteveden jäähtymä, n. 1.5 C° perustapaukseen verrattuna, saatiin 77 % yleisyysasteella pumppaamo-LTO:lla. Kaikissa skenaarioissa jäteveden jäähtymän vaikutus puhdistamon typenpoistoon todetaan merkityksettömän pieneksi, osittain johtuen puhdistamon erityisestä ilmastuksen lämpötilariippuvasta säätömenetelmästä.

Kaikista läpikäydyistä artikkeleista neljän havaittiin käsittelevän rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmön talteenoton verkostovaikutuksista. Alla on koostetaulukko näistä artikkeleista.

Taulukko 2. Tiivistelmä rakennuskohtaisen LTO:n potentiaalia ja vaikutuksia käsittelevistä tutkimuksista.

Tutkittu alue & virtaamat	Tutkimusaihe	Malli	Hajautettu jäteveden LTO:n skenaario	Oleellimmat tulokset	Lähde
10 000 asukkaan valuma-alue, oletettavasti kotitalouksien ja teollisuuden, vain kotitalouksien jätevedet.	Hajautetun LTO:n vaikutus pääviemäriin keskitettyyn LTO:hon.	TEMPEST-viemärimalli (vain päälinjan malli), stokastinen jätevesimalli.	Suihku ja kylpyammeen jäteveden lämpötila 37 → 23 °C, yleisyysasteet 0 - 100 %.	Hajautetun jäteveden LTO:n 100 %:n yleisyysasteella keskitetyn laitoksen tuotanto vähenee 40 %.	(Sitzenfri, Hillebrand and Rauch, 2017)
Fehrltorfin n. 10 000 asukkaan valuma-alue (kotitaloudet sekä teollisuus), lisäksi muista kunnista saapuvia virtauksia.	Hajautetun LTO:n sekä tonittijohojen pituuden vaikutus puhdistamolle saapuvaan lämpötilaan.	WaterHub (jäteveden tuotanto), SWMM-HEAT (viemäriin virtaus - ja lämmönsiirtomalli).	Noin 8-10 kW:n tehoinen suihkulämmönvaihdin (jäteveden jäähtymä 12 - 14 K), yleisyysasteilla 25 - 100 %.	100 %:n yleisyysasteella 0.3 K:n pudotus puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan.	(Hadeng et al., 2021)
Tukholman Henriksdalin puhdistamon 750 000 asukkaan valuma-alue.	Hajautetun LTO:n vaikutus keskitettyyn LTO:hon.	Rakennuksilta lähtevän ja puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan relaatio kuvattu neuroverkkomallilla.	Joko passiiviset lämmönvaihtimet tai lämpöpumput, 10, 20 tai 40 % yleisyysasteella, LTO-hyötysuhde perustuu mittausdataan jäteveden jäähtymästä LTO-laitteissa.	Rakennuskohtainen jäteveden LTO vähentää rakennusten energiankulutusta ja häviöitä viemäriässä, mutta samalla vähentää puhdistamon jälkeisen LTO:n tuotannon potentiaalia. Rakennusten energiantarve putoaa enemmän kuin keskitetyn LTO:n tuotanto.	(Golzar and Silveira, 2021)
Linköpingin 180 000 asukkaan valuma-alue (kotitaloudet ja teollisuus).	Jäteveden LTO:n potentiaalain vertailu eri tasoilla (vesilaitte, rakennus, pumppaamo, puhdistamo), vaikutukset jäteveden lämpötilaan sekä puhdistamon prosessiin (typenpoisto), epävarmuusanalyysi.	Pääviemäriin ja fysikaalisesti mallinnettu, pienemmät linjat semi-empirisesti. Jäteveden tuotanto jatkokehityksiä (Wärff et al., 2020):n mallilla.	Kolme eri yleisyysastetta. Suihkuissa ja kiinteistöillä passiiviset lämmönvaihtimet, pumppaamoilla ja puhdistamolla lämpöpumput. Passiivisille lämmönvaihtimille käytetty lämmönsiirron tehokkuuden yhtiöitä kertoimilla $\epsilon = 0.52$ (suihku) ja $\epsilon = 0.49$ (kiinteistökohtaiset lämmönvaihtimet). Lämpöpumpuille oletettu sekundaaripiirit, joiden lämpötilaminimi 0 °C, tavanomaisia COP-yhtiöitä käytetty.	Suurin määrä LTO-energiaa saadaan suihku-LTO:lla, suurin pudotus jäteveden lämpötilassa pumppaamo-LTO:lla. Kaikkien skenaarioiden vaikutus jäteveden lämpötilaan ja typenpoistoon pieni.	(Saagi et al., 2022)

Eri artikkelien tulosten keskinäinen vertailu ei ole suoraviivaista, sillä tutkimuksissa on runsaasti eroja: alueiden koko (kymmenistä tuhansista satoihin tuhansiin asukkaisiin), väestötiheys, ja viemäritopologia, ilmasto-olosuhteet, vedenkulutustottumukset, viemärimallit, lämmönvaihdinmallit, tarkastellut vuodenaajat ja tarkastellut skenaariot. Lähteissä (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) sekä (Hadengue *et al.*, 2021) viemäriverkkoa kuvattiin fysikaalisilla malleilla, (Golzar and Silveira, 2021) sekä (Saagi *et al.*, 2022) neuroverkkomallilla. Artikkeleissa (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) sekä (Hadengue *et al.*, 2021) tarkasteltiin ainoastaan suihkulämmönvaihtimia, kun taas (Golzar and Silveira 2021):ssa tarkasteltiin rakennuskohtaisia lämmönvaihtimia passiivisena sekä lämpöpumppuavusteisina. (Saagi *et al.* 2022):ssa tarkasteltiin sekä suihkulämmönvaihtimia että passiivisia rakennuskohtaisia lämmönvaihtimia, ja lisäksi viemäriverkon pumppaamoille sijoitettuja lämpöpumppuja. Pumppaamoille tai muualle viemäriverkkoon sijoitettuja LTO-laitteita on tarkasteltu myös muissa artikkeleissa, kuten (Abdel-Aal *et al.*, 2018), ja (Reyes, 2019), mutta taulukon 1 artikkelit käsittelevät nimenomaan rakennuksilla tapahtuvaa lämmön talteenottoa.

Suihkulämmönvaihtimet olivat yleisin tarkasteltu LTO-tyyppi, niitä käsiteltiin kolmessa artikkelissa neljästä. (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017):ssa suihku-LTO:n 40 % yleisyysaste aiheuttaa jäteveden lämpötilan mediaanin (keskitetyllä laitoksella) putoamisen n. 0.8 °C. (Hadengue *et al.*, 2021):ssa taas vastaavanlaisella suihku-LTO:n mallilla 25 % yleisyysasteella pudotus on 0.1 °C, ja vielä 100 % yleisyysasteella jäteveden lämpötilan pudotus puhdistamolla on vain 0.3 °C. Jälkimmäisessä artikkelissa arvioidaan tonttijohtojen sisällyttämistä malliin yhdeksi mahdolliseksi syyksi tulosten eriävyydelle. (Saagi *et al.*, 2022):ssa puolestaan suihkuvaihtimien 77 % levinneisyydellä puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötila putoaa alle 0.25 °C, mikä on samaa suuruusluokkaa (Hadengue *et al.*, 2021):n kanssa.

Jäteveden jäähtymä viemäriverkossa mainitaan kolmessa neljästä artikkelista merkittäväksi tekijäksi, joka kasvattaa rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmön talteenoton potentiaalia myöhemmin tapahtuvaan LTO:hon verrattuna. (Golzar and Silveira, 2021):ssa todetaan, että rakennuksilla talteen otettu energia pienentää puhdistamon jälkeisen LTO:n tuotantoa vähemmän kuin rakennuksilla talteen otetun energian määrän, johtuen viemärlämpöhäviöiden vähenemisestä. (Saagi *et al.*, 2022):ssa ei tarkastella suoraan rakennus-LTO:n vaikutusta keskitettyihin laitoksiin, mutta todetaan että rakennuskohtaisella LTO:lla potentiaalisesti talteenotettu energiamäärä on suurempi kuin pumppaamoilla tai puhdistamon jälkeisessä LTO:ssa, johtuen viemärlämpöhäviöistä. Huomattavaa on, että rakennuskohtaisella LTO:lla vaikutus puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilaan on silti pienempi, kuin pumppaamoille sijoitetulla LTO:lla. (Hadengue *et al.*, 2021):ssa painotetaan erityisesti tonttijohtoissa tapahtuvaa lämmönsiirtoa.

(Golzar and Silveira, 2021) on ainoa tutkimus, jossa tarkasteltiin myös jätevedestä talteenotetun energian kustannusta; passiivisen lämmönsiirtimen talteenotetun energian kustannukseksi todettiin 117 \$/MWh, mikä asettuu paikallisen kaukolämmön kesä - ja talvihintojen väliin. Lämpöpumppuavusteisella lämmönsiirtimellä kustannukseksi todettiin 136 \$/MWh, mikä on kaukolämmön hintaa korkeampi. Tutkimuksessa esitetään myös arvio rakennusten lämmöntarpeen vähenemisen vaikutuksesta kaukolämpöyhtiön lämmönmyyntituloihin. Keskitetyn ja hajautetun lämmön talteenoton elinkaarikustannuksia ei kuitenkaan vertailla.

3. Kaukolämpökulutusdata-aineisto ja analysointimenetelmät

Projektissa saatiin käyttöön asuinrakennusten kaukolämmön (KL) kulutusdataa Helenin kaukolämpöverkon alueelta. Datasta selvitettiin kulutuskohteiden keskimääräisiä ominaiskulutustietoja ja kulutusprofiileja, joita käytettiin myöhemmin jäteveden tuotantomallissa ja skenaariotarkasteluissa. Kulutusdatan analysointia varten kehitettiin Pythonilla data-analyysityökalu. Työkalulla kohteiden KL-kulutus eriteltiin kolmeen komponenttiin: **lämpöhäviö** (KL-kulutuksen vakiokomponentti, sisältää LKV-kiertohäviön, kaukolämmönvaihtimen lämpöhäviön, ja muut mahdolliset samankaltaiset ulkolämpötilasta (melko) riippumattomat häviöt), **LKV-kulutus** ja **tilojen lämmitys** (sisältäen ilmanvaihdon lämmityksen). Tässä luvussa kuvataan analysoitava aineisto ja analysointimenetelmät.

3.1 Data-aineisto

Helsingistä (Helenin kaukolämpöverkon alueelta) saatiin analysoitavaksi kaukolämmön kulutusdataa, eri talotyypeistä, sekä eri-ikäisistä kohteista. Kohteet oli jaoteltu paketeiksi talotyyppin ja ikäluokan mukaan. Kaikista kohteista saatiin tuntikohtainen kulutusdata vuosilta 2018 - 2020, mutta vuosi 2020 jätettiin analyysistä pois, ko. vuoden COVID-19-pandemiasta aiheutuneen yhteiskunnallisen poikkeustilan vuoksi. Alla on taulukoitu kohteiden metadata, (kohteiden karsimisen jälkeen):

Taulukko 3. KL-datapakettien metadata.

Paketti	Ikäluokka	Tilavuus [m ³]	Pinta-ala [m ²]*	Asuntojen lkm	Kohteiden lkm
Asuinkerrostalot 1	1700 - 1959	183 143	46 997	555	13
Asuinkerrostalot 2	1960 - 1979	105 791	29 105	431	10
Asuinkerrostalot 3	1980 - 1999	275 547	80 578	946	17
Asuinkerrostalot 4	2000 - 2017	263 278	61 954	859	15
Pientalot (ryhmänä) 1	1700 - 1979	21 776	5 890	52	14
Pientalot (ryhmänä) 2	1980 - 1999	28 495	7 817	52	15
Pientalot (ryhmänä) 3	2000 - 2017	52 715	12 274	112	17
Pientalot (yksittäin) 1	1700 - 1959	8 244	2 152	16	12
Pientalot (yksittäin) 2	1960 - 1979	11 788	3 308	20	14
Pientalot (yksittäin) 3	1980 - 1999	12 824	3 518	28	16
Pientalot (yksittäin) 4	2000 - 2017	14 689	3 420	22	17
Rivitalot (ryhmänä) 1	1700 - 1979	59 350	15 935	163	11
Rivitalot (ryhmänä) 2	1979 - 1999	60 035	18 063	233	13
Rivitalot (ryhmänä) 3	2000 - 2017	150 522	39 268	441	15
Rivitalot (yksittäin) 1	1700 - 1959	26 134	6 499	63	16
Rivitalot (yksittäin) 2	1960 - 1979	34 375	10 028	75	15
Rivitalot (yksittäin) 3	1980 - 1999	22 010	6 622	45	12
Rivitalot (yksittäin) 4	2000 - 2017	27 879	7 273	63	16
Yhteensä		1 358 595	360 701	4 166	258

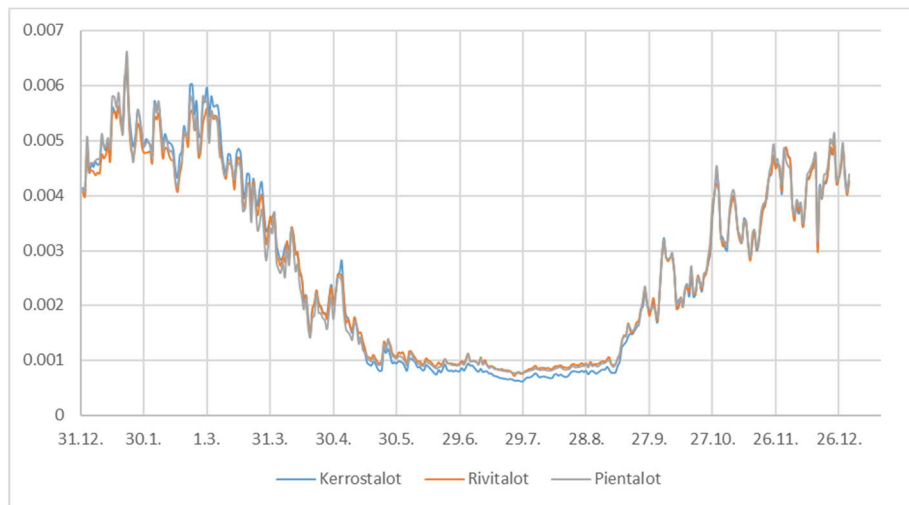
*Pinta-alat laskettiin tilavuuden sekä Helsingin kaupungin paikkatietodatabasta määritettyjen keskimääräisten huonekorkeuksien perusteella.

Rivi- ja pientalojen tapauksessa osa paketeista oli muodostettu kohteista, joissa useampi talo oli yhdistetty yhteen KL-vaihtimeen (ryhmänä - paketit). Luvussa 4 esitetyissä tuloksissa yksittäiset ja ryhmitellyt kohteet on yhdistetty, siten että erottelu on vain ikäluokittain.

3.2 Lämpöhäviön erittely

Rakennusmääräyksissä on säädetty, että asuinrakennusten putkistoissa kiertävän käyttöveden lämpötila ei saa laskea alle 55 °C:een. Tästä syystä pitkiä käyttövesiputkistoja sisältävissä rakennuksissa (kerros- ja rivitalot) käyttövesi ei seiso putkissa, vaan kiertää jatkuvasti lämmönvaihtimella, kun kulutusta ei ole. KL-kulutuksessa käyttöveden lämpimänä pito ilmenee tällöin nk. kiertohäviönä, joka rakennusten energialaskelmissa oletetaan tyypillisesti vakiosuuruiseksi, riippumatta vuoden- tai vuorokaudenajasta.

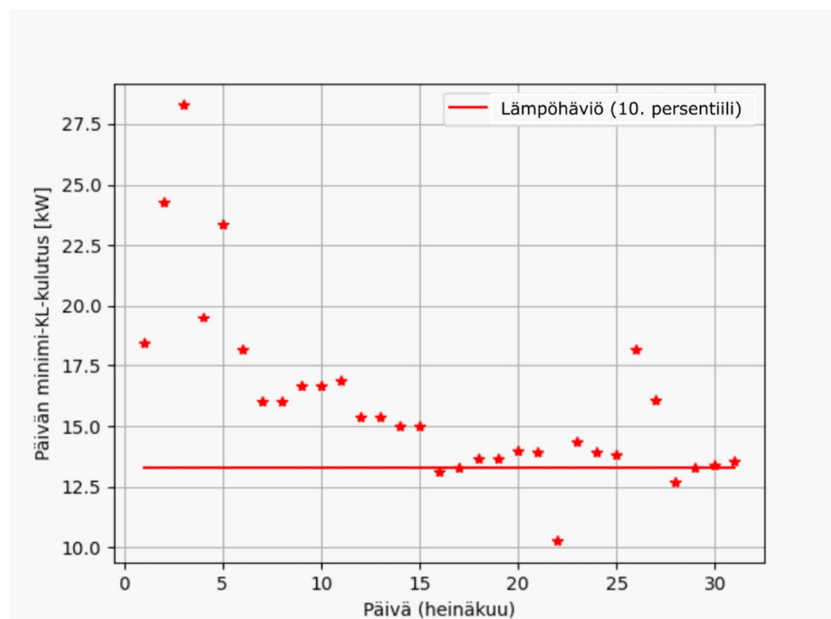
Analyysissä kiertohäviön oletettiin vastaavan koko KL-kulutusta lämmityskauden ulkopuolella (kesäkuukausina) vuorokaudenaikoina, jolloin LKV-kulutus on minimissään. Kiertohäviö kullekin kohteelle arvioitiin siis heinäkuun KL-kulutusten päivittäisistä minimiarvoista, jotka sijoittuvat pääasiassa aamuyön tunneille (kello 2 - 5). Kuvassa 3 on esitetty kunkin talotyyppin koko vuoden kokonaiskulutuksella normitetut KL-kulutuksen päivittäiset minimiarvot koko vuoden ajalta.



Kuva 3. Normitettu kaukolämmön vuorokautinen minimikulutus eri rakennustyypeille.

Alustavasti oletettiin, että pientalojen tapauksessa kiertojohtoa ei tyypillisesti ole, ja kiertohäviötä ei näin ollen tarvitse huomioida. Kuvasta 3 nähdään kuitenkin, että pientalojen KL-kulutuksen päivittäinen minimi ei kesäaikaan laske suhteellisesti alemmas kuin muissakaan talotyypeissä. Lisäksi ilman kiertohäviötä tehdyillä analyyseilla saatiin pientalojen kesäajan kuukausikulutuksiksi selvästi liian suuria lukemia. Tällä perusteella myös pientaloissa on tilastollisesti kesäaikaan jatkuva, kiertohäviötä vastaava kuorma, jonka voidaan olettaa johtuvan esim. kaukolämmönvaihtimen häviöistä. Näin ollen päädyttiin siis analysoimaan kaikki talotyypit samalla menetelmällä, ja kuvaamaan vakiokomponenttia yleisemmin ”lämpöhäviöinä” pelkkien ”kiertohäviöiden” sijasta.

Kunakin kohteen lämpöhäviöksi arvioitiin lopulta heinäkuun päivittäisten minimiarvojen 10. persentiili, jolla päästiin lähelle KL-kulutuksen minimitasoa, ilman että yksittäiset äärimittaukset vaikuttivat tulokseen merkittävästi, kuva 4



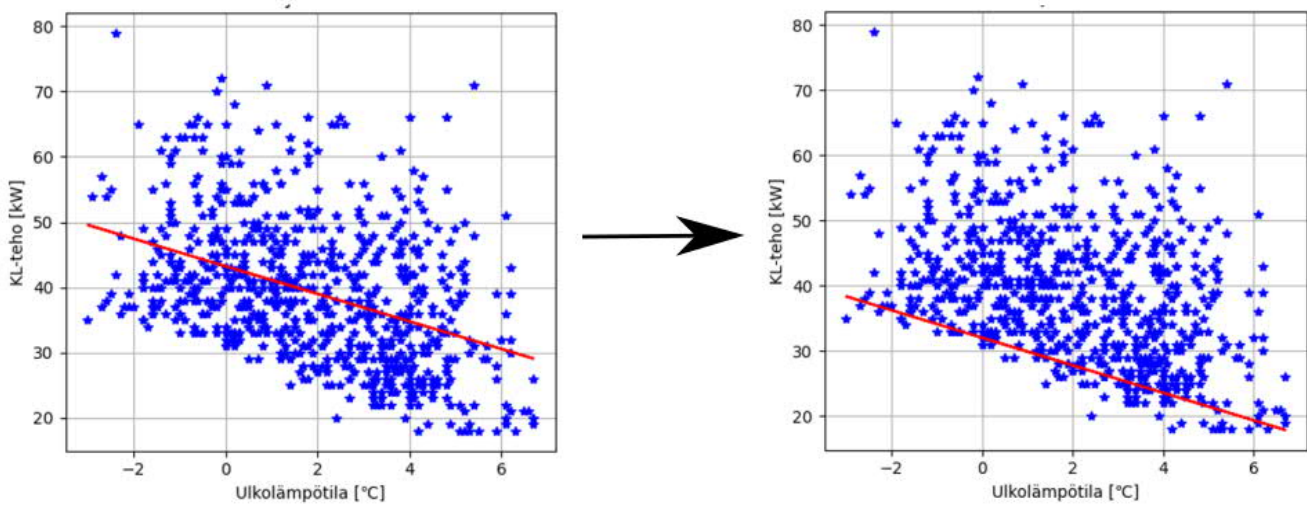
Kuva 4. Lämpimän käyttöveden lämpöhäviö.

Arvioitu lämpöhäviö poistettiin KL-kulutuksista. Kesäkuukausina (kesä - elo) LKV-kulutuksen oletettiin muodostavan loppuosan. Muille kuukausille eroteltiin kokonaiskulutuksesta myös tilojen lämmitys.

3.3 Tilalämmityksen erittely

Tilalämmityksen energiankulutuksen oletettiin käyttäytyvän lineaarisesti ulkolämpötilan funktiona. KL-kulutukselle laskettiin siis lineaarisovite (tässä vaiheessa kulutus sisälsi vielä sekä LKV- että tilalämmityksen). Ulkolämpötilana käytettiin Ilmatieteen laitoksen tuntiaikasarjoja Kaisaniemen mittausasemalta.

Mikäli tilojen lämmitys käyttäytyisi tarkalleen ulkolämpötilan funktiona, kaikki tehot (kuvaajan pisteet) sijoittuisivat suoralle. Pistejoukon ”paksuus” johtuu tässä tapauksessa siitä, että tilalämmityksen lisäksi energiaan sisältyy LKV-kulutus, joka ei riipu merkittävästi ulkolämpötilasta, vaan ajankohdasta. Arvio pelkälle tilalämmitykselle saadaan tällöin siirtämällä sovitesuora pistejoukon alareunaan, kuva 5.

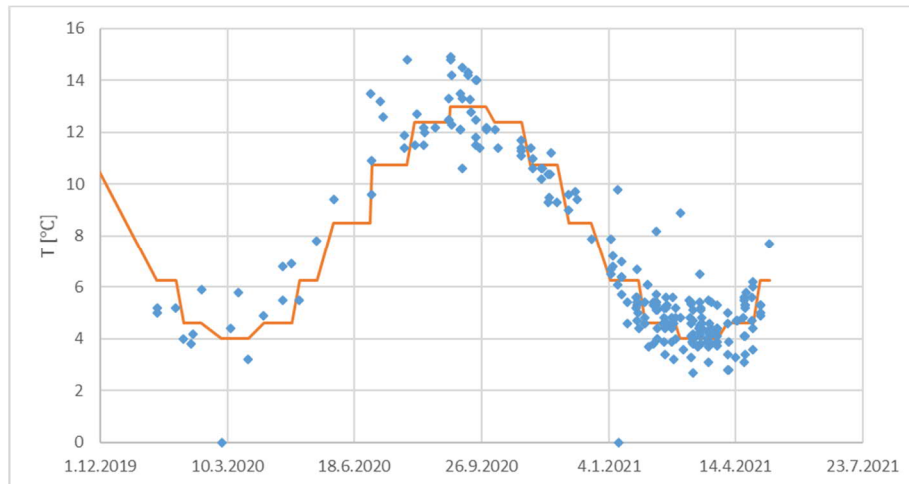


Kuva 5. Sovitesuoran siirto, arvolla $p = 0.9$. Sovitesuora on piirretty punaisena.

Suoran siirtäminen alareunaan automatisoitiin määrittämällä, että p prosenttia koko pistejoukosta tuli jäädä sovitesuoran yläpuolelle. Näin määritetyn sovitesuoran oletettiin vastaavan k.o. kohteen tilalämmityksen energiankulutusta. Kun tämä osuus on eritelty, jäljelle jäävän KL-energian oletettiin vastaavan kohteen LKV-kulutusta. Jäljelle jäävästä osuudesta voitiin siten selvittää LKV-kulutuksen käyttäytyminen eri aikatasoilla.

Analyysin virheen minimoimiseksi KL-kohteita karsittiin pois analyysistä erilaisista mittausdataan liittyvistä syistä, kuten suuri määrä selvästi virheellisiä mittauspisteitä, liian alhainen energian mittausresoluutio, ja ilmanvaihdon ajotavat, joissa q - T -pistejoukko on selkeästi kaksi- tai useampiosainen (esim. erilliset yö/päiväohjelmat ilmanvaihdolle). Karsimisen jälkeen mittauskohteita jäi jäljelle alkuperäisestä 360:sta 258.

LKV-energiankulutus muunnettiin LKV-virtaamaksi hyödyntämällä aiemmin esitettyä käsimitoituksista saatua tietoa kylmän veden vuosittaisesta lämpötilasta (kuva 6), sekä oletusta että LKV lämmitetään 60 °C:n lämpötilaan.



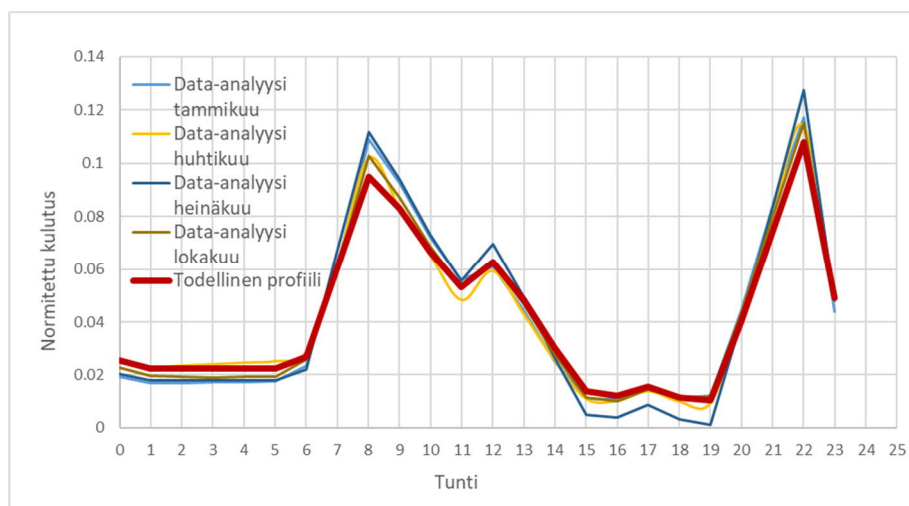
Kuva 6. Kylmän veden käsimitaukset ja lämpötilasovite, Helsinki.

3.4 Analyysityökalun validointi

Data-analyysityökalua validoitiin IDA-ICE-ohjelmalla simuloitun kerrostalon kulutusdatalla, sekä todellisen kerrostalon kaukolämpö- ja vedenkulutusdatalla.

3.4.1 Validointi simuloitulla datalla

Simuloidussa datassa LKV-kulutusprofiili pysyi vakiona koko vuoden. Alla on esitetty data-analyysillä kaukolämpödatasta laskettu normitettu LKV-kulutusprofiili eri kuukausille, sekä todellinen LKV-kulutusprofiili, kuva 7.



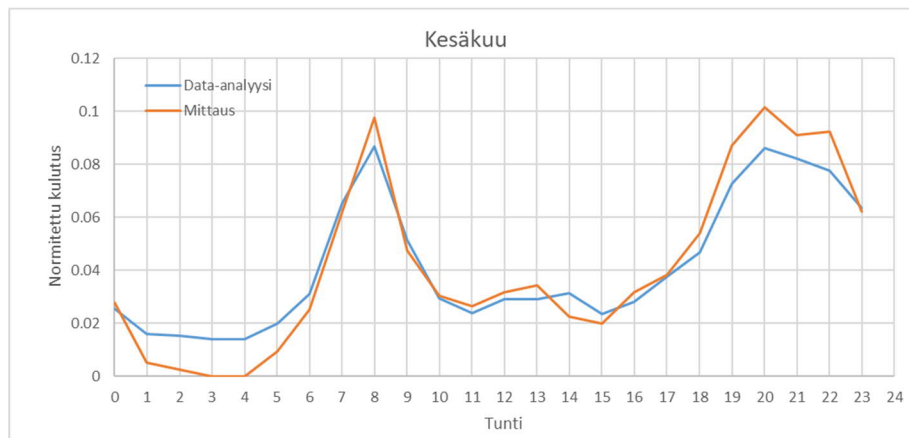
Kuva 7. Simuloitu LKV-profiili ja data-analyysin tuottamat profiilit eri vuodenaikoina.

Analyysin tuottamien LKV-profiilien nähdään vastaavan hyvin todellista profiilia. IDA-ICE-simulaation logiikassa tilojen lämmitys seurasi erittäin vahvasti ulkolämpötilaa, joten lämmityskuukausille saatiin luotua laadukkaat sovitteet. Ero analyysin tuottamien ja todellisen LKV-profiilin välillä selittyy pääasiassa lämpöhäviön arvioinnilla: kun lämpöhäviö arvioidaan joko ylä- tai alakanttiin (kuten väijäämättä tapahtuu), vuorokauden absoluuttisiin kulutusprofiileihin tulee vastaavansuuruinen korkeusheitto. Kun absoluuttiset

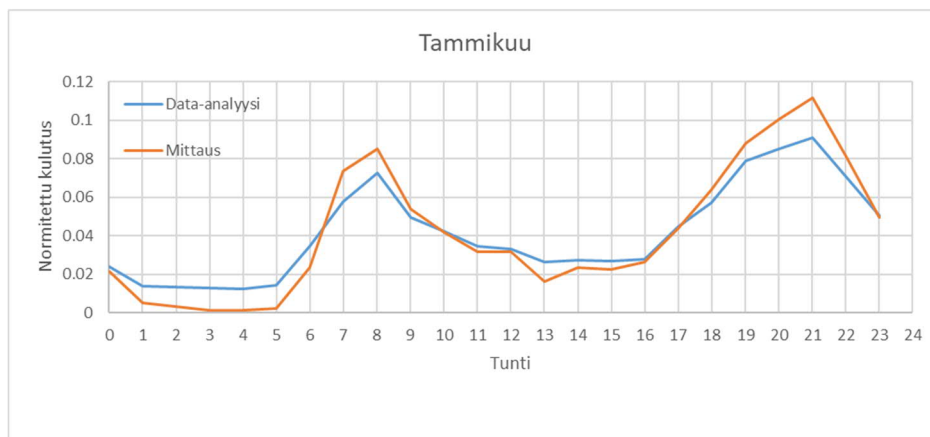
profiilit normitetaan, virhe näkyy profiilien ääriarvojen venymisenä tai latistumisena (kuva 7). Vuodenaikakohtaiset erot selittyvät sillä, että häviön suhteellinen osuus kokonaisprofiilista vaihtelee.

3.4.2 Validointi todellisella datalla

Validointikohteesta (2000-luvulla rakennettu kerrostalo) oli saatavilla tunnittainen kaukolämpökulutus vuoden ajalta, sekä tunnittaiset LKV-mittaukset kesäkuulta 2020 ja tammikuulta 2021. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty kyseisten kuukausien keskimääräiset mitatut arkipäivien vuorokausiprofiilit, sekä vastaavat data-analyysin tuottamat profiilit. Profiilit on normitettu, eli ne esittävät kulutuksen suhteellista jakautumista vuorokauden sisällä.



Kuva 8. Validointikohteen kesäkuun keskimääräinen LKV-arkivuorokausiprofiili, ja data-analyysin tuottama profiili.

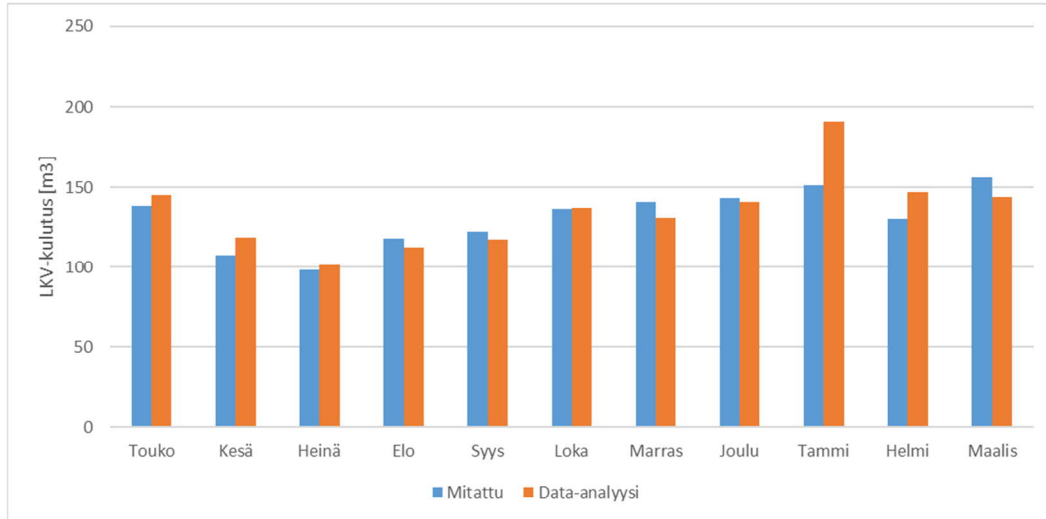


Kuva 9. Validointikohteen tammikuun keskimääräinen LKV-arkivuorokausiprofiili, ja data-analyysin tuottama profiili.

Data-analyysien tuottamien profiilien nähdään seuraavan todellisten profiilien muotoa hyvin. Suurimmat erot näkyvät käyrän huippukohtissa. Kesäkuun profiilissa huippukohtien erot johtuvat siitä, että lämpöhäviöarvioon (ks. kuva 4) sisältyy vääjäämättä jonkin verran myös LKV-kulutusta, jolloin sitä ei saada data-analyysillä arvioitua täysin oikeaksi. Tammikuussa erot puolestaan riippuvat tilalämmityksen sovitesuoran korkeuskorjauksesta suhteessa kulutuspijokkoon, eli p-arvosta. Data-analyysimallin p-arvo (sovitesuoran yläpuolelle jäävien pisteiden prosenttiosuus kaikista pisteistä) vaikuttaa normitetun profiilin muotoon sekä analysoituun absoluuttiseen kulutukseen, mutta sen lisäksi se vaikuttaa analyysin

virheherkkyyteen: jos p-arvo on korkea, esimerkiksi 0.99, koko sovitesuora liikkuu todennäköisimmin reilusti sivuun muutaman virhemittauksen vaikutuksesta.

Kuvassa 10 on esitetty vielä validointikohteelle data-analyysin tuottamat sekä mitatut kuukausikulutukset, aikavälille toukokuu 2020 - maaliskuu 2021.



Kuva 10. Mitatut ja analyysin tuottamat kuukausikulutukset validointikohteelle.

Keskimääräinen absoluuttinen virhe data-analyysin kuukausikulutusarviossa on 7.4 % mitatusta kulutuksesta. Suurimmillaan virhe on tammikuussa (26.0 %). Tammikuun pistejoukossa tai sovitteessa ei ollut havaittavissa selvää syytä keskimääräistä suuremmalle virheelle. Koska validointikohteita on vain yksi, on esimerkiksi mahdollista, että talon lämmitysjärjestelmää on tuolloin ajettu tavallisesta poikkeavalla tavalla. Myös nopeat ulkolämpötilanvaihtelut voivat vaikuttaa sovitesuoramenetelmän tarkkuuteen.

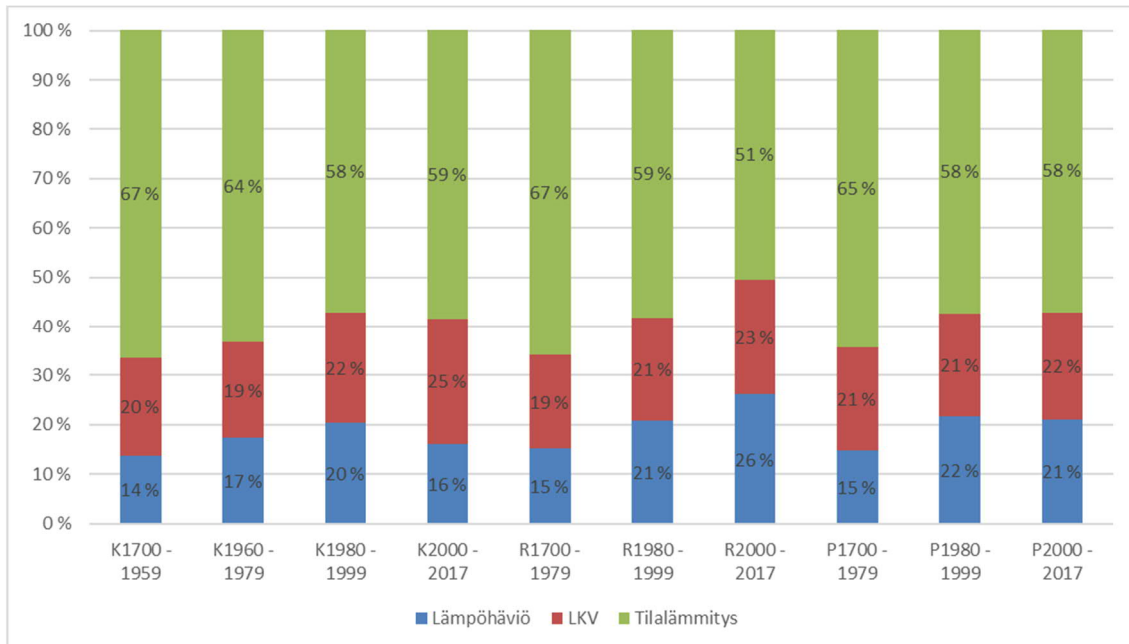
Validoinnin perusteella varsinainen data-analyysi päädyttiin tekemään p-parametrilla 0.9, ja lämpöhäviöksi arvioitiin heinäkuun päivittäisten minimikulutuksien 10. persentiili, kuten aiemmin esitettiin.

4. Kaukolämpödata-analyysin tulokset

Tässä luvussa esitellään data-analyysin tuottamat tulokset, talotyypeittäin ja joissain tapauksessa ikäluokittain eriteltynä. Pien- ja rivitaloille yksittäisten talojen data sekä ryhmädata on yhdistetty, ja ikäluokat 1700 - 1959 ja 1960 - 1979 on yhdistetty yhdeksi paketiksi, koska ryhmädataa ei oltu eroteltu mainittuihin ikäluokkiin (taulukko 3).

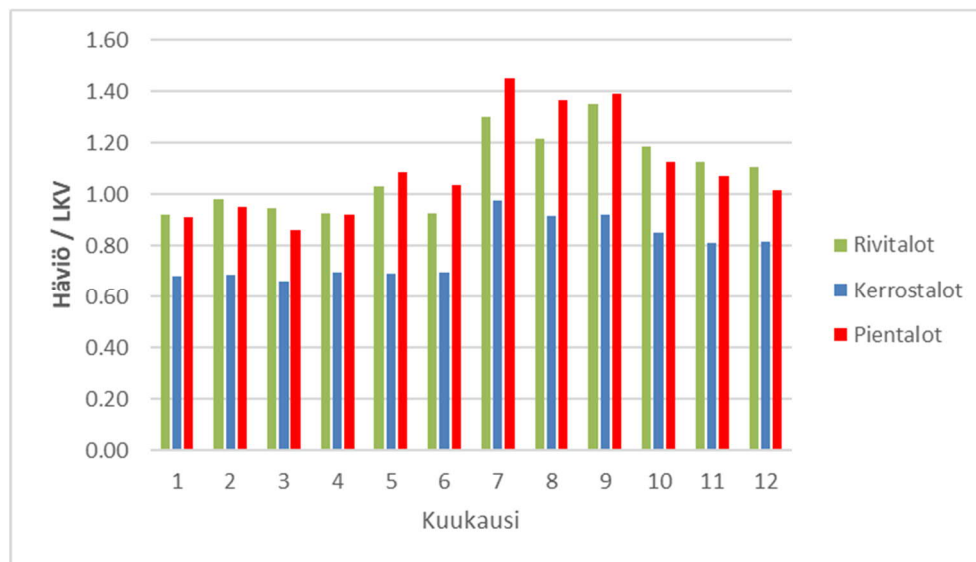
4.1 Kaukolämmön kulutuskomponentit

Alla kuvassa 11 on esitetty KL-energiakulutuksen jakautuminen lämpöhäviöön, LKV-kulutukseen ja tilojenlämmitykseen.



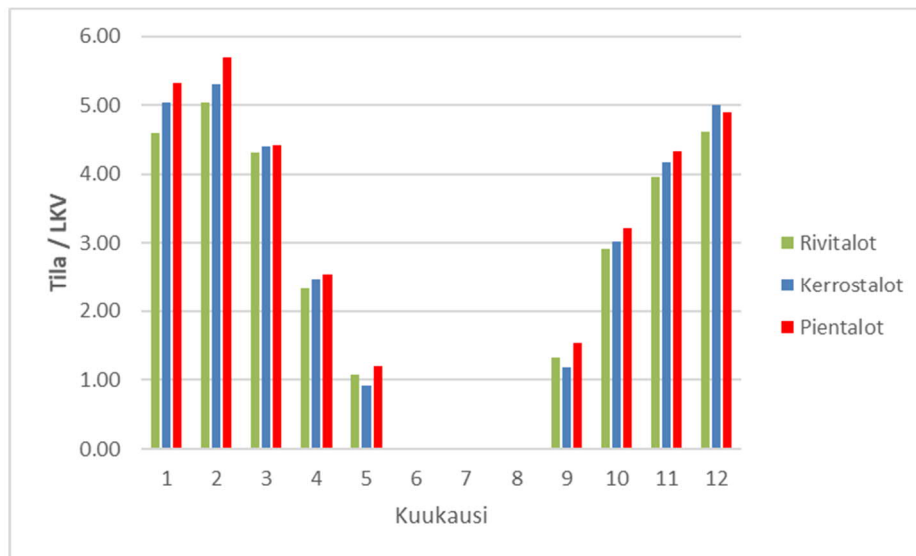
Kuva 11. Kaukolämmön kulutuksen jakautuminen talotyypeittäin ja ikäluokittain.

Kaikissa talotyypeissä tilojen lämmityksen osuus KL-kulutuksesta pienenee uudempiin ikäluokkiin siirryttäessä, mikä on odotettavissa, sillä uudessa rakennuskannassa eristetaso on parempi. Alla on esitetty lisäksi kuvaajat lämpöhäviön (kuva 12) ja tilälämmityksen (kuva 13) suhteellisesta osuudesta LKV-kulutukseen nähden talotyypeittäin ja kuukausittain. Suhteellisia osuuksia käytettiin myöhemmin skenaarioanalyysissä, kun laskettiin lämpöpumpuilla katettavaa energiatarvetta.



Kuva 12. Lämpöhäviön ja LKV-kulutuksen suhde kuukausittain ja talotyypeittäin.

Analyysin perusteella lämpöhäviö suhteessa LKV-energiankulutukseen on suurimmillaan elo-lokakuussa. Rivi- ja pientaloilla lämpöhäviön suhteellinen osuus, on kerrostaloihin nähden suurempi. Tämä voi selittyä sillä, että kerrostaloissa samaan lämmönvaihtimeen on kytketty suurempi määrä kuluttajia, mikä pienentää lämmönvaihdinlaitteiston lämpöhäviön suhteellista osuutta.

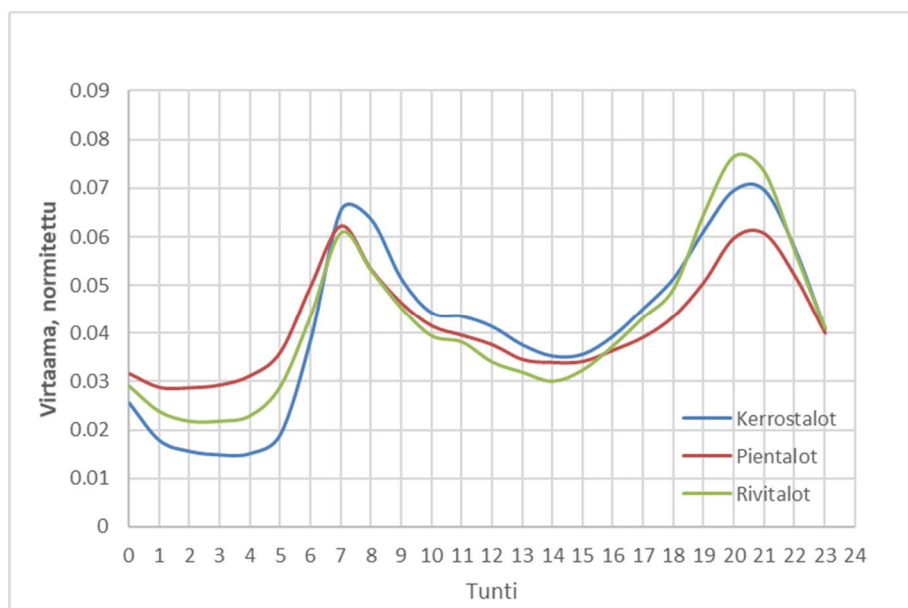


Kuva 13. Tilalämmityksen ja LKV-kulutuksen suhde kuukausittain ja talotyypeittäin.

Analyysin perusteella tilalämmityksen energiankulutus suhteessa LKV-energiankulutukseen on suurimmillaan helmi-maaliskuussa. Talotyyppien välillä ei ole suuria eroja

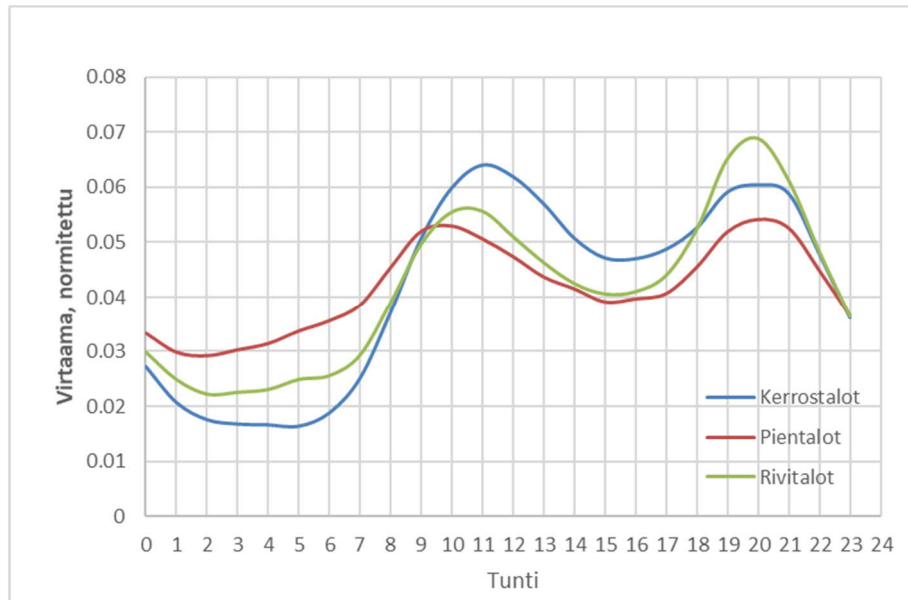
4.2 Lämpimän käyttäveden kulutuksen vuorokausiprofiilit

Seuraavassa on esitetty data-analyysin tuottamat LKV-kulutuksen normitetut koko vuoden keskiarvoprofiilit, erikseen kullekin talotyyppille sekä arkipäiville (kuva 14) ja viikonlopulle (kuva 15). Normitetut profiilit on laskettu jakamalla absoluuttisten kulutusprofiilien jokainen tunti koko vuorokauden kulutuksen summalla, ja ne kuvaavat kulutuksen suhteellista jakautumista vuorokaudelle.



Kuva 14. LKV-kulutuksen vuorokauden kulutuksen summalla normitetut vuorokausiprofiilit talotyypeittäin, arkipäivinä.

Eri talotyyppien käyrien muodot ovat pääsääntöisesti samanlaiset. Kerrostaloissa aamuhuippu on leveämpi, ja ajoittuu hieman myöhemmäksi kuin pien- ja rivitaloilla. Lisäksi kerros- ja rivitaloissa kulutuksen iltahuippu on aamuhuippua suurempi. Pientaloissa tilanne on analyysin mukaan päinvastainen. Erityisen huomattava ero talotyyppien profiileissa kulutuksissa on yöaikaan. Pientalojen kulutus on analyysin mukaan yöaikaan miltei samalla tasolla kuin iltapäivällä.



Kuva 15. LKV-kulutuksen vuorokauden kulutuksen summalla normitetut vuorokausiprofiilit talotyypeittäin, viikonloppuisin.

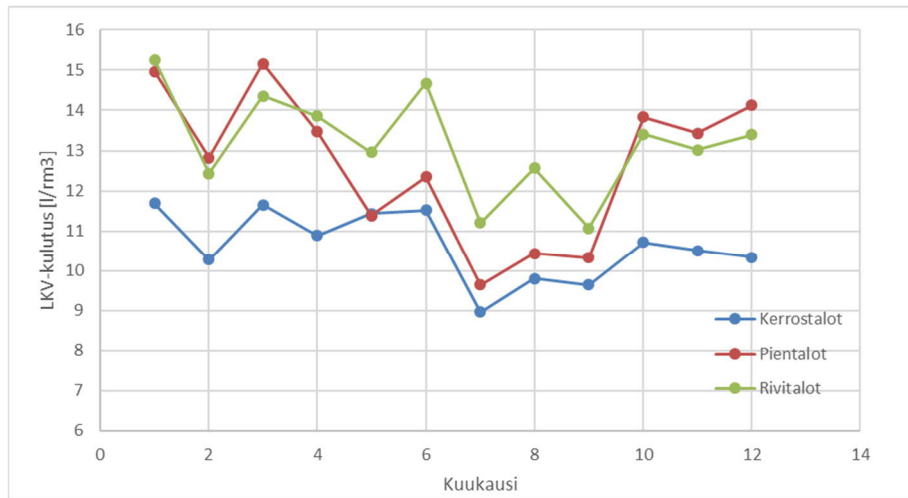
Viikonloppuprofiileissa nähdään arkiprofiileihin verrattuna tyypillinen aamuhuipun myöhäistyminen ja tasoittuminen, kuten esim. lähteessä (Ahmed, Pylysy and Kurnitski, 2016).

On epäselvää, voivatko vuorokausiprofiilien erot olla selitettävissä eri talotyypeissä asuvien ihmisten erilaisilla kulutustottumuksilla. Toisaalta analyysiä tehdessä kävi ilmi, että rivi- ja pientalojen kulutusdatan soveltumista analyysiin heikentää tuntikohtaisten kaukolämpömittausten resoluutio, joka vaihteli datassa kohteittain. Pienen kulutuksen kohteissa mittausresoluutio rajoitti KL-kulutuksen ulkolämpötilariippuvuuden analysointia. Toinen seikka, joka heikentää rivi- ja pientalojen kulutusdatan soveltumista analyysiin, on kohteiden pieni asukasmäärä, joka johtaa siihen, että yksittäisten asukkaiden käytöksellä on suurempi vaikutus keskiarvoistettuihin tuloksiin. Ilmiö näkyy selvästi pientalojen tapauksessa, jossa yksittäisen kohteen keskimääräinen kulutusprofiili ei välttämättä muistuta millään tavoin suuren ihmisjoukon kulutusprofiilia. Suuremmalla otoksella pientalojenkin profiilit lähestyvät keskivertoprofiilia, mutta on mahdollista, että nyt analyysissä käytetty datajoukko ei ollut tähän riittävän suuri.

Koska tarkempaa tietoa ei ollut saatavilla, oletettiin että käyrien muotojen erot ovat johdettavissa pääasiallisesti mainittuihin analyysitekniisiin seikkoihin. Näin ollen tasemallinnuksen lähtötietoina myöhemmissä luvuissa käytettiin vain kerrostalodatasta saatuja profiileja, joiden oletettiin olevan yleistettävissä kaikille talotyypeille.

4.3 Lämpimän käyttöveden kuukausikulutukset

Kuvassa 16 on esitetty analyysin tuottamat kuukausikulutukset talotyypeittäin. Asunnoille tulevan hanaveden lämpötilan vuodenaikavaihtelu on huomioitu muutettaessa LKV-kulutusta energiayksiköstä tilavuusyksikköön.



Kuva 16. Eri talotyyppien keskimääräiset kuukausikulutukset rakennustilavuutta kohden.

Data-analyysin perusteella kaikissa talotyypeissä LKV-kulutus on pienimmillään heinä - syyskuussa. Pientalojen kuukausikulutuksissa on nähtävissä enemmän vuodenaikavaihtelua kuin kerros- ja rivitaloissa. Pientalojen sekä rivitalojen absoluuttiset kulutukset ovat korkeammat kuin kerrostaloissa.

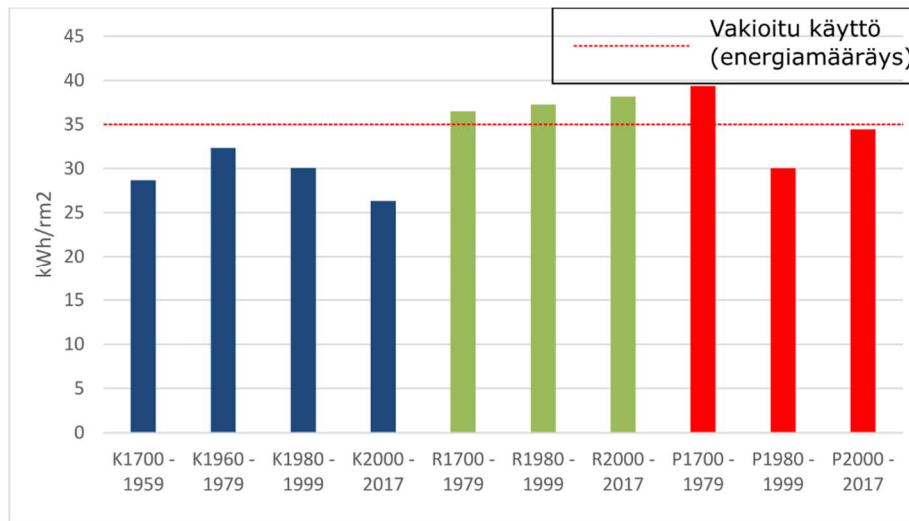
4.4 Lämpimän käyttöveden vuosikulutukset

Taulukossa 4 kohteiden vuosikulutukset talotyypeittäin ja ikäluokittain. Pinta-alaa kohden esitetyt kulutukset on syytä olettaa epätarkemmiksi kuin tilavuutta kohden esitetyt, koska huonekorkeusarvioihin sisältyy epävarmuutta.

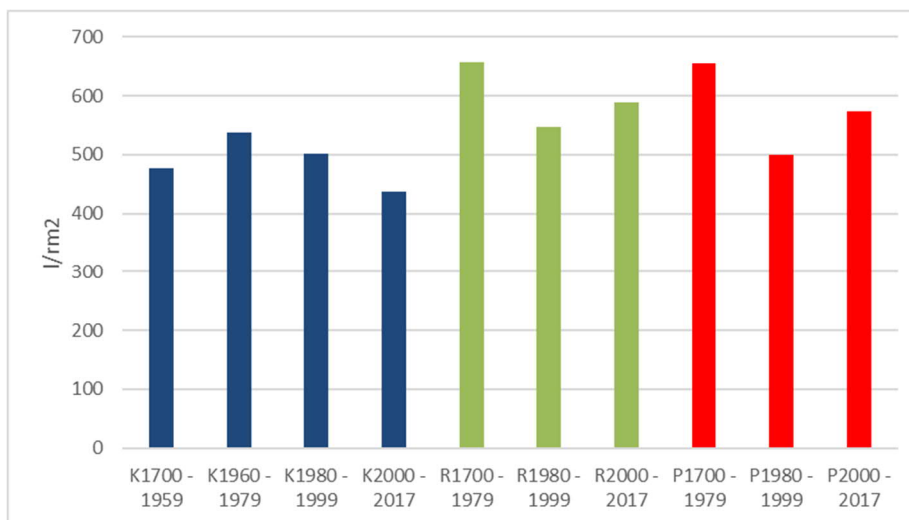
Taulukko 4. Käyttöveden lämpöenergian vuosikulutusindikaattoreita talotyypeittäin ja ikäluokittain.

Paketti	Vuosikulutus [kWh/rm ²]	Vuosikulutus [l/rm ²]	Vuosikulutus [kWh/rm ³]	Vuosikulutus [l/rm ³]
Kerrostalot 1700 - 1959	28.7	476	7.4	122
Kerrostalot 1960 - 1979	32.3	538	8.9	148
Kerrostalot 1980 - 1999	30.1	501	8.8	146
Kerrostalot 2000 - 2017	26.3	437	6.2	103
Pientalot 1700 - 1979	36.5	658	10.1	176
Pientalot 1980 - 1999	37.3	547	9.4	150
Pientalot 2000 - 2017	38.2	589	9.7	150
Rivitalot 1700 - 1979	39.4	654	10.6	178
Rivitalot 1980 - 1999	30.0	500	9.0	150
Rivitalot 2000 - 2017	34.3	573	9.0	137

Taulukon 4 LKV-kulutukset on esitetty myös kuvissa 17 ja 18.



Kuva 17. Lämpimän käyttöveden vuosikulutukset talotyypeittäin ja ikäluokittain rakennuspinta-alaa kohden. Vertailuarvona on esitetty ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukainen vakioitu LKV-kulutus nettoalaa kohden.

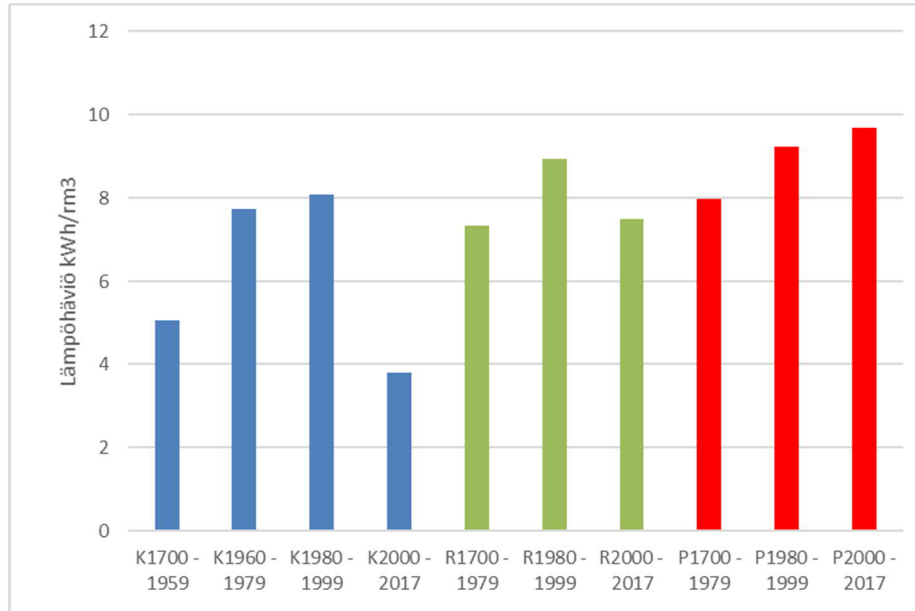


Kuva 18. Lämpimän käyttöveden vuosikulutukset talotyypeittäin ja ikäluokittain vesitilavuutena rakennuspinta-alaa kohden.

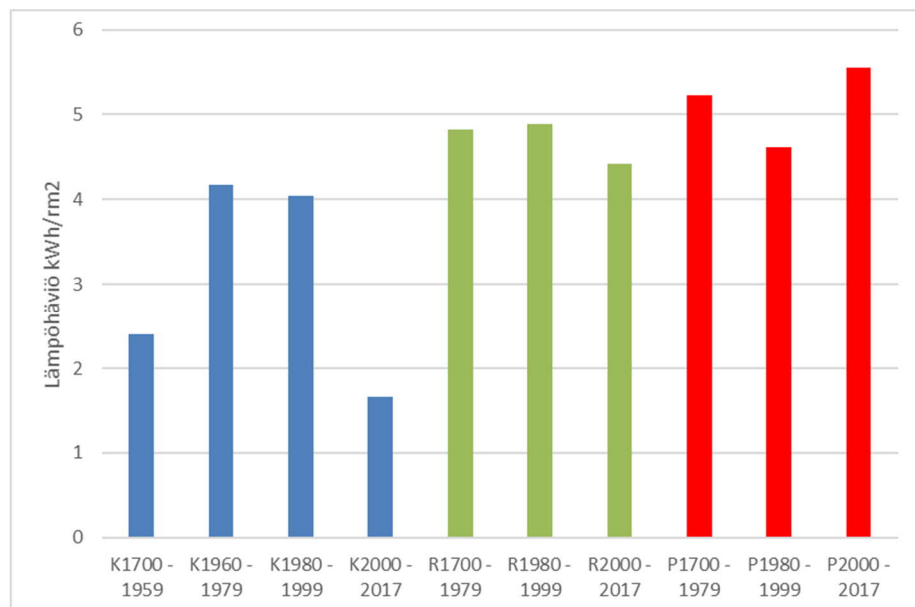
Analyysin perusteella pien- ja rivitaloissa LKV-kulutus on kerrostaloja suurempi. Asumisväljyys (m^3 tai m^2 per henkilö) on kuitenkin rivitaloissa samaa luokkaa kuin kerrostaloissa, ja pientaloissa suurempi kuin kerrostaloissa, mikä ei tue tuloksia. Lisäksi TTS:n aiemmassa tutkimuksessa (Korhonen *et al.*, 2020) todettiin kulutuksen olevan kerrostaloissa henkilöä kohden suurempi kuin pien- ja rivitaloissa, pikemmin kuin päinvastoin. Kuvaan 17 on piirretty pakettien vuosikulutuksen lisäksi referenssiksi rakennusten energiamääräyksen (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen... 1010/2017 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX ®, no date) mukainen vakioitu LKV-kulutus nettoalaa kohden (35 kWh/m^2). Kaikkien pakettien vuosikulutukset osuvat kohtuullisen lähelle referenssiarvoa, ottaen huomioon analyysin sekä pinta-ala \rightarrow tilavuus -muunnoksen aiheuttaman epätarkkuuden. Kulutusluvuista voitaisiin tuottaa arvioita myös LKV-kulutuksesta henkilöä kohden (käyttämällä asukastiheyttä kuvaavia indikaattoreita), mutta koska tällaisiin arvioihin sisältyy merkittävästi epävarmuutta, kulutuslukemien perustana käytetään tässä tutkimuksessa lähteessä (Korhonen *et al.*, 2020) raportoituja kulutustasoja.

4.5 Lämpöhäviöt

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty lämpöhäviöt energioina rakennuskuutiota sekä -neliötä kohden, rakennustyypeittäin ja ikäluokittain.



Kuva 19. Lämpöhäviöt talotyypeittäin ja ikäluokittain rakennustilavuutta kohden.

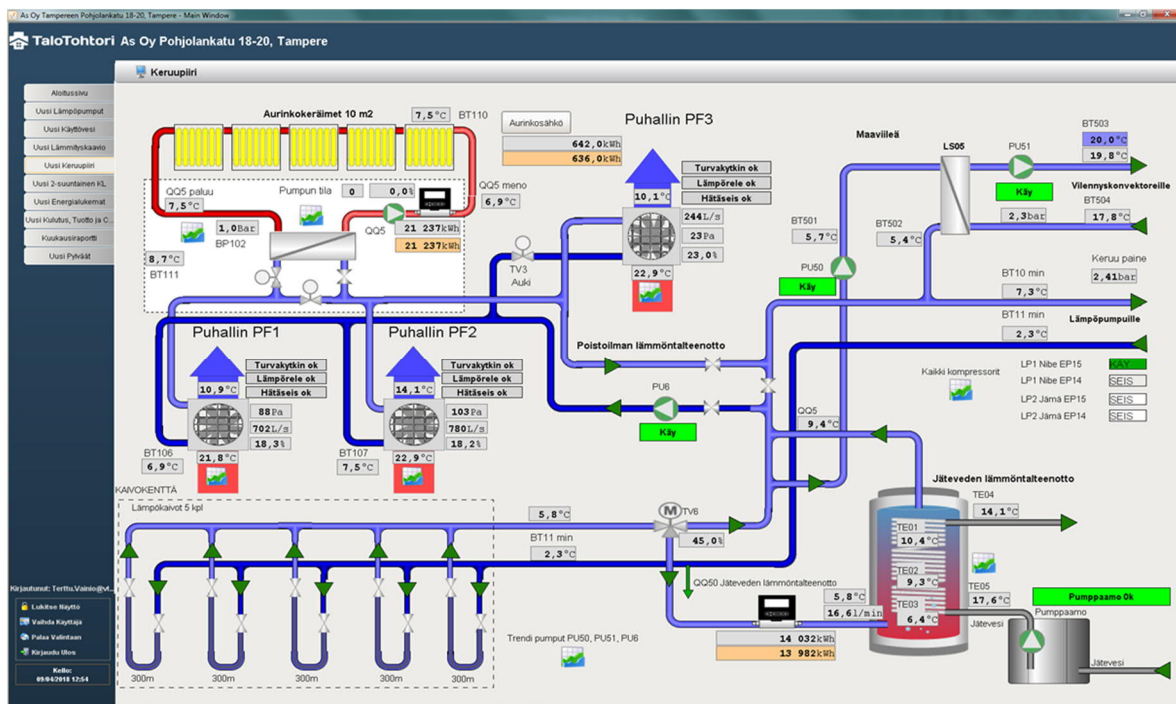


Kuva 20. Lämpöhäviöt talotyypeittäin ja ikäluokittain rakennuspinta-alaa kohden.

Rivi- ja pientaloissa lämpöhäviöt ovat melko vakiot ikäluokkien välillä, ja suuremmat kuin kerrostaloissa. Tämä on mahdollisesti selitettävissä sillä, että rivi- ja pientalojen KL-vaihtimien lämpöhäviöt ovat suhteellisesti suuremmat kuin kerrostaloissa, koska kerrostaloissa samaan vaihtimeen tyypillisesti liittyy suurempi määrä lämmön kuluttajia. Kerrostaloissa on nähtävissä suurempia eroja ikäluokkien välillä.

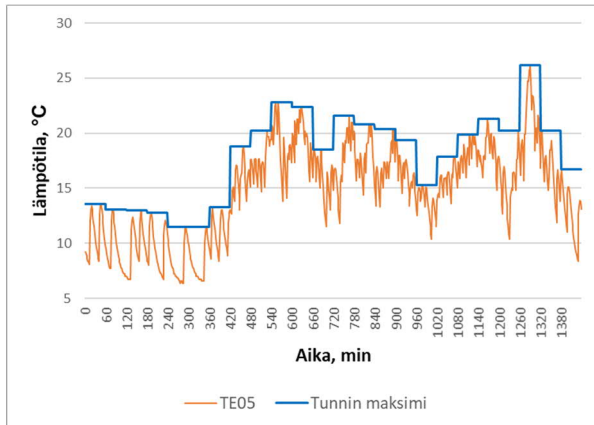
5. Jäteveden jäähtymä 1970-luvun kerrostalossa

Tampereella sijaitseva As Oy Pohjolankatu 18 - 20 on 1970-luvulla rakennettu kerrostalo, joka saneerattiin perusteellisesti vuosina 2013 – 2017. Rakennuksen kokonaispinta-ala on 4117 m² ja huoneistoja on 54 kappaletta. Uusi lämmitysjärjestelmä perustuu lämpöpumppeihin, joilla kerätään lämpöä useammasta energialähteestä: porakaivoista, poistoilmasta, aurinkokeräimistä sekä jätevedestä. Järjestelmä on mittaroitu hyvin ja mittaustietoa on kerätty jo useamman vuoden ajan. Mittausdata on tallennettu 2 minuutin välein hetkellisinä arvoina. Lämmönkeruupiirin kytkentä ja automaatiojärjestelmän mittaukset on esitetty alla.

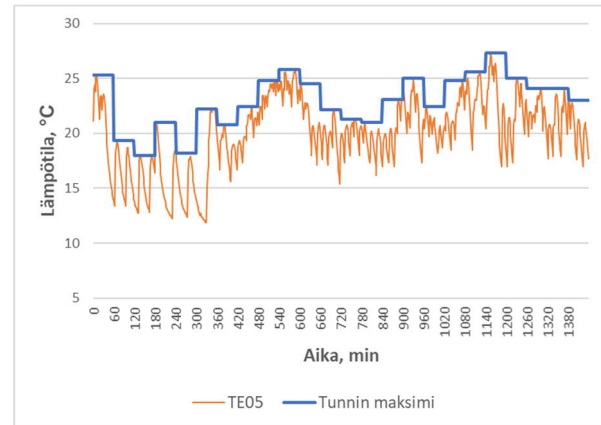


Kuva 21. Tampereella sijaitsevan 1970-luvulla rakennetun kerrostalon, As Oy Pohjolankatu 18-20, lämpöpumppujen lämmönkeruupiiri ja automaatiojärjestelmän mittaukset.

Jäteveden lämmönkeruujärjestelmässä rakennuksesta tuleva jätevesi kerätään kaivon, josta se pumpataan lämmönsiirtimen kautta taloviemäriin ja edelleen kunnalliseen jätevesiverkostoon. Jäteveden lämpötila mitataan ennen lämmöntalteenottosiirintä (kuvassa 21 anturi TE05), lämpötila-anturi mittaa jäteveden lämpötilaa vain, kun pumppu käynnistyy ja jätevesi virtaa putkessa. Pumpun toimintaa ohjaa ilmeisesti uimuri ja pumppu käynnistyy, kun kaivon kertyneen jäteveden korkeus ylittää käynnistyskynnyksen. Pumppu sammuu, kun kaivossa olevan jäteveden korkeus alittaa minimirajan. Tämä aiheuttaa lämpötilan mittaukseen ja sen tulkintaan haasteita, koska pumpun käyntijaksot etenkin yöllä ovat harvakseltaan ja virtauksen pysähtyessä lämpötila pyrkii asettumaan lähelle lämmöntalteenottosiirtimen lämpötilaa. Tämä ilmiö on havaittavissa kuvan 22 lämpötilamittauksista.



Torstai 10.1.2019



Torstai 6.6.2019

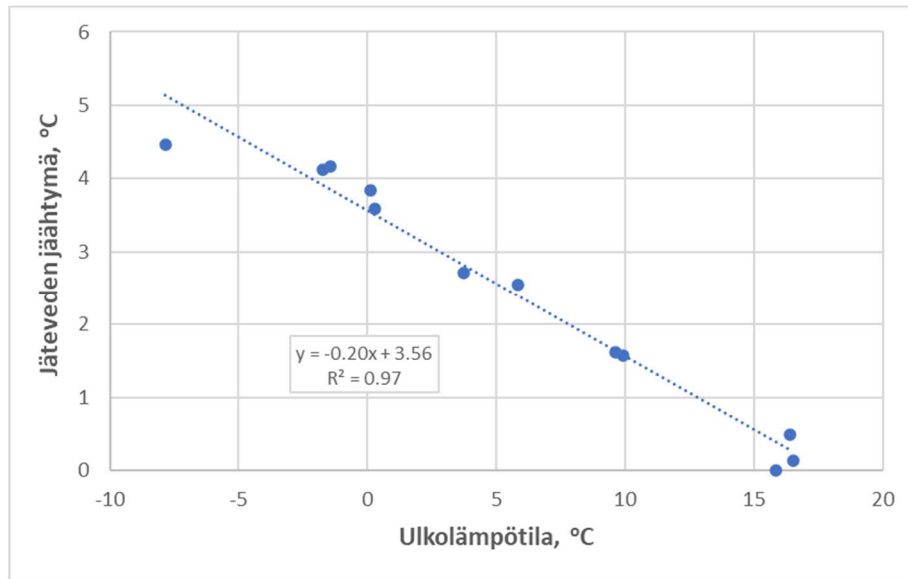
Kuva 22. Mitattu jäteveden lämpötila (mittausväli 2 minuuttia) ja lämpötilan tunnin maksimi yhden vuorokauden jaksolla tammikuussa ja kesäkuussa vuonna 2019.

Koska jäteveden lämpötilamittaus ei ole jatkuvaa, mitatuista lämpötiloista määritettiin tunnin maksimiarvot, joita käytettiin jäähtymäsovitteen laatimisessa. Tunnin jaksoon päädyttiin, koska lyhyemmällä jaksolla pumppu ei välttämättä käynnisty kertaakaan ja tällöin päädyttäisiin liian alhaiseen lämpötila-arvioon. Tunnin maksimiarvot on esitetty myös kuvassa 22 yhdessä mitattujen lämpötilojen kanssa.

Lämpötilamittauksista (kuva 22) ilmenee selvästi vuorokausirytm: yöllä pumppu käynnistyy harvemmin (jäteveden virtaama pienempi) kuin päivällä ja lisäksi jäteveden lämpötila on alhaisempi yöllä kuin päivällä. Mittaukset paljastavat myös selvästi vuodenajan eli ulkolämpötilan vaikutuksen jäteveden lämpötilatasoon: talvella jäteveden lämpötila on selvästi alhaisempi kuin kesällä. Ulkolämpötilan merkitys lämpötilaan on ilmeinen, koska rakennusten pystyviemärit tuulettuvat vapaasti ulkoilmaan häiriöttömän toiminnan takaamiseksi.

Kuvassa 23 on esitetty jäteveden jäähtymä ulkolämpötilan funktiona määritettynä mittausten kuukausikeskiarvoista. Sää tietoina on käytetty Ilmatieteen laitoksen julkaisemia, Tampere-Pirkkala lentoaseman, avoimen datan säähavaintoja. Tarkastelu on tehty vuoden 2019 mittaustuloksista, jonka ajateltiin edustavan ns. normaalia vuotta ennen pandemiaa.

Jäähtymän vertailukuukautena on käytetty elokuuta, johon muiden kuukausien jäteveden lämpötilaa on verrattu ja jäähtymä laskettu. Havaitaan, että jäähtymä käyttäytyy kohtuullisen lineaarisesti ja sille onkin käytetty lineaarista sovitetta, kuva 23.

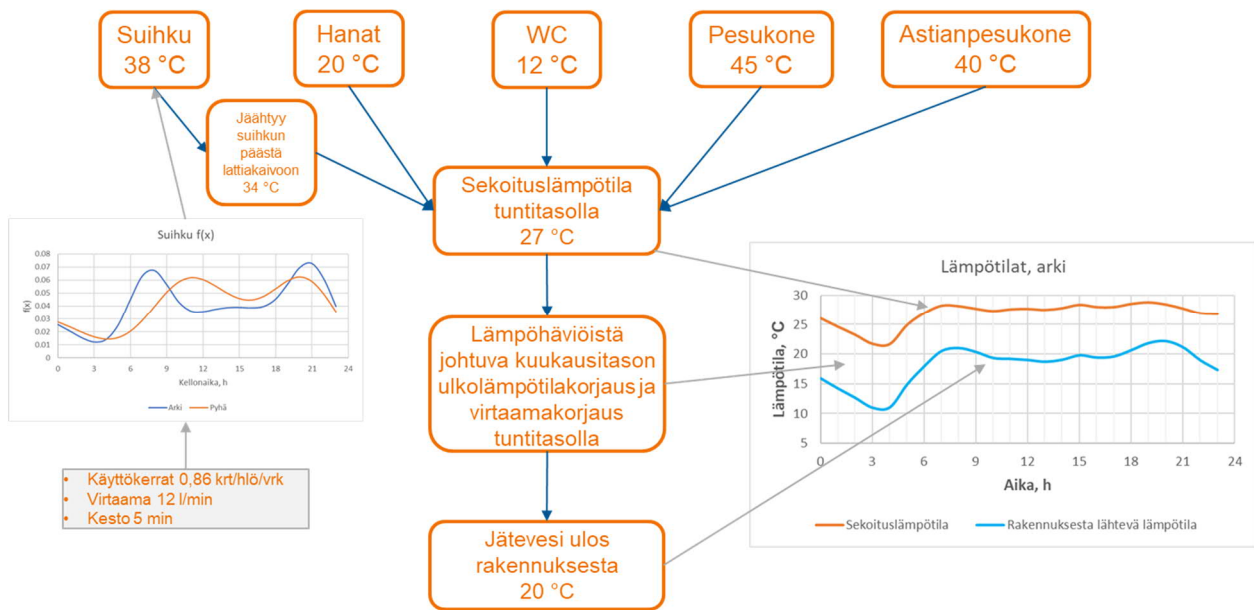


Kuva 23. Jäteveden kuukausittainen keskimääräinen jäähtymä rakennuksessa ulkolämpötilan funktiona, määritettynä vuoden 2019 mittausdatasta, jäähtymä on laskettu elokuun jäteveden lämpötilaan verrattuna.

6. Jäteveden tuottomalli

Rakennusten jäteveden tuottomalli perustuu todennäköisyysmalleihin, joissa kunkin vesikalusteen vuorokautisen käytön todennäköisyyden jakautuminen määritetään tiheysfunktioon perustuen, kaava (5). Yhdistettynä kunkin vesikalusteen tiheysfunktio vuorokautisen keskimääräisen käytön vesimäärän kanssa, saadaan määritettyä vedenkäytön tuntijakauma. Tuottomallilla saadaan laskettua myös jäteveden ns. sekoituslämpötila ennen rakennuksessa tapahtuvaa jäähtymää. Sekoituslämpötila ei ole todellinen lämpötila, mutta sitä käytetään laskennan lähtötietona, jonka perusteella saadaan laskettua arvio rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötilalle, joko ilman rakennuksessa tapahtuvaa jäteveden lämmöntalteenottoa tai sen kanssa.

Rakennuksen jäteveden tuottomalli koostuu edellä kuvattujen kalustekohtaisten virtaamien ja lämpötilojen yhdistelmästä. Jäteveden lämpötila lasketaan kalusteiden sekoituslämpötilasta, ottaen huomioon suihkussa tapahtuva jäähtyminen (kaluste-lattiaviemäri) sekä rakennuksen viemäriverkostossa tapahtuva jäähtyminen, kuva 24.



Kuva 24. Jäteveden tuottomalli virtaamalle ja lämpötilalle.

Seuraavissa kappaleissa käydään yksityiskohtaisesti läpi jäteveden virtaaman ja lämpötilan laskenta.

6.1 Kalustekohtaiset virtaamat ja lämpötilat

Kalustekohtaisten virtaamien kuvaus perustuu todennäköisyyslaskennassa käytettävään tiheysfunktioon. Tiheysfunktio kuvaa suuren ihmisjoukon keskimääräisiä käyttötottumuksia ja sillä pystytään laskemaan käyttöveden tuntikohtaiset kulutukset. Vedenkäyttö on hieman erilaista arkipäivinä ja viikonloppuisin, josta syystä viikonpäivät on eritelty mallinnuksessa arkipäiviin ja viikonloppuun. Käytetty malli perustuu alun perin hollantilaiseen (Blokker, Vreeburg and van Dijk, 2010) ja itävaltalaiseen tutkimukseen (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017), lisäksi samaa mallia on käytetty myös ruotsalaisessa tutkimuksessa (Wärff, 2020).

$$f(x) = \frac{\sum_{n=1}^k \frac{1}{\sigma_{h,n} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_{h,n})^2}{(2\sigma_{h,n}^2)}}}{\int_{x=0}^{23} \left(\sum_{n=1}^k \frac{1}{\sigma_{h,n} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_{h,n})^2}{(2\sigma_{h,n}^2)}} \right)} \quad (5)$$

Kaavassa

$f(x)$ on tiheysfunktion arvo hetkellä x ,
 x vuorokauden ajanhetki ($0 \leq x \leq 23$), h
 k käytettyjen parametrien määrä
 $\sigma_{h,n}$ tapahtuman n keskihajonta, joka kuvaa keskimääräistä poikkeamaa odotusarvosta
 $\mu_{h,n}$ tapahtuman n odotusarvo, joka kuvaa käytön muutosajankohtaa

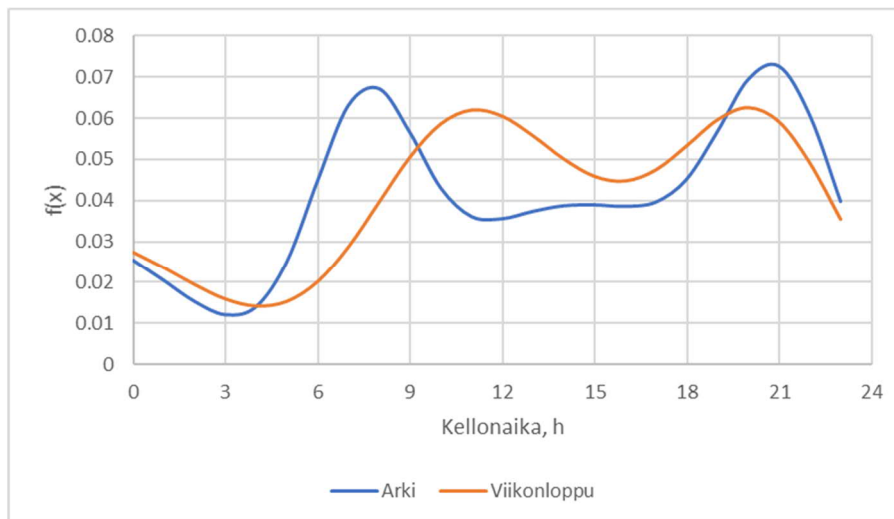
Seuraavassa on käyty läpi kalustekohtaisten kulutusten mallintamiseen liittyvät yksityiskohtaiset parametrit.

6.1.1 Suihku

Suihkun tiheysfunktion parametrit (taulukko 5) on määritetty siten, että lämpimän veden kulutusprofiili on saatu vastaamaan data-analyysin tuloksia. Suihkun parametrien sovitus on toteutettu samanaikaisesti kaikkien vesikalusteiden parametrien sovituksen kanssa. Suihkun kulutusprofiilit arki- ja viikonlopun päville on esitetty kuvassa 25.

Taulukko 5. Suihkun tiheysfunktion parametrit arkipäiville ja viikonlopulle.

n	Arkipäivät		Viikonloppu	
	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$
1	-1.8	3.2	-2.0	4.0
2	7.5	1.7	10.3	2.8
3	12.5	3.6	15.0	4.0
4	18.0	4.0	20.6	2.5
5	21.0	1.8	-	-



Kuva 25. Suihkun käytön vuorokautiset tiheysfunktiot arkipäiville ja viikonlopulle.

Suihkun vuorokautisen kokonaisvedenkulutuksen määrittämiseksi ja kuuman veden käytön erittelemiseksi tarvitaan lisäksi vuorokautinen vedenkulutuksen määrä sekä käyttölämpötila. Vuorokautinen suihkun vedenkulutus henkilöä kohti on määritetty suihkun keskimääräisen vuorokautisen käyttökertojen, keskimääräisen suihkun käyttöajan ja kalusteen virtaaman perusteella. Taulukossa 6 annettavat virtaama-arvot perustuvat Työtehoseuran vedenkäyttötutkimukseen (Korhonen *et al.*, 2020) ja käyttölämpötila ruotsalaiseen tutkimukseen (Wärff *et al.*, 2020).

Taulukko 6. Suihkun keskimääräinen vuorokautisten käyttökertojen määrä, käyttöjakson virtaama, käyttöjakson pituus ja käyttölämpötila.

Käyttökertojen määrä, kpl/hlö/vrk	0,86
Käyttöjakson kesto, min	5
Virtaama, dm ³ /min	12
Lämpötila, °C	38

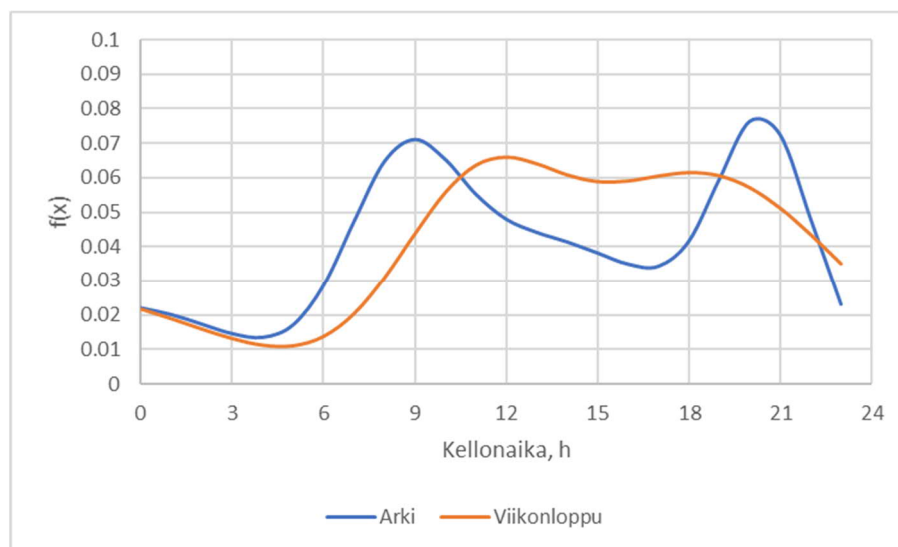
Suihkun henkilöä kohti laskettu vuorokausikulutus taulukon 6 arvoilla on $51.6 \text{ dm}^3/\text{hlö}/\text{vrk}$. Kuumen veden käyttöosuus riippuu paitsi annetusta sekoitetun veden lämpötilasta, niin myös kylmän veden lämpötilasta. Kylmän veden lämpötila riippuu vuoden ajasta (ks. kuva 6).

6.1.2 Hanat

Hanat käsittävät sekä WC:n ja pesuhuoneiden että keittiön pesuallaiden hanat. Hanojen tiheysfunktion parametrit (taulukko 7) on määritetty siten, että lämpimän veden kulutusprofiili on saatu vastaamaan data-analyysin tuloksia. Hanojen parametrien sovitus on toteutettu samanaikaisesti kaikkien vesikalusteiden parametrien sovituksen kanssa. Hanojen kulutusprofiilit arki- ja viikonlopun päville on esitetty kuvassa 26.

Taulukko 7. Hanojen tiheysfunktion parametrit arkipäiville ja viikonlopuille.

n	Arkipäivät		Viikonloppu	
	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$
1	-1.0	4.0	-3.0	5.0
2	8.5	1.8	11.0	2.6
3	12.0	3.0	17.0	4.0
4	17.2	4.0	20.0	4.0
5	20.5	1.5	-	-



Kuva 26. Hanojen vuorokautisen käytön tiheysfunktiot arkipäiville ja viikonlopuille.

Hanojen vuorokausikulutuksen määrittämiseksi ja kuumen veden käytön erittelemiseksi tarvitaan lisäksi vuorokautinen vedenkulutuksen määrä sekä käyttölämpötila. Vuorokautinen hanojen vedenkulutus henkilöä kohti on määritetty hanojen keskimääräisen vuorokautisen käyttökertojen, keskimääräisen hanojen käyttöajan ja kalusteen virtaaman perusteella. Taulukossa 8 annettavat virtaama-arvot perustuvat Työtehoseuran vedenkäyttötutkimukseen (Korhonen *et al.*, 2020) ja käyttölämpötila ruotsalaiseen tutkimukseen (Wärff *et al.*, 2020).

Taulukko 8. Hanojen keskimääräinen vuorokautisten käyttökertojen määrä, käyttöjakson virtaama, käyttöjakson pituus ja käyttölämpötila.

Käyttökertojen määrä, kpl/hlö/vrk	9
Käyttöjakson kesto, min	0.7
Virtaama, dm ³ /min	6
Lämpötila, °C	20

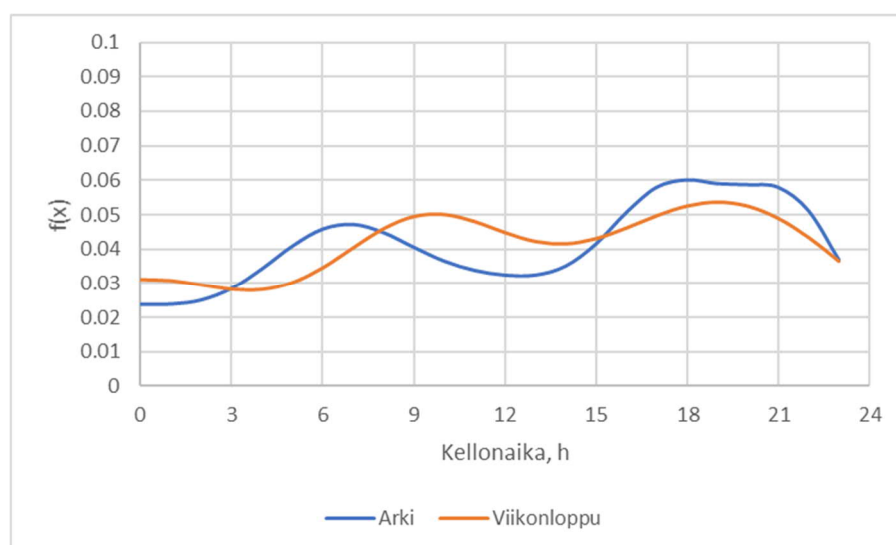
Taulukon 8 mukaisilla käyttöparametreilla hanojen vuorokausikulutukseksi henkilöä kohti tulee 37.8 dm³/hlö/vrk. Kuumen veden käyttöosuus riippuu paitsi annetusta sekoitetun veden lämpötilasta, niin myös kylmän veden lämpötilasta, samoin kuten suihkulla.

6.1.3 WC

WC:n käytön tiheysfunktion parametrit (taulukko 9) on määritetty siten, että lämpimän veden kulutusprofiili on saatu vastaamaan data-analyysin tuloksia. WC:n parametrien sovitus on toteutettu samanaikaisesti kaikkien vesikalusteiden parametrien sovituksen kanssa. Hanojen kulutusprofiilit arki- ja viikonloppun päville on esitetty kuvassa 27.

Taulukko 9. WC:n käytön tiheysfunktion parametrit arkipäiville ja viikonloppulle.

n	Arkipäivät		Viikonloppu	
	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$	$\mu_{h,n}$	$\sigma_{h,n}$
1	-1.0	4.0	0.0	4.0
2	6.5	2.5	9.2	3.0
3	12.3	3.3	17.0	4.5
4	17.5	2.0	20.5	4.0
5	21.5	1.9	-	-



Kuva 27. WC:n vuorokautisen käytön tiheysfunktiot arkipäiville ja viikonloppulle.

WC:n käytön vuorokausikulutuksen määrittämiseksi tarvitaan lisäksi vuorokautinen vedenkulutus sekä käyttölämpötila. Vuorokautinen WC:n vedenkulutus henkilöä kohti on määritetty WC:n keskimääräisen

vuorokautisen huuhtelukertojen ja yhteen huuhtelukertaan kuluvan keskimääräisen vesimäärän perusteella. Taulukossa 10 annettavat virtaama-arvot perustuvat Työtehoseuran vedenkäyttötutkimukseen (Korhonen *et al.*, 2020).

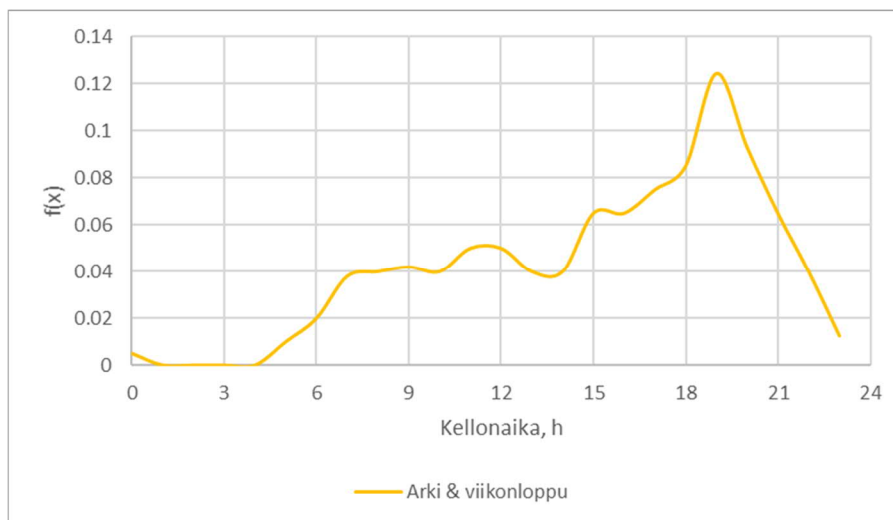
Taulukko 10. WC:n keskimääräinen vuorokautisten käyttökertojen määrä, käyttökerran vesimäärä ja käyttölämpötila.

Käyttökertojen määrä, kpl/hlö/vrk	4
Vesimäärä, dm ³ /käyttökerta	4
Lämpötila, °C	kylmä vesi

Taulukon 10 mukaisilla käyttöparametreilla WC:n vuorokausikulutukseksi henkilöä kohti tulee 16 dm³/hlö/vrk. WC:n vedenkulutus on pelkästään kylmää vettä.

6.1.4 Astianpesu

Astianpesuun käytetyn veden kulutuksen oletetaan liittyvän pelkästään astianpesukoneen käyttöön. Astianpesukoneen käytön tiheysfunktio perustuu lähinnä norjalaiseen tutkimukseen (Stamminger and Schmitz, 2017) ja lisävaikutteita siihen on antanut EU:n sisällä tehty selvitys (Degefa *et al.*, 2018). Astianpesukoneen tiheysjakauman sovitus on toteutettu samanaikaisesti kaikkien vesikalusteiden parametrien sovituksen kanssa. Astianpesukoneen kulutusprofiilien eroavuuksista arki- ja viikonlopun välillä ei löytynyt tutkimustietoa, joten arki- ja viikonlopun päiville on käytetty samaa profiilia, kuva 28.



Kuva 28. Astianpesukoneen vuorokautisen käytön tiheysfunktiot arkipäiville ja viikonloppulle.

Astianpesukoneen veden vuorokausikulutuksen määrittämiseksi tarvitaan lisäksi vuorokautinen vedenkulutus sekä käyttölämpötila. Vuorokautinen astianpesukoneen vedenkulutus henkilöä kohti on määritetty keskimääräisen vuorokautisen käyttökertojen ja yhteen käyttökertaan kuluvan keskimääräisen vesimäärän perusteella. Taulukossa 11 annettavat virtaama-arvot perustuvat Työtehoseuran vedenkäyttötutkimukseen (Korhonen *et al.*, 2020) ja käyttölämpötila ruotsalaiseen tutkimukseen (Wärff *et al.*, 2020).

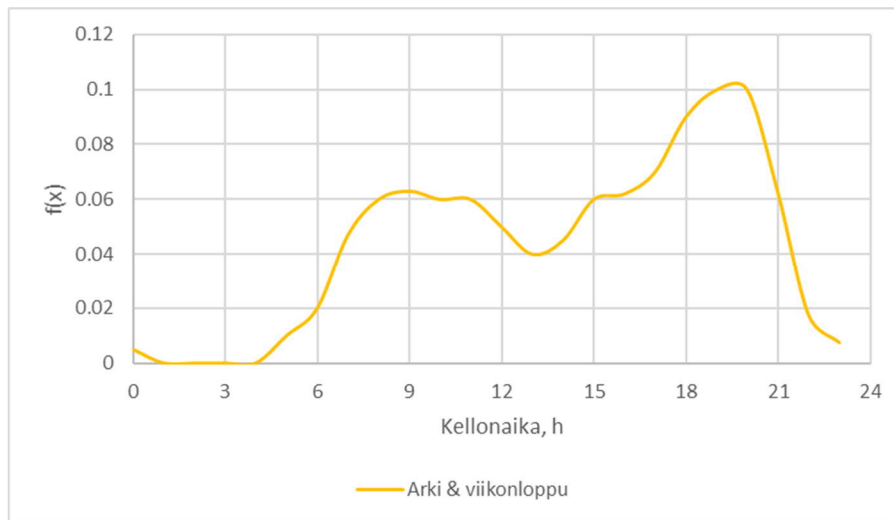
Taulukko 11. Astianpesukoneen keskimääräinen vuorokautisten käyttökertojen määrä, käyttökerran vesimäärä ja käyttölämpötila.

Käyttökertojen määrä, kpl/hlö/vrk	0.29
Vesimäärä, dm ³ /käyttökerta	14.4
Lämpötila, °C	40

Taulukon 11 mukaisilla käyttöparametreilla astianpesun vuorokausikulutukseksi henkilöä kohti tulee 4.2 dm³/hlö/vrk. Veden lämmitys oletetaan tapahtuvan koneessa sähköllä, eikä siten vaikuta varsinaisen lämmitysjärjestelmän energiakulutukseen.

6.1.5 Pyykinpesu

Pyykinpesuun käytetyn veden kulutuksen oletetaan liittyvän pelkästään pyykinpesukoneen käyttöön. Pyykinpesukoneen käytön tiheysfunktio perustuu, kuten aiemmin astianpesukoneen käytönkin, lähinnä norjalaiseen tutkimukseen (Stamminger and Schmitz, 2017) ja lisävaikutteita siihen on antanut EU:n sisällä tehty tutkimus (Degefa *et al.*, 2018). Pyykinpesukoneen tiheysjakauman sovitus on toteutettu samanaikaisesti kaikkien vesikalusteiden parametrien sovituksen kanssa. Pyykinpesukoneen kulutusprofiilien eroavuuksista arki- ja viikonlopun välillä ei löytynyt tutkimustietoa, joten arki- ja viikonlopun päville on käytetty samaa profiilia, kuva 29.



Kuva 29. Pyykinpesukoneen vuorokautisen käytön tiheysfunktiot arkipäiville ja viikonloppulle.

Pyykinpesukoneen veden vuorokausikulutuksen määrittämiseksi tarvitaan lisäksi vuorokautinen vedenkulutus sekä käyttölämpötila. Vuorokautinen astianpesukoneen vedenkulutus henkilöä kohti on määritetty keskimääräisen vuorokautisen käyttökertojen ja yhteen käyttökertaan kuluvan keskimääräisen vesimäärän perusteella. Taulukossa 12 annettavat virtaama-arvot perustuvat Työtehoseuran vedenkäyttötutkimukseen (Korhonen *et al.*, 2020) ja käyttölämpötila ruotsalaiseen tutkimukseen (Wärff *et al.*, 2020).

Taulukko 12. Pyykinpesukoneen keskimääräinen vuorokautisten käyttökertojen määrä, käyttökerran vesimäärä ja käyttölämpötila.

Käyttökertojen määrä, kpl/hlö/vrk	0.18
Vesimäärä, dm ³ /käyttökerta	63.6
Lämpötila, °C	45

Taulukon 12 mukaisilla käyttöparametreilla pyykinpesun vuorokausikulutukseksi henkilöä kohti on 11.5 dm³/hlö/vrk. Veden lämmitys oletetaan tapahtuvan koneessa sähköllä, eikä siten vaikuta varsinaisen lämmitysjärjestelmän energiakulutukseen.

6.2 Jäähtyminen vesikalusteesta viemäriin

Veden jäähtymistä vesikalusteesta viemäriin virratessaan on tutkittu verraten vähän. Kirjallisuudesta löytyy tutkimuksia vain suihkuveden jäähtymisestä suihkupään ja lattiakaivon välillä (Wong, Mui and Guan, 2010), (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017). Toki suihkussa tapahtuva jäähtyminen on huomattavasti merkityksellisempää kuin muissa kalusteissa, ja tässä tutkimuksessa se on ainoa kalusteesta viemäriin tapahtuva jäähtymä, joka otettiin erikseen huomioon.

Suihkussa tapahtuva jäähtyminen lasketaan alun perin Hong Kongin olosuhteisiin määritellyllä kaavalla (6), jota on myös yksinkertaistettuna sovellettu itävaltalaisessa tutkimuksessa (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) ja käytetty myös ruotsalaisessa tutkimuksessa (Wärff *et al.*, 2020).

$$\Delta T_s = \min(10^{-10} * T_s^{6.673}, 7.5 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (6)$$

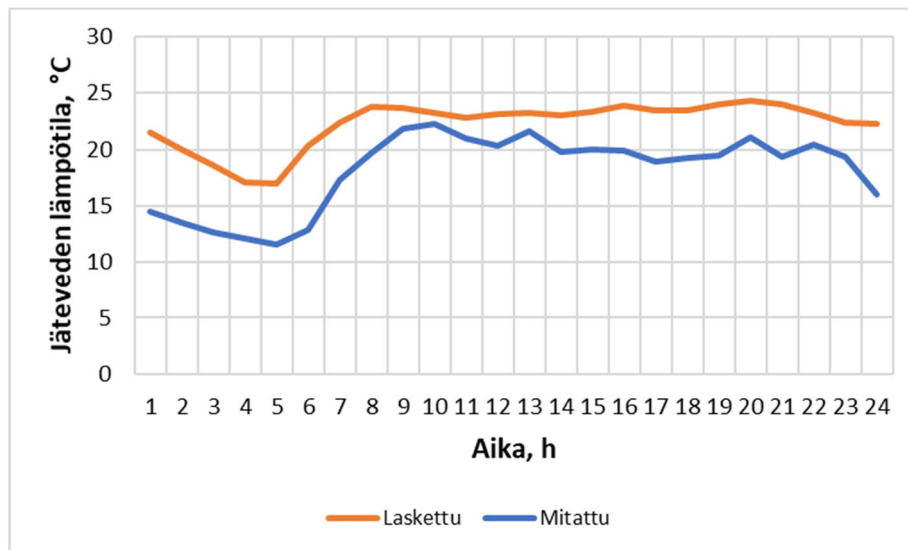
kaavassa

ΔT_s on suihkuveden jäähtymä suihkupäästä lattiakaivoon, °C

T_s on suihkuveden lämpötila suihkupäässä, °C

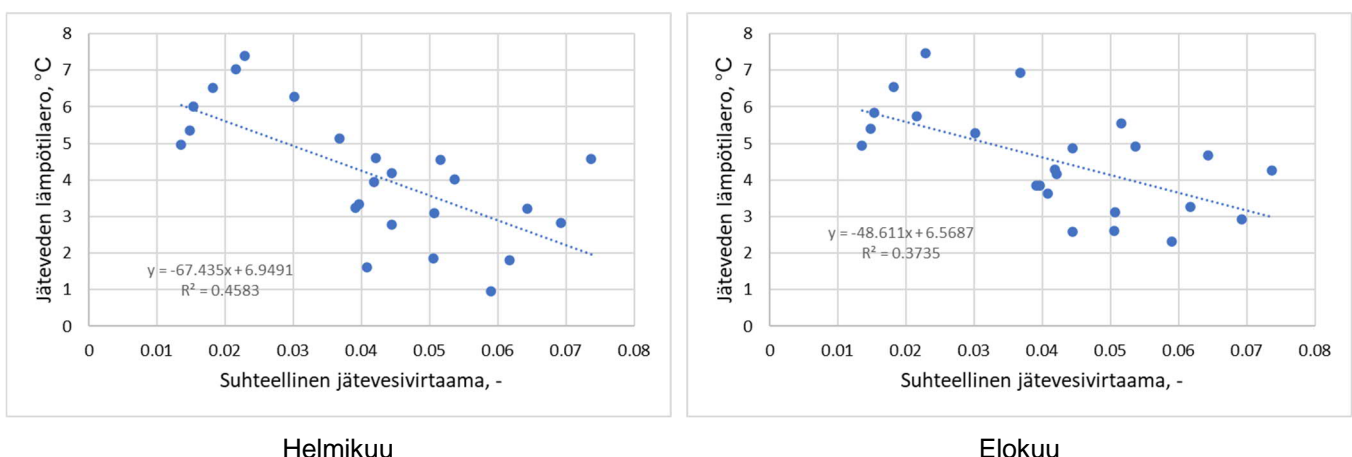
6.3 Jäähtyminen rakennuksen viemäriverkostossa

Aiemmin, kappaleessa 5, esitettiin mittausten perusteella määritetty jäteveden jäähtymä rakennuksessa ulkolämpötilaan perustuvalla sovitteella, joka perustui suoraan mittauksiin. Verrattaessa kehitetyn laskentamallin antamia jäteveden lämpötiloja, joita korjattiin em. ulkolämpötilasovitteella, mitattuihin lämpötiloihin (kuva 30) havaittiin, että tarvitaan lisäkorjauksia.



Kuva 30. Laskettu jäteveden lämpötilä ja mitattu lämpötilä helmikuun keskimääräisen päivän aikana.

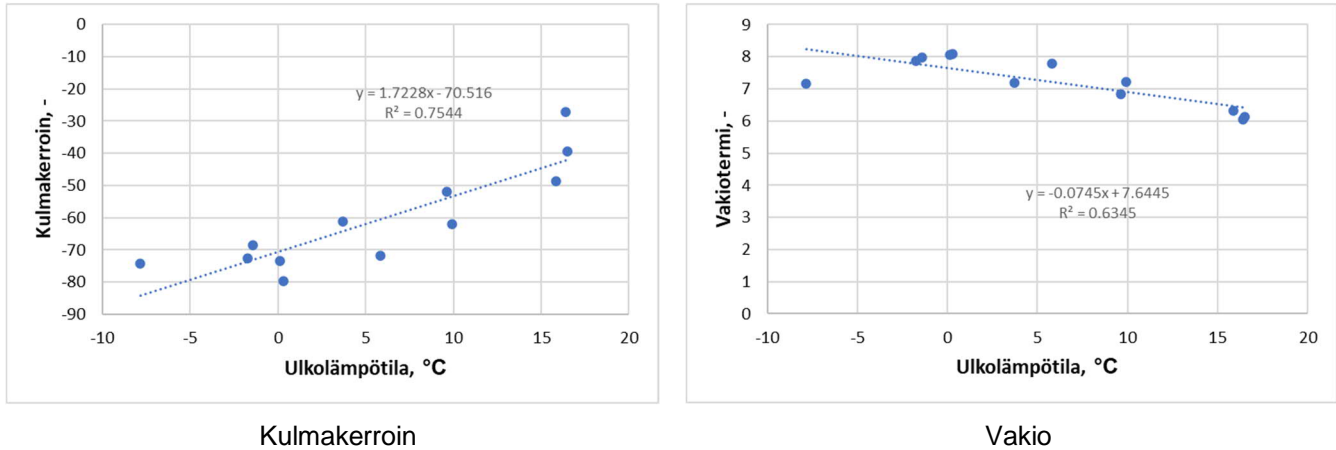
Kuvassa 30 esitetty laskettu jäteveden lämpötilä on vesikalusteiden lämpötilojen virtaamasuhteilla painotettu sekoituslämpötilä, jossa on otettu huomioon suihkun lisäjäähtymä kaavalla 6 sekä ulkolämpötilasovitteiden mukainen jäähtymä kappaleen 5 mukaisesti. Mitattu lämpötilä viittaa Tampereen Pohjolankadun mittauksiin. Tuloksesta nähdään, että mitattu jäteveden lämpötilä on selvästi viileämpää kuin laskettu ja lisäksi lämpötilaero vaihtelee vuorokauden ajan mukaan: aamuyöllä suurempi ja päivällä pienempi. Vuorokausivaihtelun ajateltiin johtuvan jäteveden virtaamasta, joka on yöllä selvästi pienempi kuin päivällä. Lisäksi tarkasteltaessa ilmiötä kuukausittain havaittiin, että lämpötilaero on edelleen ulkolämpötilasta riippuva, vaikka siihen tehtiin jo mittauksiin perustuva ulkolämpötilakorjaus. Laskentaa pyrittiin tarkentamaan lisäkorjauksilla, jossa otetaan huomioon tunnitainen virtaama ja toisaalta toiseen kertaan ulkolämpötila. Kuvassa 31 on esitetty esimerkkinä lasketun ja mitatun jäteveden lämpötilojen erotuksia sekä niihin tehdyt sovitteet virtaaman funktiona kahden kuukauden osalta.



Kuva 31. Lasketun jäteveden lämpötilan ja mitatun lämpötilan ero jäteveden suhteellisen virtaaman funktiona helmikuussa (vasemmalla) ja elokuussa (oikealla) arkipäivinä.

Kuvassa 31 esitetyistä sovitteista nähdään, että virtaamalla on selkeä yhteys lämpötilaeroon, joskin hajontaakin esiintyy. Hajontaan vaikuttavana yhtenä tekijänä on, että jäteveden suhteellisen virtaaman arvoina jouduttiin käyttämään laskettuja arvoja, koska mitattuja virtaamia ei ollut saatavilla.

Analysoitaessa kuukausittaisia sovitteita (kuva 31) havaittiin, että jäteveden suhteellisen massavirran funktiona tehdyt sovitteet, tarkemmin sovitesuoran kulmakertoimet ja vakiot, vaihtelivat kuukausittain eli ulkolämpötilasta riippuen. Tämän havainnon perusteella tehtiin jäteveden lämpötilan laskennan suoraviivaistamiseksi sovitteet kulmakertoimelle ja vakiolle ulkolämpötilan funktiona, kuva 32.



Kuva 32. Jäteveden suhteellisen virtaaman sovitteiden kulmakertoimen (vasemmalla) ja vakion (oikealla) ulkolämpötilariippuvuus arkipäiville.

Edellä esitetyt jäähtymän sovitteet voidaan yhdistää samaan kaavaan, jolloin vältetään useamman erillisen korjauksen tekemiseltä. Yhdistämällä kaikki sovitteet, myös kappaleessa 5 esitetty mittauksiin perustuva ulkolämpötilakorjaus, saadaan kuukauden keskimääräisen päivän tunnittainen jäähtymä laskettua arkipäiville kaavasta (7) ja viikonloppulle kaavasta (8).

$$\Delta T_{r,arke} = (1.72 * T_u - 70.5) * q_{arke}^* - 0.274 * T_u + 11.2 \quad (7)$$

$$\Delta T_{r,pyhä} = (2.80 * T_u - 121.0) * q_{pyhä}^* - 0.285 * T_u + 12.9 \quad (8)$$

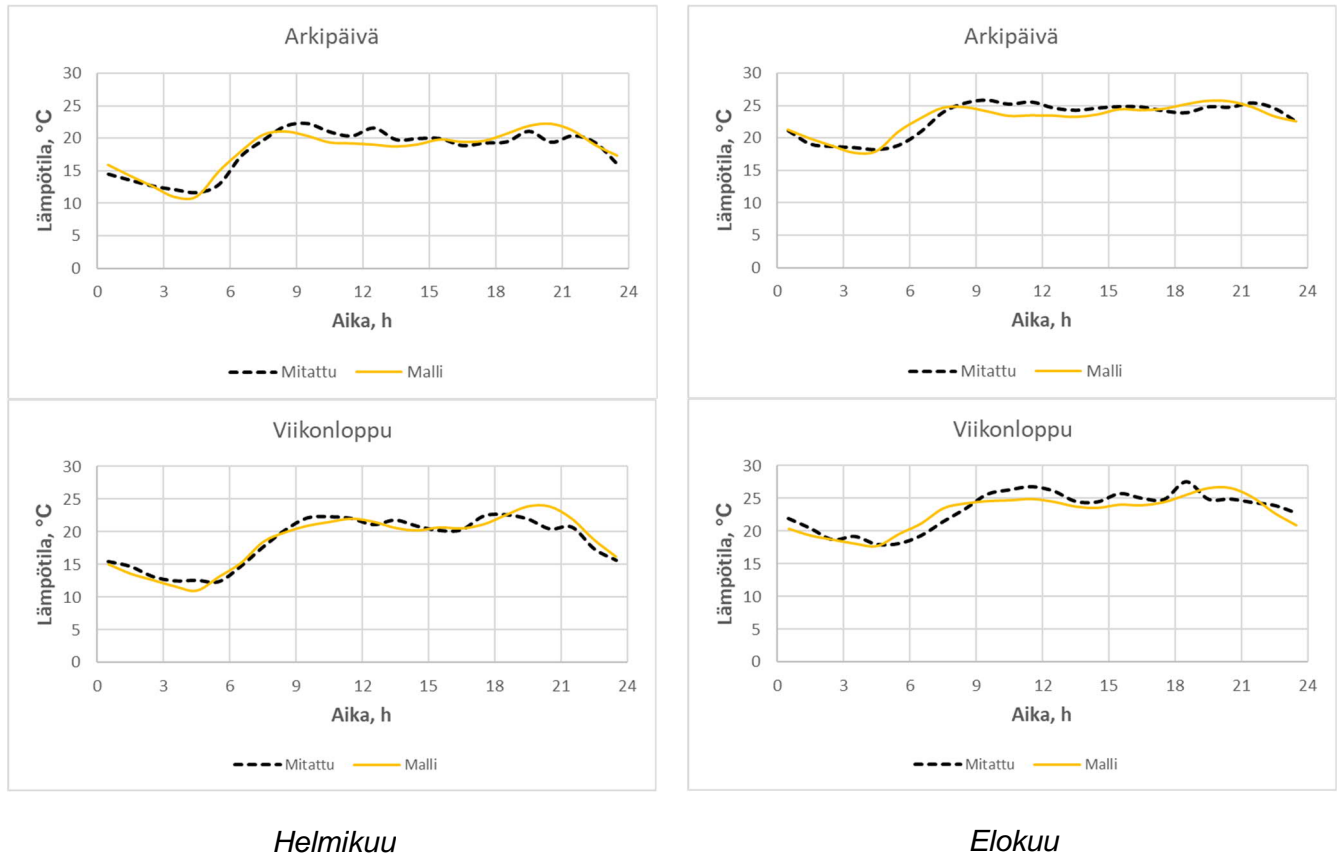
kaavoissa

- $\Delta T_{r,arke}$ on jäteveden jäähtymä rakennuksessa tarkasteltavalla tunnilla arkipäivisin, °C
- $\Delta T_{r,pyhä}$ on jäteveden jäähtymä rakennuksessa tarkasteltavalla tunnilla viikonloppuisin, °C
- T_u on kuukauden keskimääräinen ulkolämpötila, °C
- q_{arke}^* on jäteveden suhteellinen virtaama tarkasteltavalla tunnilla arkipäivisin, -
- $q_{pyhä}^*$ on jäteveden suhteellinen virtaama tarkasteltavalla tunnilla viikonloppuisin, -

6.4 Tuottomallin validointi

Kehitettyä tuottomallia validoitiin vertaamalla kehitettyä jäähtymämallia Tampereella Pohjolankatu 18 - 20 sijaitsevan 1970-luvulla rakennetun kerrostalon mitattuihin jäteveden lämpötiloihin. Lisäksi mallin antamia tuloksia verrattiin tämän hankkeen toisessa työpaketissa Turun viemäriverkostossa tehtyihin lämpötilamittauksiin, jotka on raportoitu tämän saman tutkimushankkeen toisessa osakokonaisuudessa tehdyssä diplomityössä (Pitkänen, 2022).

Jäähtymämallin antamia tuloksia verrattiin Tampereen kohteen mitattuihin jäteveden lämpötiloihin, kuva 33.



Kuva 33. Jäähtymämallin vertailua mitattuun jäteveden lämpötilaan (Tampere, Pohjolankatu 18 - 20) kahdelta kuukaudesta (vasemmalla helmikuu ja oikealla elokuu) sekä arki- että viikonloppupäivinä.

Jäähtymämalli ennustaa rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötilan kohtuullisesti, ja erityisesti ulkoilman lämpötilasta johtuva jäteveden lämpötilatason arviointi onnistuu mallilla hyvin, kuva 33. Helmikuussa rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötila on huomattavasti viileämpää kuin elokuussa. Lämpötilaero korostuu erityisesti aamuyön tunteina.

Jäteveden jäähtymä on määritelty niin, että tuottomallin mukaisilla sekoituslämpötiloilla ja suhteellisilla jätevesivirtaamilla saataisiin laskettua mahdollisimman realistinen, Tampereen Pohjolankatu 18 - 20 kohteessa mitattua lämpötilaa vastaava, rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötila. Jäähtymän laskentakaavat on määritetty kuukausilaskentaa varten, kuvaamaan kuukauden keskimääräisen vuorokauden tunnittaista jäähtymäprofiilia. Tampereen kohteesta on tiedossa vain jäteveden lämpötila, ei siis tuntikohtaista virtaamaa, joka aiheuttaa epävarmuutta malliin. Automaatiojärjestelmään on liitetty vesimittari, mutta se rekisteröi vain vuorokausikulutuksia.

Aiemmissa tutkimuksissa (Sitzenfrei, Hillebrand and Rauch, 2017) ja (Wärff, 2020) on rakennuksessa tapahtuva jäteveden jäähtymisen laskettu samalla kaavalla kuin suihkun jäähtymä, kaava (6). Kaava (6) soveltuu kuitenkin erittäin huonosti kuvaamaan jäteveden jäähtymistä rakennuksen sisäisessä viemäriverkostossa, joka on ulkoilmaan tuulettuva. Tässä tutkimuksessa onkin käytetty jäteveden jäähtymälle aiemmin kuvattua, mittauksiin perustuvaa sovitetta, joka ottaa huomioon paitsi jäteveden lämpötilan, niin myös ulkolämpötilan ja jäteveden virtaaman.

7. Jäteveden lämmöntalteenoton skenaariotarkastelut

Skenaariotarkastelujen tavoitteena oli selvittää kuinka paljon rakennuksissa tapahtuva lämmöntalteenotto vaikuttaa puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaan ja toisaalta arvioida rakennusten jäteveden lämmöntalteenottopotentiaalia verrattuna puhdistetusta jätevedestä lämpöä talteenottavien keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntuotannon vähenemiseen. Jäteveden verkostossa tapahtuvan jäähtymän skenaariotarkasteluissa tutkittiin jäteveden käyttäytymistä erilaisilla rakennuksissa tapahtuvilla jäteveden lämmöntalteenottoratkaisuilla sekä erilaisilla oletetuilla lämmöntalteenoton yleisyyssasteilla eli penetraatioilla.

Tarkastelut suoritettiin kahden eri työpaketin yhteistyönä, jossa Fluidit Oy vastasi kaupunkien maahan kaivettujen viemäriverkkojen lämpö- ja virtausteknisestä mallintamisesta ja VTT rakennusten viemäriverkkojen tarkasteluista lämmöntalteenottoineen.

7.1 Mallinnetut viemäriverkostot

Tutkimuksessa analysoitiin kahta eri viemäriverkostoa: Turun Kakolanmäen puhdistamon aluetta ja HSY:n Viikinmäen puhdistamon aluetta. Alueet valikoituvat sillä perusteella, että Fluiditilla oli näistä alueista valmiit topologiakuvakset mallissaan.

7.1.1 Turun viemäriverkoston malli

Turun viemäriverkoston malli käsittää keskusta-alueen tarkan kuvauksen, kuva 34. Mallinnetun alueen asukasmäärä on 285876, jota käytettiin kiinteistökohtaisissa tarkasteluissa. Asukasmäärän arvio perustuu laskutettuun vedenkulutukseen ja oletukseen, että yhden henkilön kulutus on 121 litraa vettä vuorokaudessa. Mallin ulkopuolelle jää Kaarinan, Raision ja Ruskon alueet, joiden osuus puhdistamolle tulevasta kokonaisvirtaamasta on suuruusluokaltaan 30 % Kakolanmäen puhdistamolle tulevasta kokonaisjätevesivirrasta. Erot eri kuukausien välillä johtuvat mallin sisältämien vuotovesien vaihtelusta, jotka siis sisältyvät mallinnukseen. Sen sijaan sade- ja sulamisvesistä tulevia hulevesiä ei ole mallinnettu.



Kuva 34. Turun viemäriverkoston mallin runkoputkistoa, mallin kattaman alueen asukasmäärä on 285876. Ulkopuolisten, vakiolämpötilaisten, malliin liittyvien virtaamien kohdat merkitty punaisella pisteellä (kuva: Fluidit Oy).

Mallin ulkopuoliset virtaamat yhdistyvät mallinnetun alueen virtaamaan verraten lähellä jäteveden puhdistamoa eli ne ovat pitkälti erillään toisistaan. Ulkopuoliset virtaamat sisältyvät mallinnettuun puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötaseeseen ja siten myös jatkossa esitettäviin yksinkertaistettuihin jäähtymämalleihin. Fluiditin tekemissä simuloinneissa ulkopuolisten virtaamien lämpötila on kiinnitetty maan lämpötilaan, siten että kulloisenkin kuukauden maan lämpötilaan on lisätty vakiolämpötila +1 °C.

Mallinnetun alueen rakennustyyppien osuuksien arviointi tehtiin lasketun käyttövesivirtauksen perusteella, joka on Fluiditin verkostomallin parametritieto (taulukko 13).

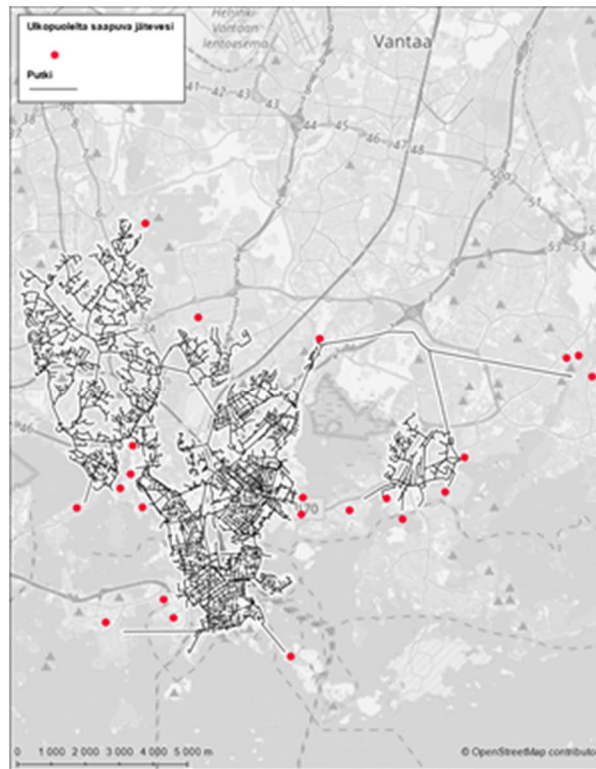
Taulukko 13. Turun mallinnetun verkoston kulutusasteiden lukumäärä lasketun käyttövesivirtauksen mukaan jaoteltuna (Fluiditin mallista).

Käyttövesivirta, m ³ /d	Lukumäärä, kpl
< 0.3	5287
0.3 - 0.5	4194
0.5 - 1	1709
1 - 2	641
2 - 5	876
5 - 10	770
10 - 20	590
> 20	263

Omakotitaloiksi arvioitiin kaikki laskutusasteet, joiden virtaama on alle 1 m³/d, rivitaloiksi virtaamaltaan 2 – 5 m³/d olevat kohteet ja kerrostaloiksi kaikki muut. Näillä oletuksilla Turun mallinnetun alueen rakennusten jakaumaksi saatiin: omakotitaloja 15 %, rivitaloja 15 % ja kerrostaloja 70 %.

7.1.2 HSY:n viemäriverkon malli

HSY:n mallinnettu viemäriverkoston osa on esitetty kuvassa 35. Mallin kattaman alueen asukasmäärä on 540496. Asukasmäärän arvio perustuu mallinnetun alueen laskutettuun vedenkulutukseen ja oletukseen, että yksi henkilö kuluttaa on 121 litraa vettä vuorokaudessa. Mallin ulkopuolelle jää varsin merkittävä osa Viikinmäen puhdistamolle tulevasta jäteveden kokonaisvirtaamasta. Mallin ulkopuoliset virtaamat tulevat Tuusulan suunnasta kallioon louhitusta viemäritunnelista, ja niiden osuus kaikesta Viikinmäen puhdistamolle tulevasta jätevedestä on suuruusluokaltaan 35 %. Lisäksi mallin lämpötaseessa mukana olevat, mutta vakiolämpötilassa siihen liitetyt virtaamat muodostavat suuruusluokaltaan 15 % osuuden puhdistamolle tulevasta kokonaisvirtaamasta. Näin ollen rakennusten lämmöntalteenottotarkasteluissa on mukana noin 50 % osuus Viikinmäen puhdistamolle tulevasta kokonaisvirtaamasta. Mallinnettu viemäriverkosto sisältää verkoston vuotovirtaamat, mutta ei hulevesiä. Vuotovirtaamat vaihtelevat kuukausittain ja ne vaikuttavat keskitetyn lämpöpumpun lämmöntalteenottopotentiaaliin.



Kuva 35. HSY:n viemäriverkoston mallin runkoputkistoa, mallin kattaman alueen asukasmäärä on 540496. Mallinnettuun verkosto-osaan tulee punaisten pisteiden kohdalla niiden lähiympäristöstä viemäriveresiä, joita ei ole tarkemmin mallinnettu. Kuvassa ei näy Tuusulan suunnasta tulevaa viemäriinjaa, jota ei ole mallinnettu (kuva: Fluidit Oy).

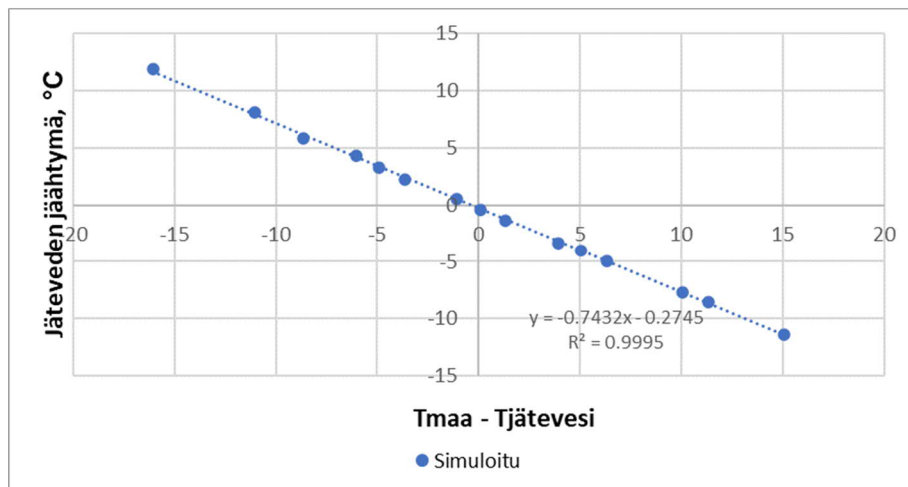
Kuten Turun mallinnuksessakin, myös HSY:n alueella tehtiin rakennustyyppien arviointi laskutus pisteiden virtaaman perusteella: omakotitalojen virtaama alle 1 m³/d, rivitalojen virtaama 2 – 5 m³/d ja kaikki muut kerrostaloja (taulukko 14). Näillä oletuksilla HSY:n mallinnetun alueen rakennusten jakaumaksi saatiin: omakotitaloja 4 %, rivitaloja 8 % ja kerrostaloja 88 %.

Taulukko 14. HSY:n mallinnetun verkoston kulutus pisteiden lukumäärä lasketun käyttövesivirtaaman mukaan jaoteltuna.

Käyttövesivirta, m ³ /d	Lukumäärä, kpl
< 0.3	6424
0.3 - 0.5	200
0.5 – 1	431
1 – 2	546
2 – 5	868
5 – 10	1092
10 – 20	1149
> 20	931

7.2 Jäteveden jäähtymämalli maahan kaivetussa verkostossa

Jäteveden jäähtymisestä viemäriverkostossa tehtiin Fluiditin tekemien yksityiskohtaisten simulointien perusteella yksinkertaistettu sovitemalli, jossa puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilan jäähtymä rakennukselta puhdistamolle lasketaan kuukausitasolla rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötilan ja maan lämpötilan perusteella. Yksinkertaistettu jäähtymämalli perustuu verkostosimulaattorilla (Pitkänen, 2022) laskettuun jäteveden jäähtymään maahan kaivetussa kunnallisessa viemäriverkostossa. Simulaattorilla verkostossa tapahtuvaa jäähtymää tarkasteltiin kolmen eri kuukauden tilanteissa, viidellä rakennukselta lähtevällä jäteveden eri lämpötilatasolla (20 °C, 16 °C, 12 °C, 8 °C ja 4 °C). Tarkasteltavat kuukaudet olivat maaliskuu, kesäkuu ja syyskuu. Maaliskuussa maan lämpötila on kylmimmillään ja syyskuussa lämpimimmillään, kesäkuu edustaa välikuukautta. Jäteveden jäähtymän yksinkertaistettu malli on simulointitulosten perusteella tehty sovite maan lämpötilan ja rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötilan erotuksen funktiona. Simulointien tulokset ja sovite Turun tapaukselle on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. Jäteveden jäähtymä maahan kaivetussa Turun jätevesiverkostossa simulointien perusteella.

Jäteveden jäähtymä määritellään rakennukselta lähtevän jäteveden ja puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilojen erotuksena, kaava (9).

$$\Delta T_{jv,v} = T_{jv,r} - T_{jv,p} \quad (9)$$

jossa

$\Delta T_{jv,v}$ on jäteveden jäähtymä jätevesiverkostossa, °C
 $T_{jv,r}$ on rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila, °C
 $T_{jv,p}$ on puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötila, °C

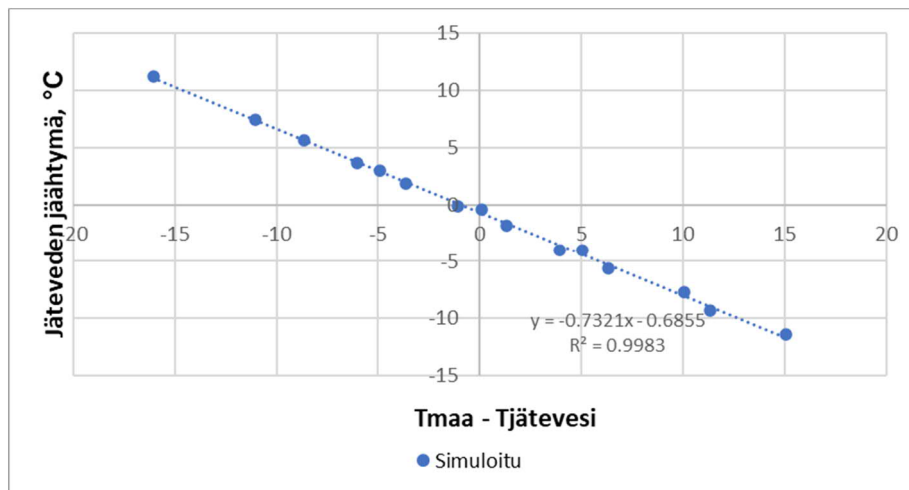
Turun tapauksessa jäteveden jäähtymä kunnallisessa jätevesiverkostossa on simulointien perusteella hyvin lineaarista, kuten kuvasta 36 ilmenee. Jäähtymän lineaarinen sovite on esitetty kaavassa (10).

$$\Delta T_{jv,v} = -0.743 * (T_m - T_{jv,r}) - 0.275 \quad (10)$$

jossa

$\Delta T_{jv,v}$ on jäteveden jäähtymä Turun jätevesiverkostossa, °C
 T_m on maan lämpötila, °C
 $T_{jv,r}$ on rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila, °C

HSY:n Viikinmäen puhdistamon alueella jäteveden verkostossa tapahtuvan jäähtymän, rakennukselta puhdistamolle, simulointitulosten perusteella määritetty sovite on esitetty kuvassa 37 ja jäähtymän laskenta kaavalla (11).



Kuva 37. Jäteveden jäähtymä maahan kaivetussa HSY:n Viikinmäen puhdistamoalueen jätevesiverkostossa simulointien perusteella.

HSY:n tapauksessa jäteveden jäähtymä kunnallisessa jätevesiverkostossa on simulointien perusteella lähes yhtä lineaarista kuin Turun tapauksessa, kuten kuvasta 37 ilmenee.

$$\Delta T_{jv,v} = -0.732 * (T_m - T_{jv,r}) - 0.686 \quad (11)$$

jossa

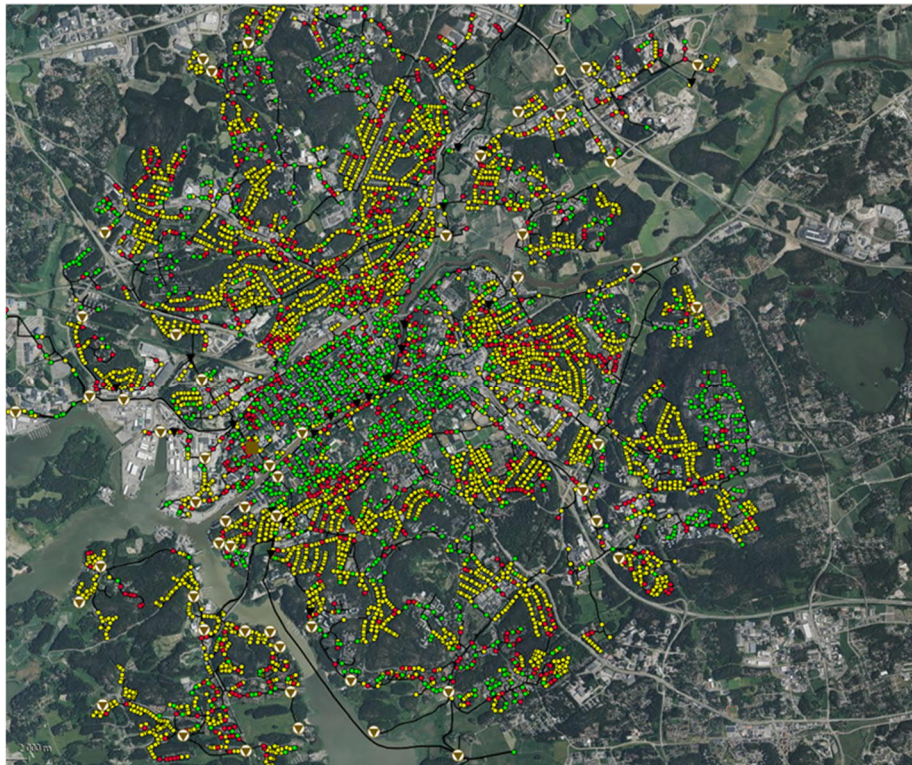
$\Delta T_{jv,v}$ on jäteveden jäähtymä HSY:n Viikin puhdistamoalueen jätevesiverkostossa, °C

T_m on maan lämpötila, °C
 $T_{jv,r}$ on rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila, °C

Jäähtymä on negatiivinen, kun maan lämpötila on korkeampi kuin rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila eli jätevesi lämpiää maahan kaivetussa verkostossa. Näin on erityisesti syksyllä, kun maan lämpötila on korkea, mutta rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila laskee ulkolämpötilan vaikutuksesta. Tämä ilmiö voimistuu, kun rakennuksilla otetaan jätevedestä lämpöä talteen ja jäteveden lämpötila laskee.

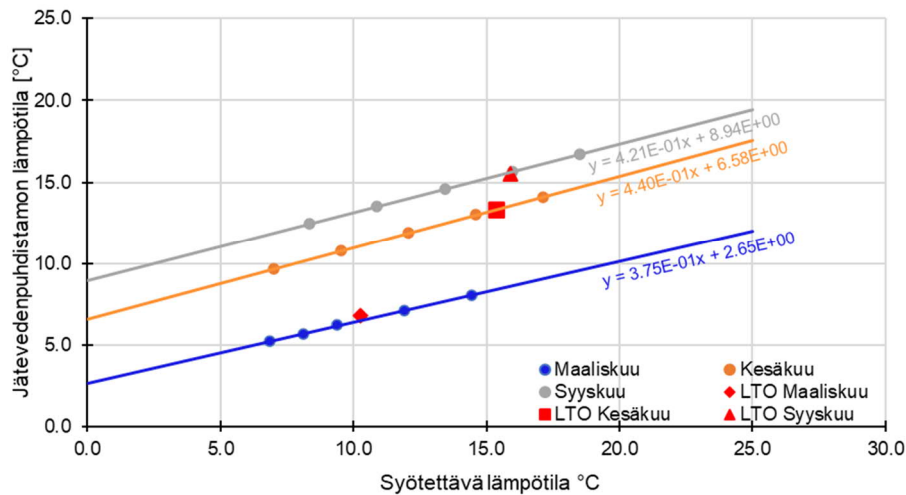
7.3 Jäähtymämallin validointia

Edellä esitetty yksinkertainen puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan sovitemalli määritettiin simuloinneista, joissa rakennuksilta lähtevän jäteveden lämpötilaa muutettiin portaittain tasaisesti kaikilta rakennuksilta. Lämmöntalteenottoskenaarioissa käytetään kuitenkin erilaisia rakennuksilta lähteviä jäteveden lämpötiloja riippuen rakennustyyppistä ja lämmöntalteenottotekniikasta. Koska pientalot sijaitsevat keskimäärin kauempana puhdistamosta kuin kerrostalot (kuva 38), haluttiin mallin toimivuus validoida tätä realistista tilannetta vasten. Validointilaskennassa pientaloille (omakoti- ja rivitalot) syötettiin lämpötilaprofiili, joka vastasi tilannetta, jossa 50 % näistä rakennuksista oli varustettu suihkuun asennetuilla lämmöntalteenottolaitteilla ja vastaavasti kerrostaloille annettiin lämpötilaprofiili, joka vastaa tilannetta, jossa 50 % kerrostaloista olisi varustettu lämpöpumpuilla (skenaariotarkastelussa vastaa skenaariota 3).



Kuva 38. Rakennustyyppien jakautuminen Turussa, kerrostalot vihreällä, rivitalot punaisella ja omakotitalot keltaisella (kuva: Fluidit Oy).

Validointilaskennan tuloksia on esitetty kuvassa 39 (Pitkänen, 2022).



Kuva 39. Fluiditin verkostomallilla lasketut Turun alueen jäteveden lämpötilat verkostoon syötetyn lämpötilan funktiona kolmena eri kuukautena (Pitkänen, 2022). Tarkemmin lasketut tapaukset merkitty kuvaan pisteinä LTO Maaliskuu, LTO Kesäkuu ja LTO Syyskuu.

Tuloksista (kuva 39) voidaan todeta, että tarkemmin lasketut tapaukset asettuvat verraten hyvin karkeammin laskettujen tapausten sovitesuorille ja näin ollen voitiin todeta karkeamman mallinnuksen antavan riittävän tarkkoja tuloksia ja niitä käytettiin jatkossa jäähdytysmallin pohjana.

7.4 Rakennusten lämmöntalteenottoskenaariot

Rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötilan määrittämiseksi käytettiin kahta eri lämmöntalteenotto-ratkaisua: 1) suihkuun asennettava lämmöntalteenotto-laite, jonka lämpötilahyötysuhteena käytettiin $\epsilon = 0.6$ ja 2) lämpöpumppu, jonka jäteveden minimilämpötilana lämmöntalteenoton jälkeen käytettiin $+4$ °C:ta ja lämpökertoimena arvoa 3. Suihkuun lämmöntalteenottoon päädyttiin siksi, että sen ajateltiin edustavan pientaloihin todennäköisimmin asennettavaa ratkaisua ja lämpöpumppuun, koska sillä jätevettä voidaan jäähdyttää haluttuun minimilämpötilaan ja se edustaa siten jäteveden jäähdytyksen ääripäätä. Lämpöpumppujen todennäköisimpänä käyttökohteena ovat kerrostalot. Lämpöpumpulta lähtevän viemäriveden lämpötilaa rajoitettiin kesällä vastaamaan käyttöveden lämmittämiseen ja kiertojohton lämpöhäviöiden kattamiseen kuluvaan jätevedestä otettavaan energiaan. Lämpötilan rajoittamista tehtiin myös parina välikuukautena (toukokuu ja syyskuu), jolloin jätevedestä saatavilla oleva lämmitysenergia oli suurempi kuin arvioitu tarve (käyttövesi + tilojen lämmitys). Lämmitystarpeen arvioinnissa käytettiin aiemmin tässä raportissa esitettyjä kaukolämpödata-analyyseistä saatuja tuloksia.

Todennäköisimmiksi jäteveden lämmöntalteenottoratkaisuiksi arvioitiin pientaloissa suihkuun asennettavat lämmön talteenottolaitteet ja kerrostaloissa lämpöpumppuratkaisut. Tarkasteltavat skenaariot valittiin seuraavasti:

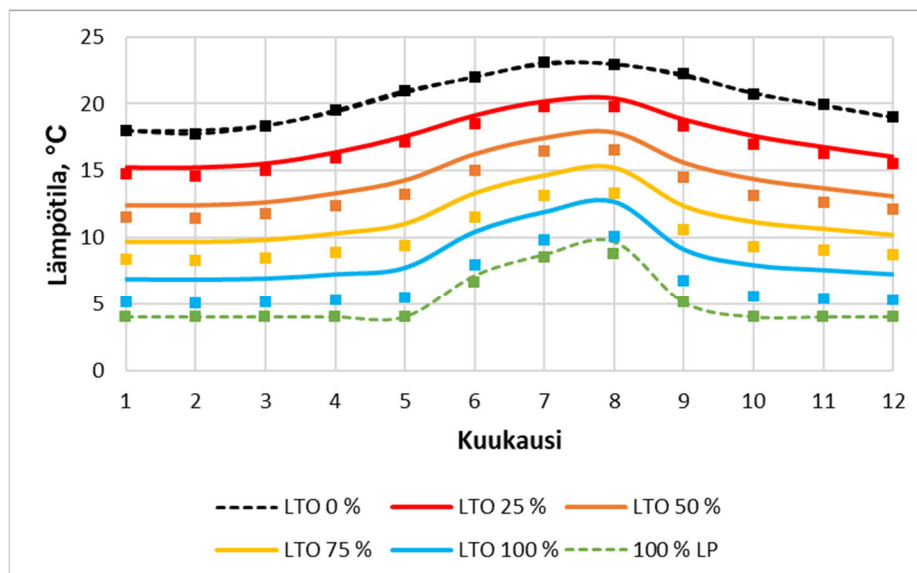
- 1) vertailutapaus ilman lämmöntalteenottoa (LTO 0 %),
- 2) 25 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenottoilla ja 25 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 25 %),
- 3) 50 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenottoilla ja 50 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 50 %),
- 4) 75 % kaupungin pientaloista (omakoti- ja rivitalot) varustettiin suihkuihin asennetuilla lämmöntalteenottoilla ja 75 % kerrostaloista lämpöpumpulla (LTO 75 %),
- 5) kaikkiin pientalot varustettiin suihkujen lämmöntalteenotolla ja kaikki kerrostalot lämpöpumpulla (LTO 100 %).
- 6) kaikki talot varustettu lämpöpumpulla (100 % LP).

Rakennukselta lähtevän jäteveden lämpötila laskettiin kuukausittain tarkasteltujen kaupunkien pientalojen ja kerrostalojen suhteen painotettuna keskiarvona. Tarkastelussa on sisäänrakennettuna oletus, että lämmöntalteenottoratkaisut ovat jakautuneet tasaisesti ympäri viemäriverkostoa.

7.5 LTO-skenaarioiden lämpötilavaikutukset (Turku ja HSY)

Seuraavassa on esitetty laskennan tulokset sekä Turun, että HSY:n alueille. Turulle onnistuttiin laskemaan tulokset kuukausittain, mutta HSY:n alueelle vain kolmelta kuukaudelta (maaliskuu, kesäkuu ja syyskuu). HSY:n tarkastelua rajoitti Fluiditin mallin sisältämän jäteveden virtaamatiedon rajoittuminen em. kuukausiin. HSY:n tarkastelu ei myöskään sisällä kaikkia Viikinmäen puhdistamon jätevesivirtaamia, vaan kattaa ainoastaan runsaan 50 %:n osuuden kokonaisvirtaamasta. Tarkastelusta puuttuu kokonaan Tuusulan suunnasta tulevan jätevesitunnelin virtaama ja sen vaikutus puhdistamolle tulevaan jäteveden lämpötilaan, koska näiltä osin ei ollut saatavilla mittaustuloksia.

Turussa arvioitiin rakennustyyppien osuuden jakautuvan suhteissa: 15 % omakotitaloja, 15 % rivitaloja ja 70 % kerrostaloja. HSY:n alueella rakennustyyppit jakautuivat suhteissa: 4 % omakotitaloja, 8 % rivitaloja ja 88 % kerrostaloja. Näitä rakennustyyppien suhteita käytettiin laskettaessa rakennuksilta poistuvan jäteveden keskimääräisiä lämpötiloja eri skenaarioilla. Puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilat eri skenaarioilla määritettiin kaavasta (9) edellä mainitun rakennuksilta lähtevän jäteveden ja maan lämpötilojen perusteella. Kuukausitason laskennan tulokset on esitetty kuvassa 40 rakennuksilta lähtevälle jäteveden lämpötilalle, kuvassa 41 jäteveden lämpötilalle puhdistamolla ja kuvassa 42 on esitetty lämmöntalteenoton vaikutus puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaan. Kaikki tulokset on esitetty myös taulukkomuodossa liitteessä 1.

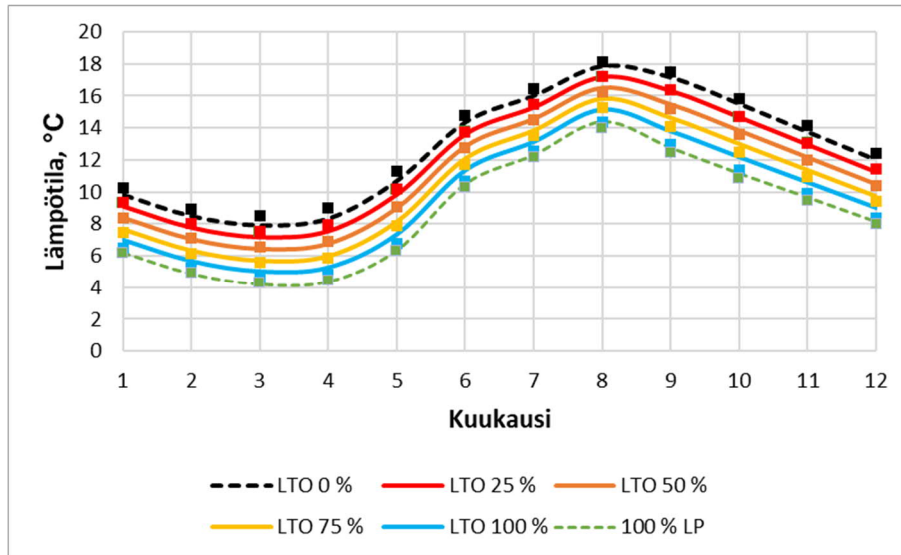


Kuva 40. Jäteveden lämpötilat rakennuksilta lähtiessä eri skenaarioilla. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Kuvasta 40 nähdään, että HSY:n alueella rakennuksilta lähtevät keskimääräiset jäteveden lämpötilat ovat hieman viileämpiä kuin Turun alueella. Tämä johtuu siitä, että HSY:n alueella on suhteellisesti enemmän kerrostaloja kuin pientaloja ja siten myös enemmän lämpöpumppuja, joilla jäteveden jäähtymä on suurempi kuin pientaloihin suihkuun asennettujen lämmönsiirtimien tapauksessa.

Rakennukselta lähtiessään jätevesi normaalisti jäähtyy viemäriverkostossa, koska jäteveden lämpötila rakennuksella on aina korkeampi kuin maan lämpötila. Rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton

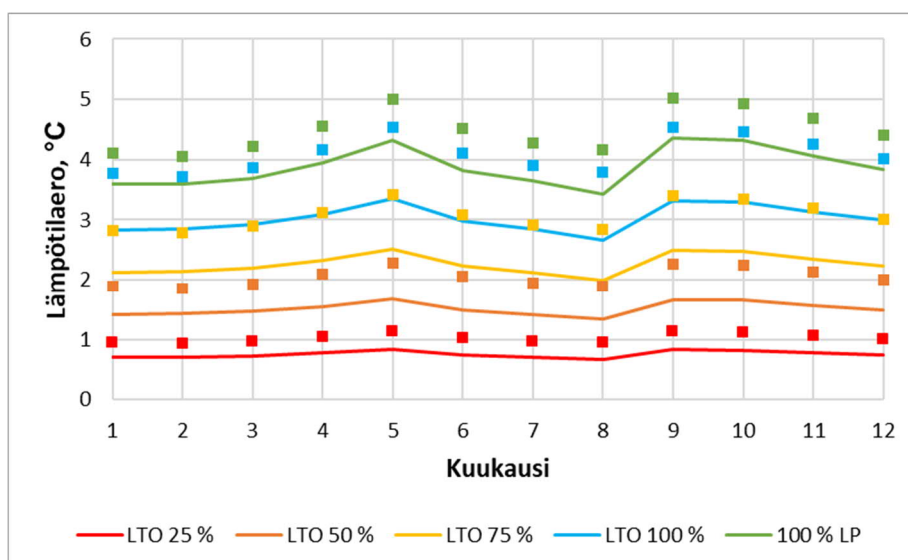
seurauksena jäteveden lämpötila voi olla myös maan lämpötilaa matalampi, jolloin jätevesi lämpiää. Kuvassa 41 on esitetty laskennallisia tuloksia puhdistamolle saapuvasta jäteveden lämpötilasta eri tilanteissa.



Kuva 41. Jäteveden lämpötilat puhdistamolla eri skenaarioilla. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Kuvassa 41 esitettävistä tuloksista nähdään, että maahan asennetussa viemäriverkostossa kulkiessaan jäteveden lämpötilaerot skenaarioiden välillä tasoittuvat verrattuna rakennuksilta lähteviin eroihin nähden (kuva 40).

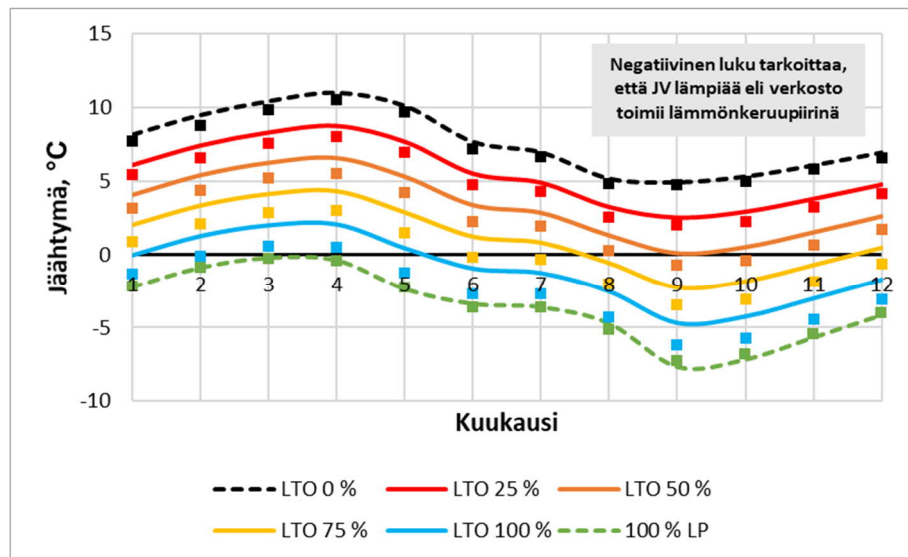
Puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilan muutoksia eri lämmöntalteenottoskenaarioilla verrattuna tilanteeseen ilman rakennuksilla tapahtuvaa lämmöntalteenottoa on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaero eri lämmöntalteenottoskenaarioilla verrattuna tilanteeseen, jossa rakennuskohtaista lämmöntalteenottoa ei ole. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Jäteveden puhdistamon toiminnan kannalta on kriittistä, missä lämpötilassa jätevesi tulee puhdistamolle. Puhdistustulos, ennen kaikkea typen poiston kannalta, on sitä huonompi mitä kylmempää jätevesi on. Lämpötilan vaikutusta puhdistustulokseen on tarkasteltu tämän hankekokonaisuuden toisessa osiossa, jonka tuloksia on raportoitu diplomityössä (Ahonen, 2021). Kuvassa 42 esitetään, kuinka paljon kylmempänä jätevesi tulee puhdistamolle eri lämmöntalteenottoskenaarioilla verrattuna tilanteeseen, jossa rakennuksilla ei oteta lämpöä talteen. Tuloksista nähdään, että pienimmillään vaikutus on suuruusluokaltaan 1 °C ja suurimmillaan 4 – 5 °C. Suurimmat vaikutukset nähdään, ehkä hieman yllättäen, loppukevästä ja alkusyksystä. Kesällä vaikutusta vaimentaa lämpöpumpujen lämmöntalteenoton rajoittaminen vastaamaan rakennusten lämmöntarvetta. Tuloksista nähdään myös, että HSY:n alueella lämpötilaerot ovat hieman suurempia, johon osavaikutuksensa on sillä, että jo rakennuksilta lähtevät lämpötilaerot ovat suurempia kuin Turun tarkastelussa.

Seuraavassa on tarkasteltu, kuinka jäteveden lämpötila muuttuu lähtiessään rakennukselta ja tullessaan puhdistamolle, eli on laskettu lämpötilaero näiden välillä, kuva 43.



Kuva 43. Jäteveden jäähtyminen tai lämpiäminen matkalla rakennuksilta jäteveden puhdistamolle. Jäteveden lämmitessä jäähtymä on negatiivinen. Turun laskelmat yhtenäisinä käyriä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Tuloksista nähdään, että mitä lämpoisempänä jätevesi rakennukselta lähtee, sitä enemmän se viemäriverkostossa jäähtyy. Suurimmillaan jäähtymä on kevättalvella, jolloin lämpötilaero jäteveden ja maan välillä on suurimmillaan. Viemäriverkosto ei normaalisti toimi lämmönkeruuputkistona eli jätevesi jäähtyy matkalla rakennuksilta puhdistamolle ja keskitetylle lämpöpumpulle. Kuitenkin tilanteissa, joissa rakennuksilla talteen otettu energiamäärä on riittävän suuri, lasketuilla skenaarioilla yli 50 %, nähdään, että jätevesi lämpiää ainakin osan aikaa vuodesta eli verkosto toimii myös lämmönkeruuverkostona, kuva 43. Suurimmillaan lämpiäminen on syksyllä, jolloin maan lämpötilaero jätevedeen on suurimmillaan.

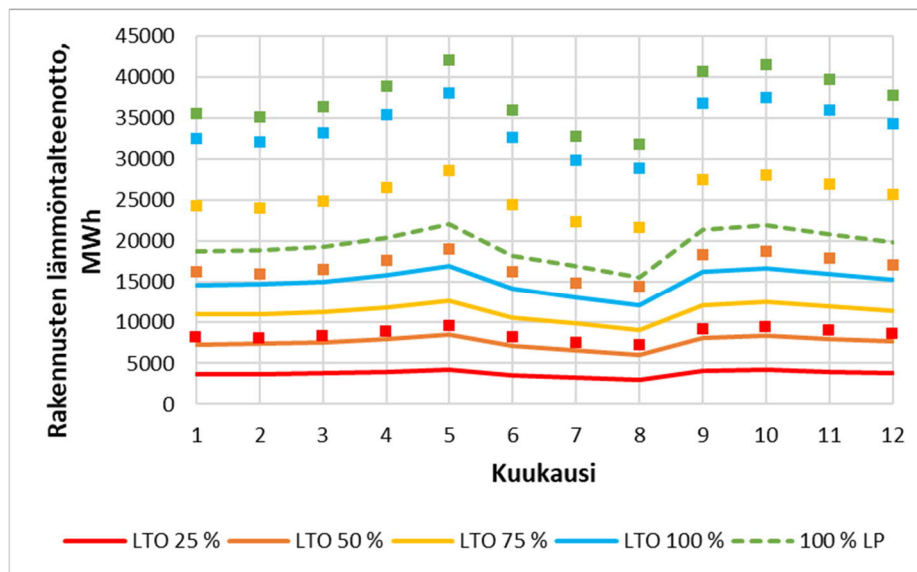
7.6 LTO-skenaarioiden energiavaikutukset (Turku ja HSY)

Rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vaikutuksia puhdistetusta jätevedestä lämpöenergiansa ottavien keskitettyjen lämpöpumpujen lämmöntalteenottopotentiaaliin arvioitiin teoreettisesti edellä laskettujen puhdistamolle tulevien lämpötilojen perusteella. Laskennassa oletettiin, että keskitetyillä lämpöpumpuilla puhdistettu jätevesi voidaan jäähdyttää kaikissa olosuhteissa +4 °C:een. Lisäksi lämpökerroin oletettiin vakioksi 3. Nämä oletusarvot ovat samat kuin rakennuskohtaisten lämpöpumpujenkin oletusarvot.

Keskitettyjen lämpöpumppujen ja rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vertailua hankaloittaa se, että sekä Turun että HSY:n tapauksessa ei pystytty mallintamaan puhdistamojen koko jätevesiverkostoa. Turun malli on kattavampi ja muutenkin selkeämpi kuin HSY:n tapaus. Turussa mallinnetun alueen ulkopuoliset virtaukset (Kaarina, Raisio ja Rusko) on sisällytetty Fluiditin jäähtymälaskelmiin ja laskelmat antavat luotettavamman tuloksen kuin HSY:n alueen laskelmat. HSY:n Viikinmäen kokonaisvirtaamasta on lämmöntalteenottolaskennassa mukana vain noin 50 %, Tuusulan suunnalta tulevan jätevesitunnelin virtaamat eivät ole millään tavoin mukana mallinnuksessa. Kummassakin tapauksessa osa jätevesivirtauksista on kiinnitetty vakio-lämpötilaisiksi, toki kuukausittain maan lämpötilan mukaan muuttuviksi. Turun tapauksessa Kaarinan, Raision ja Ruskon jätevesien lämpötilaksi on oletettu $T_{\text{maa}}+1$ °C liittyessään mallinnetun alueen verkostoon ja HSY:n alueella mallin ulkopuolelta tulevien virtaamien lämpötilaksi $T_{\text{maa}}+3$ °C. HSY:n malliin ulkopuolisia virtauksia tulee useista kohdista mallinnettua verkostoa, kuten aiemmin on kuvattu (kuva 35).

Sekä Turun että HSY:n tapauksessa rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vaikutuksia keskitetyn lämpöpumpun toimintaan arvioitiin mallinnettujen alueiden jätevesivirtaamilla. Näin ollen Turun tapauksessa laskennassa on mukana vajaat 70 % todellisesta puhdistamolle saapuvasta virtauksesta. HSY:n tapauksessa laskennassa on vajaat 50 % puhdistamolle todellisuudessa tulevasta jätevedestä. Lasketut energiat eivät siis vastaa todellista tilannetta ja tulokset antavat arvioita suhteellisella tasolla. Näin rakennusten ja toisaalta keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntalteenotot on saatu vertailukelpoisiksi.

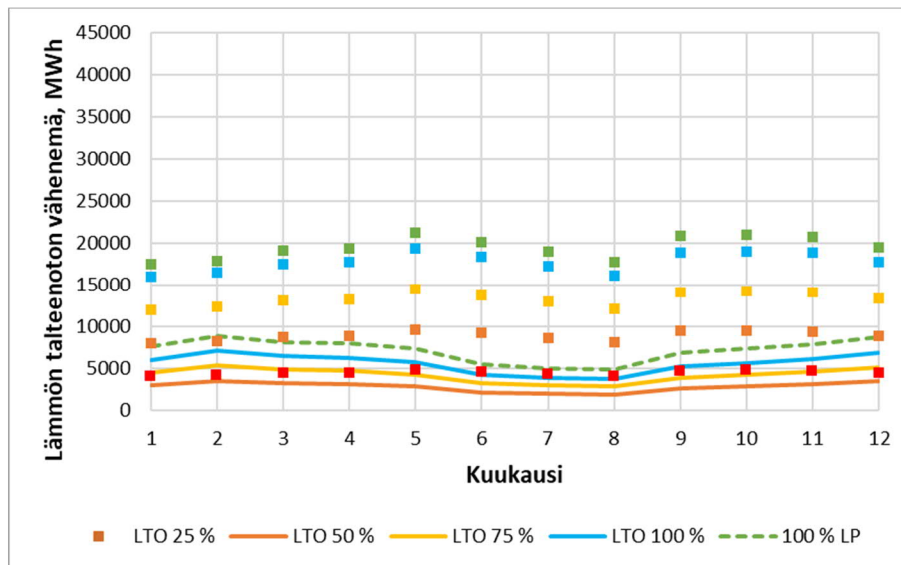
Kuvassa 44 esitetään mallinnettujen alueiden rakennuksilla jätevedestä talteen otettu energiamäärä eri skenaarioilla.



Kuva 44. Mallinnettujen alueiden rakennuksilla jätevedestä talteen otettu lämpöenergia. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Rakennuksilla talteenotetuissa kuukausittaisissa lämpöenergioissa (kuva 44) erottuu selvästi kesäkuukaudet, jolloin lämmöntalteenottoa rajoitetaan lämmöntarpeen mukaan. Kesällä jäteveden lämpöä käytetään vain käyttöveden lämmittämiseen ja kierto-äviöiden kattamiseen.

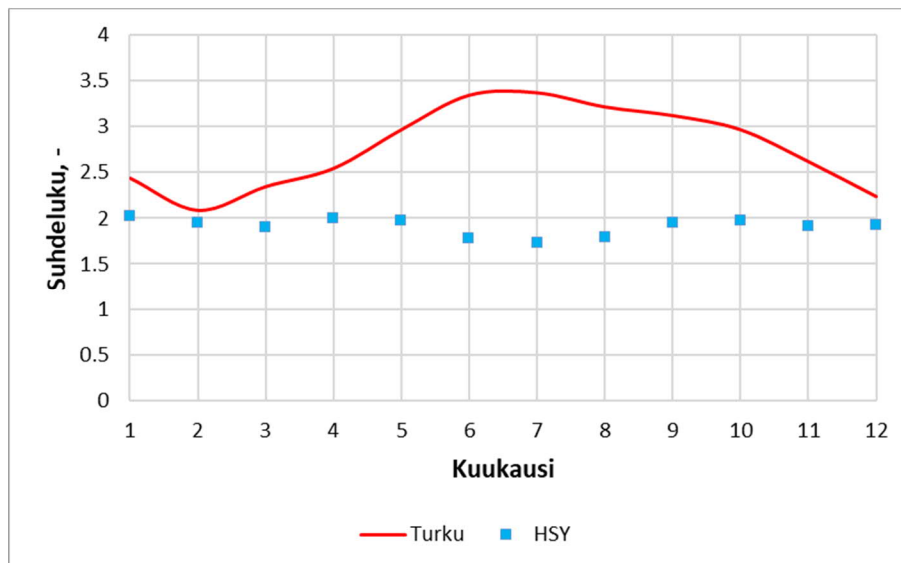
Kuvassa 45 on esitetty vastaavasti keskitetyn lämpöpumpun jätevedestä talteen otettavissa olevan lämpöenergian väheneminen. Kuvassa on käytetty samaa skaalaa kuin rakennusten lämmöntalteenoton kuvassa 44 vertailun helpottamiseksi.



Kuva 45. Mallinnettujen alueiden jätevesivirtaamalla lasketut keskitettyjen lämpöpumppujen lämpöenergian talteenottopotentialien vähenemiset johtuen rakennusten lämmöntalteenotosta. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Vertailtaessa rakennuksilla talteenotettavia lämpöenergioita (kuva 44) ja keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntalteenoton pienenemistä (kuva 45), havaitaan että, rakennusten lämmöntalteenotto on selvästi suurempi kuin keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntalteenoton pieneneminen.

Koska edellä esitetyt energiat (kuvat 44 ja 45) kuvaavat vain mallinnettujen alueiden energioita, eli eivät vastaa todellisia tilanteita kaupunkitasolla, laskettiin niistä suhdeluku, joka kuvaa paremmin todellista tilannetta. Suhdeluku on laskettu rakennuksilla talteen otetun ja keskitetyn lämpöpumpun lämmöntalteenottopotentialin vähenemisen osamääränä, kuva 46.

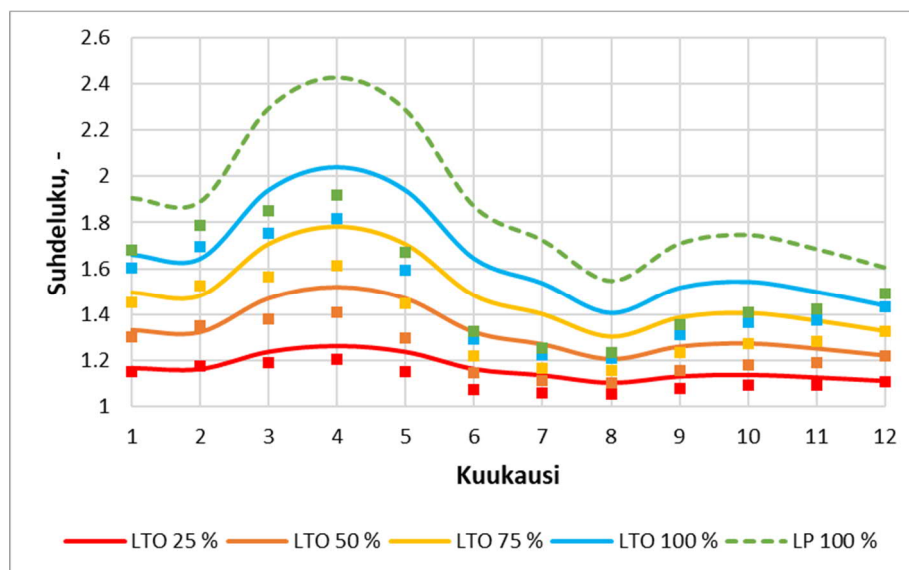


Kuva 46. Mallinnettujen alueiden rakennusten lämmöntalteenottopotentialien ja keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntalteenottopotentialien vähenemien osamäärä. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Rakennusten lämmöntalteenottopotentialien ja keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntalteenottopotentialien vähenemien suhdeluvut ovat yhtä suuria kaikilla rakennuksen lämmöntalteenottoskenaarioilla, mistä syystä skenaariot eivät erotu kuvassa 46.

Rakennusten jäteveden lämmöntalteenottopotentiali on Turun tapauksessa yli kaksinkertainen verrattuna keskitetyn lämpöpumpun lämmöntalteenottopotentialin vähenemään. HSY:n tapauksessa rakennusten lämmöntalteenottopotentiali suhteessa keskitetyn lämpöpumpun lämmöntalteenoton vähenemään on pienempi, kuitenkin yli puolitoistakertainen. HSY:n laskelmien erilainen käyttäytyminen verrattuna Turun tapaukseen (kuva 46) johtuu siitä, että HSY:n verkostossa on suuremmat vuotovirtaamat, joka kasvattaa keskitetyn lämpöpumpun lämmöntalteenottopotentialia erityisesti kesällä.

Seuraavassa on tarkasteltu kokonaislämmöntuotannon kasvua kaupunkitasolla, kun sekä rakennuksilla, että keskitetyllä lämpöpumpulla tuotetaan lämpöenergiaa jätevedestä. Kokonaislämmöntuotannossa on lämmöntalteenoton lisäksi mukana sekä rakennuksissa olevien että keskitettyjen lämpöpumppujen sähköenergia. Kuvassa 47 on esitetty rakennuksilla ja keskitetyllä lämpöpumpulla saatavissa olevan kokonaislämpöenergian suhde pelkästään keskitetyllä lämpöpumpulla saatavissa olevaan lämpöenergiaan. Tämä kuvaa jätevedestä saatavissa olevan kokonaisenergian kasvamista rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton ansiosta.

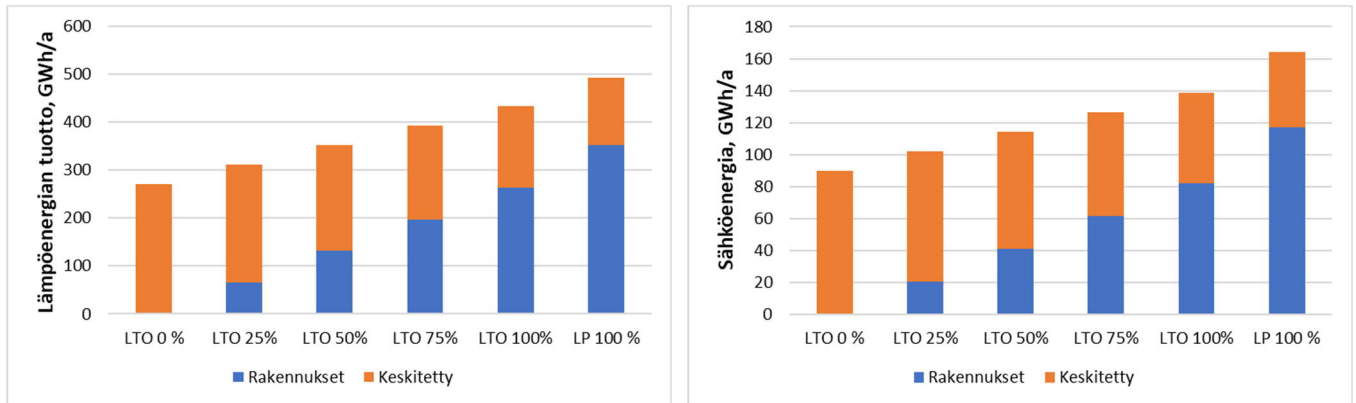


Kuva 47. Kokonaislämmöntuotannon (=rakennusten + keskitetyn lämpöpumpun tuotto) suhde pelkästään keskitetyn lämpöpumpun lämmöntuottoon kuukausitasolla. Turun laskelmat yhtenäisinä käyrinä ja HSY:n laskelmat pisteinä.

Kuvasta 47 havaitaan, että kokonaislämpöenergian tuotanto kasvaa erityisesti keväällä. Tämä johtuu siitä, että tuolloin maan lämpötila on matalimmillaan ja jätevesi ehtii jäähtyä ennen kuin se saavuttaa keskitetyn lämpöpumppulaitoksen. Kaikissa skenaarioissa tuotantojen suhdeluku on suurempi kuin yksi, joka tarkoittaa, että kaupunkitasolla rakennuksilla tapahtuva jäteveden lämmöntalteenotto lisää lämmityspotentialia verrattuna pelkän keskitetyn laitoksen tuotantopotentialiin.

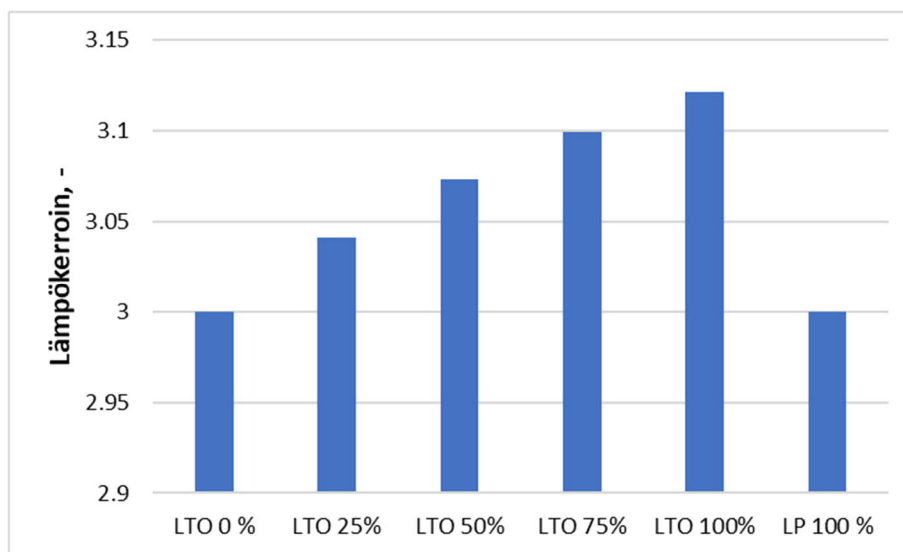
7.6.1 LTO:n vaikutukset vuositasolla, Turku

Seuraavassa on tarkasteltu rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vaikutuksia vuositasolla Turun tapauksessa.



Kuva 48. Lämpöenergian vuosituotanto ja vastaava lämpöpumppujen sähköenergian vuosikulutus eri skenaarioilla lasketulla alueella Turussa.

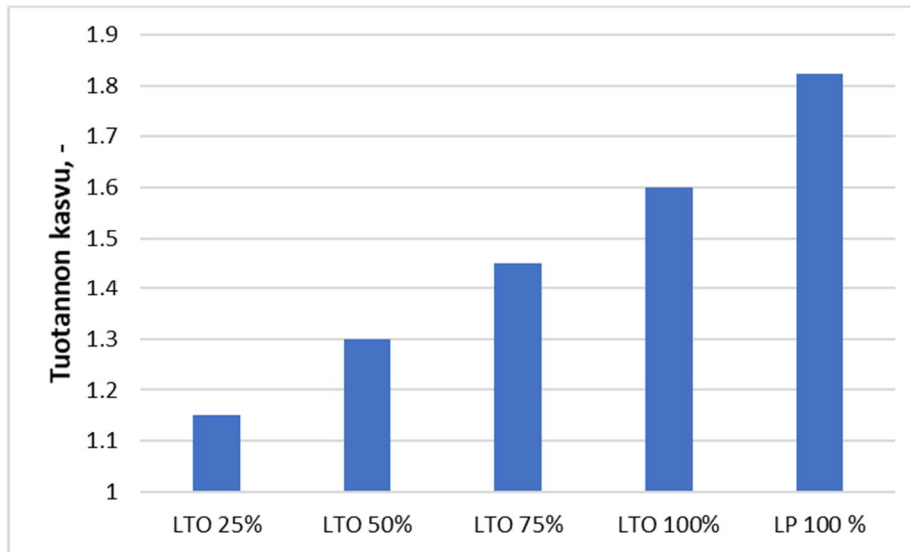
Tuloksista (kuva 48) voidaan päätellä, että rakennuksilla tapahtuva lämmöntalteenotto kasvattaa jätevedestä saatavissa olevaa lämmitysenergiaa kaupunkitasolla. Lämpöpumppujen käyttö lisää myös kaupunkitason sähkökäyttöä, joskin hieman eri suhteissa eri skenaarioilla. Kuvassa 49 tätä ilmiötä on tarkasteltu kaupunkitason lämpökertoimen avulla. Lämpökerroin on laskettu kuvassa 48 esitettyjen lämpöenergian tuottojen ja sähkönkulutusten suhteena.



Kuva 49. Kaupunkitason lämpökerroin Turussa.

Kaupunkitason lämpökerointa parantaa käytetyissä skenaarioissa suihkujen lämmöntalteenoton käyttö rakennuksissa (kuva 49). Vertailutapauksen (LTO 0 %) ja pelkästään lämpöpumppuja käytettäessä (LP 100 %) kaupunkitason lämpökerroin on sama kuin lämpöpumppujen oletettu lämpökerroinkin eli 3.0.

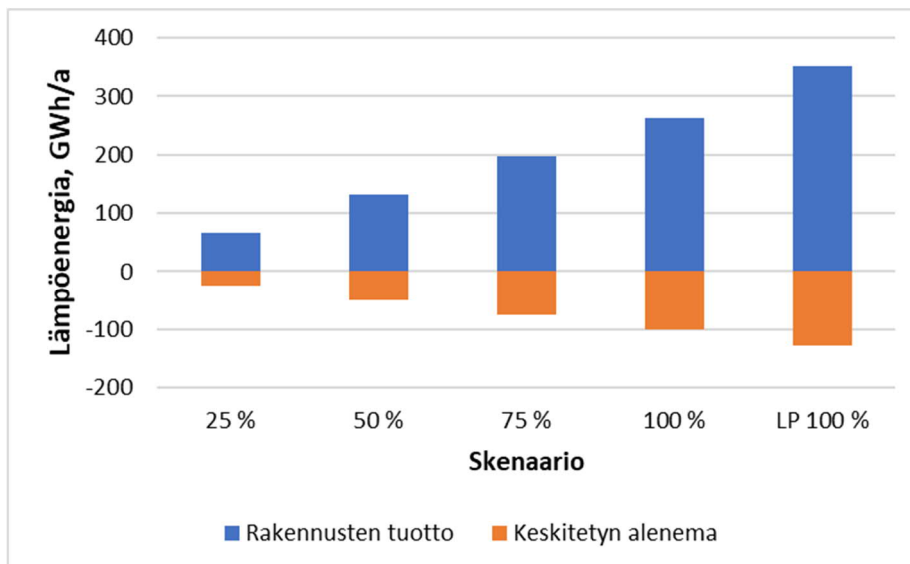
Kuvassa 50 on esitetty kokonaislämmöntuotannon suhteellinen kasvu vuositasolla verrattuna tilanteeseen ilman rakennuksilla tapahtuvaa lämmöntalteenottoa.



Kuva 50. Kokonaislämmöntuotannon (=rakennusten + keskitetyn lämpöpumpun tuotto) suhdeluku pelkästään keskitetyn lämpöpumpun lämmöntuottoon vuositasolla Turun alueella.

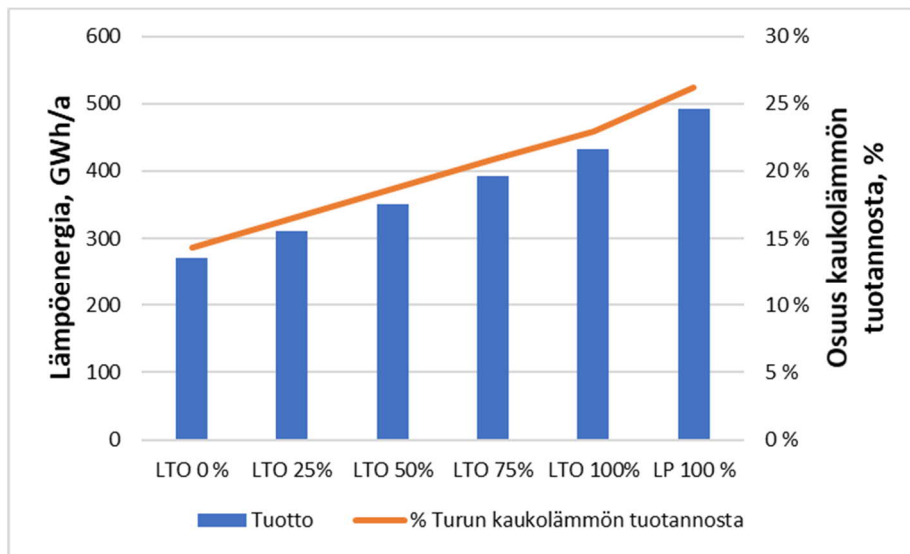
Tuloksista nähdään (kuva 50), että kokonaislämmöntuotannon potentiaali kasvaa Turun alueella 15 – 82 %, kun lämmöntalteenotto rakennuksilla lisääntyy.

Kuvassa 51 on vertailtu vuositason lämmöntuottoa rakennuksilla ja toisaalta keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lämpöenergian tuotannon vähenemistä.



Kuva 51. Rakennusten vuotuinen lämmöntuotto jätevedestä ja vastaava keskitetyn laitoksen vähenemä eri skenaarioilla Turun tapauksessa.

Kuvasta 51 nähdään, että vaikka keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lämmöntuottopotentiaali pienenee rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vuoksi, niin rakennusten tuottopotentiaali kasvaa sitä huomattavasti merkittävämmiin.

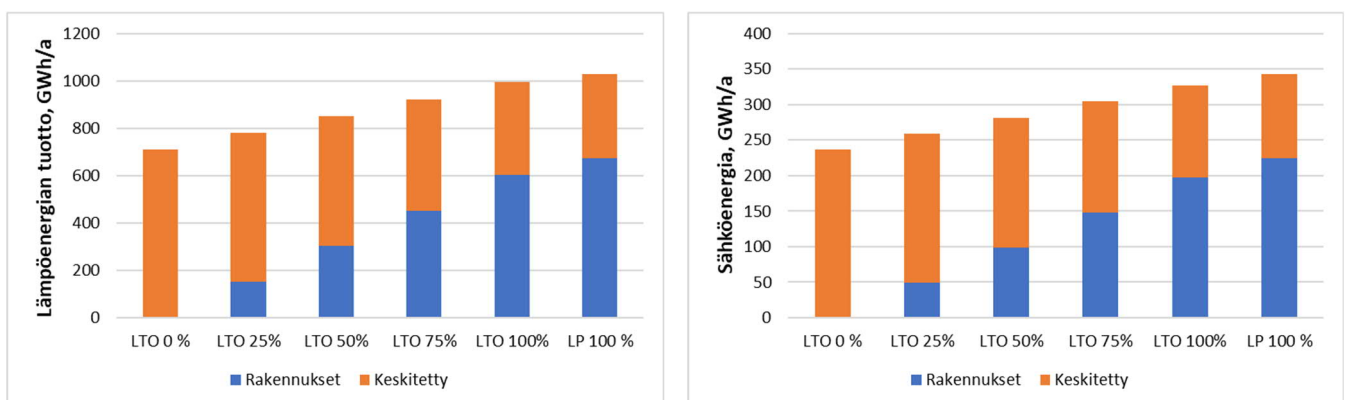


Kuva 52. Jätevedestä saatavissa olevan kokonaislämpöenergia vuositasolla eri skenaarioilla. Kuvassa on lisäksi esitetty jäteveden lämpöenergian tuotanto-osuus Turun kaukolämmön kokonaistuotannosta.

Kuvassa 52 on esitetty Turun tapauksen laskennallinen arvio jätevedestä tuotettavissa olevasta lämpöenergiasta eri skenaarioilla, ja niitä vastaavat suhteelliset osuudet Turun kaukolämpöenergian kokonaistuotannosta. Kuvaa tarkasteltaessa täytyy pitää mielessä, että esitetyt lukemat pätevät mallinnetulle verkosto-osalle. Se ei pidä sisällään Raision, Kaarinan ja Ruskon alueita, joiden vaikutusta arvioidaan myöhemmin kappaleessa 7.8. Nykyisessä tilanteessa, jossa rakennuksilla ei jäteveden lämpöä hyödynnetä, kaukolämmön tuotantopotentiaali keskitetyllä lämpöpumpulla on noin 14 % Turun kaukolämmön kokonaistuotannosta, joka vuonna 2020 oli 1884 GWh Energiateollisuuden julkaiseman kaukolämpötilaston perusteella (*Kaukolämpötilasto - Energiateollisuus*, no date). Rakennuksilla tapahtuva jäteveden lämpöenergian hyödyntäminen kasvattaa kaupunkitasolla hyödyntämispotentiaalin aina 26 %:iin.

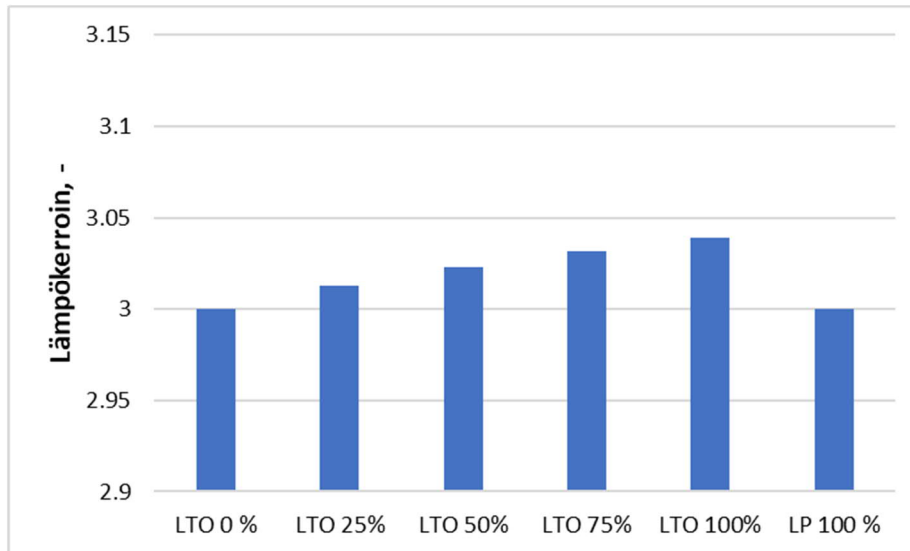
7.6.2 LTO:n vaikutukset vuositasolla, HSY

Seuraavassa on tarkasteltu rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vaikutuksia vuositasolla HSY:n tapauksessa. Kuvassa 53 on esitetty jätevedestä tuotettavissa olevat kokonaislämpöenergiat ja vastaavat lämpöpumppujen sähköenergiat eri lämmöntalteenottoskenaarioilla.



Kuva 53. Tarkastellun alueen lämpöenergian kokonaistuotanto jätevedestä vuositasolla ja vastaava lämpöpumppujen sähköenergian vuosikulutus eri skenaarioilla Helsingissä.

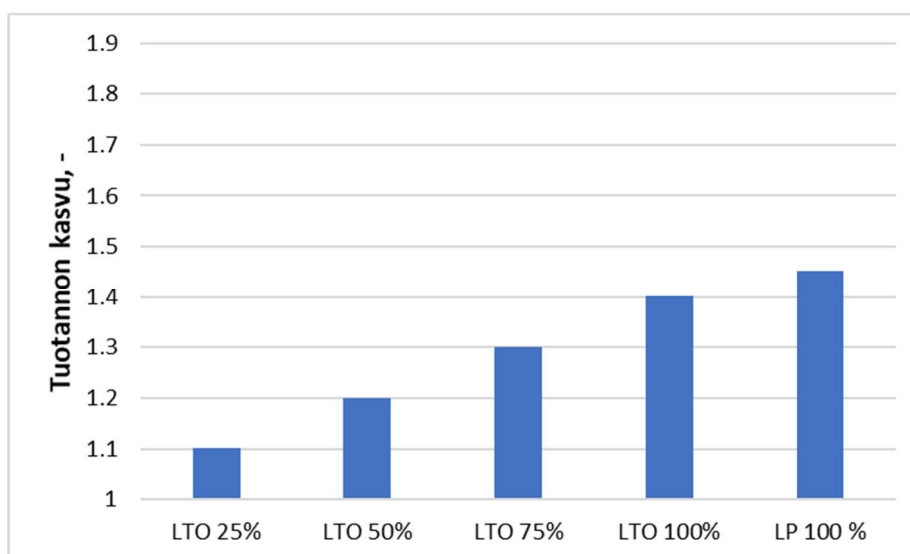
Tuloksista (kuva 53) voidaan päätellä, että rakennuksilla tapahtuva lämmöntalteenotto kasvattaa jätevedestä saatavissa olevaa lämmitysenergiaa kaupunkitasolla. Lämpöpumppujen käyttö lisää myös kaupunkitason sähkönkäyttöä, joskin hieman eri suhteissa eri skenaarioilla. Kuvassa 54 tätä ilmiötä on tarkasteltu kaupunkitason lämpökertoimen avulla. Lämpökerroin on laskettu kuvassa 53 esitettyjen lämpöenergian tuottojen ja sähkönkulutusten suhteena.



Kuva 54. Kaupunkitason lämpökerroin Helsingissä.

Kaupunkitason lämpökerrointa parantaa käytetyissä skenaarioissa suihkujen lämmöntalteenoton käyttö rakennuksissa (kuva 54). Vertailutapauksen (LTO 0 %) ja pelkästään lämpöpumppuja käytettäessä (LP 100 %) kaupunkitason lämpökerroin on sama kuin lämpöpumppujen oletettu lämpökerroinkin = 3.0.

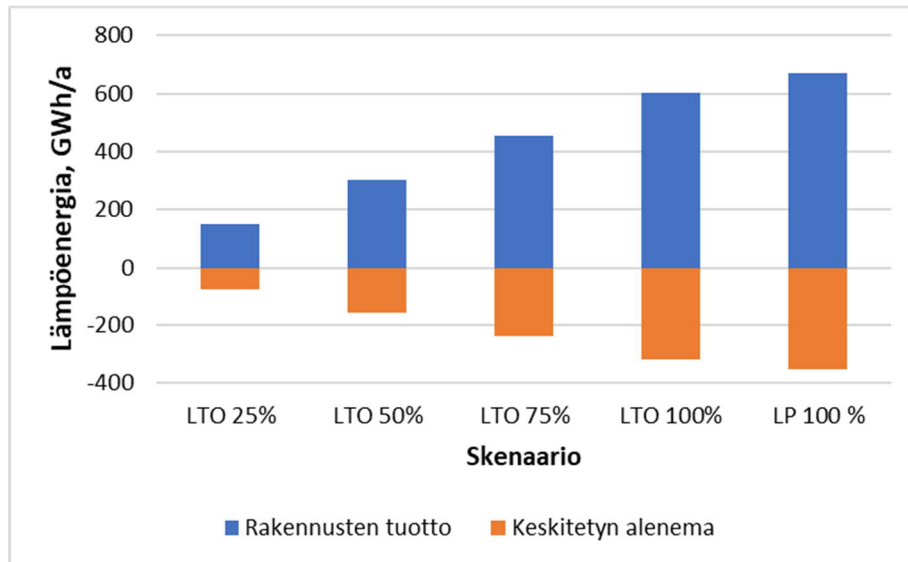
Kuvassa 55 on esitetty kokonaislämmöntuotannon suhteellinen kasvu vuositasolla verrattuna tilanteeseen ilman rakennuksilla tapahtuvaa lämmöntalteenottoa.



Kuva 55. Kokonaislämmöntuotannon (= rakennusten + keskitetyn lämpöpumpun tuotto) suhdeluku pelkästään keskitetyn lämpöpumpun lämmöntuottoon vuositasolla Helsingin alueella.

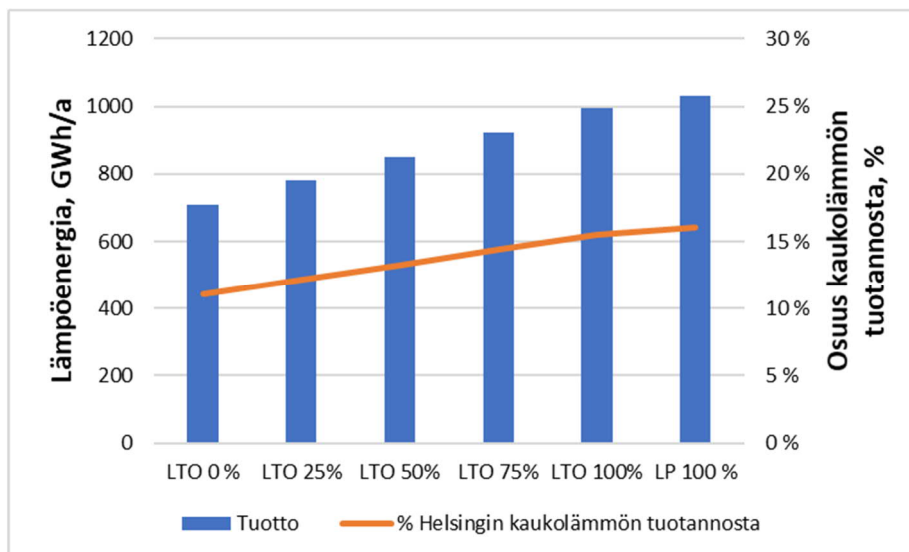
Tuloksista nähdään (kuva 55), että kokonaislämmöntuotannon potentiaali kasvaa Helsingin alueella 10 – 45 %, kun lämmöntalteenotto rakennuksilla lisääntyy.

Kuvassa 56 on vertailtu vuositason lämmöntuottoa rakennuksilla ja toisaalta keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lämpöenergian tuotannon vähenemistä.



Kuva 56. Rakennusten vuotuinen lämmöntuotto jätevedestä ja vastaava keskitetyn laitoksen vähenemä eri skenaarioilla Helsingin tapauksessa.

Kuvasta 56 nähdään, että vaikka keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lämmöntuottopotentiaali pienenee rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton vuoksi, niin rakennusten tuottopotentiaali kasvaa sitä huomattavasti merkittävämmiin.



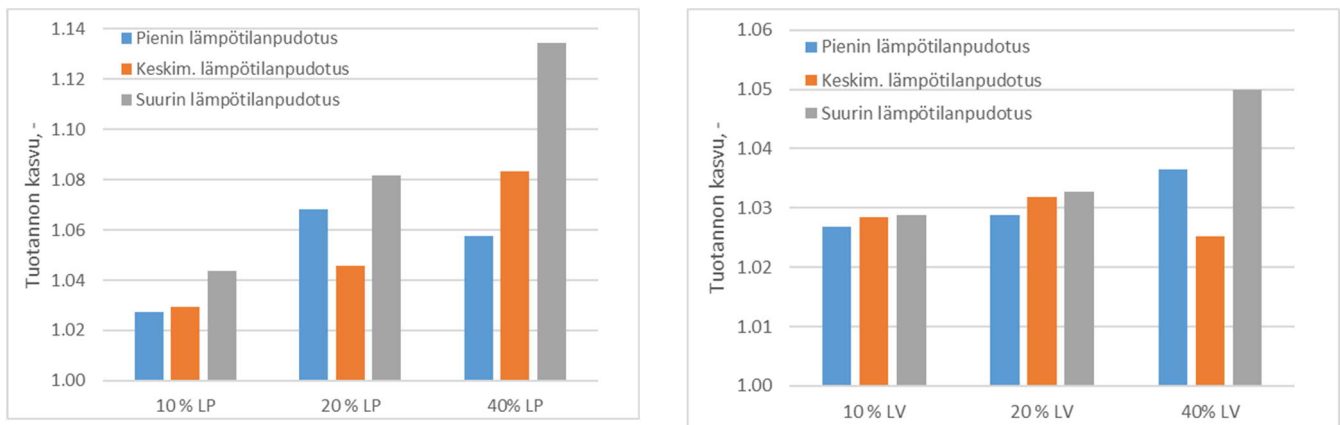
Kuva 57. Jätevedestä saatavissa olevan kokonaislämpöenergia vuositasolla eri skenaarioilla. Kuvassa on lisäksi esitetty jäteveden lämpöenergian tuotanto-osuus Helsingin kaukolämmön kokonaistuotannosta.

Kuvassa 57 on esitetty Helsingin tapauksen laskennallinen arvio jätevedestä tuotettavissa olevasta lämpöenergiasta eri skenaarioilla, ja niitä vastaavat suhteelliset osuudet Helsingin kaukolämpöenergian kokonaistuotannosta. Kuvaa tarkasteltaessa täytyy pitää mielessä, että esitetyt lukemat pätevät

mallinnetulle verkosto-osalle. Se ei pidä sisällään tiettyjä osia Helsingin alueesta eikä Tuusulan suunnasta tulevaan jätevesitunneliin liitetyjä verkosto-osia, joiden vaikutusta arvioidaan myöhemmin kappaleessa 7.8. Nykyisessä tilanteessa, jossa rakennuksilla ei jäteveden lämpöä hyödynnetä, kaukolämmön tuotantopotentiali keskitetyllä lämpöpumpulla on noin 11 % Helsingin kaukolämmön kokonaistuotannosta, joka vuonna 2020 oli 6418 GWh Energiategollisuuden julkaiseman kaukolämpötilaston perusteella (*Kaukolämpötilasto - Energiategollisuus*, no date). Rakennuksilla tapahtuva jäteveden lämpöenergian hyödyntäminen kasvattaa kaupunkitasolla hyödyntämispotentiaalin 16 %:iin.

7.7 Tulosten vertailua muihin tutkimuksiin

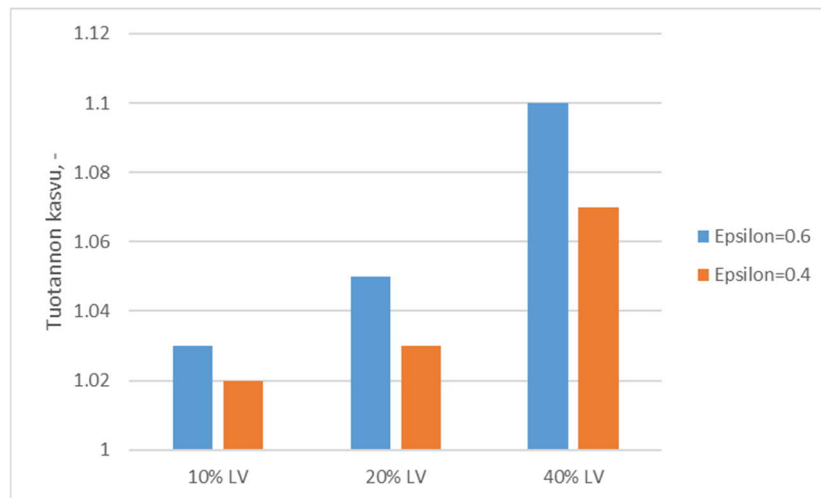
Skenaarioanalyysin tuloksia voidaan suuntaa antavasti verrata kirjallisuusanalyysissä esiteltyjen artikkeleiden tuloksiin. (Golzar and Silveira, 2021):ssa esitettiin rakennuskohtaisesti keskitetyllä LTO:lla saatavaa lämpöä, ja tästä aiheutuvaa puhdistamo-LTO:n tuotannon vähenemää. Tuloksista voidaan johtaa kokonaislämmöntuotannon suhde pelkän puhdistamo-LTO:n lämmöntuottoon, kuten tässä raportissa tehtiin (kuva 50). Alla on esitetty (Golzar and Silveira, 2021):n skenaarioiden tuloksista laskettu kokonaislämmöntuotannon kehitys lämmöntalteenoton eri yleisyysasteilla. Kuvassa 58 eri lämpötilanpudotukset viittaavat mallinnettuun jäteveden lämpötilan laskuun lämpöpumpussa tai lämmönvaihtimessa. Vasemman kuvaajan lämpöpumpuskenaariot ovat lähempänä tässä työssä käytettyjä skenaarioita, oikean kuvaajan passiivisten lämmönvaihtimien tulokset on esitetty vain verroiksi.



Kuva 58. Kokonaislämmöntuotannon suhde pelkästään keskitetyn lämpöpumpun lämmöntuottoon vuositasolla, lämpöpumpuilla (vasen) ja passiivisilla lämmönvaihtimilla (oikea), (Golzar and Silveira, 2021).

Lämpöpumpuilla keskimääräisellä lämpötilanpudotuksella suhdeluku käyttäytyy samalla tavoin kuin kuvissa 50 ja 55 eli kasvaa melko lineaarisesti yleisyysasteen kasvaessa. Suurimmalla lämpötilanpudotuksella suhdeluku kasvaa epälineaarisesti, ja pienimmällä lämpötilanpudotuksella kokonaistuotanto pienenee yleisyysasteen kasvaessa 20 %:sta 40 %:een (oltuaan ensin 20 % yleisyysasteella suurempi kuin keskim. lämpötilanpudotuksella), mitä on vaikea selittää. Passiivisilla lämmönvaihtimilla keskimääräinen lämpötilanpudotus käyttäytyy samalla tavoin epäloogisesti. Numeerisesti kuvan 58 suhdeluvut ovat suurimmallakin lämpötilanpudotuksella reilusti pienemmät kuin tässä työssä. Esimerkiksi 40 % LP:llä ja keskitetyllä laitoksella tuotanto on noin 14 % suurempaa kuin pelkällä keskitetyllä laitoksella. Lähimpänä vertailukohtana tässä työssä on 50 % LTO-yleisyysaste, jolla lämmön kokonaistuotanto on noin 30 % suurempaa kuin pelkällä keskitetyllä laitoksella.

Vertailun vuoksi tämän työn mallilla laskettiin vielä lähdeartikkeliä vastaavat skenaariot, joissa käytetään pelkästään passiivista kiinteistökohtaista LTO:ta. Lähdeartikkeliä parhaiten vastaava lämmönsiirtimen tehokkuus ei ollut tiedossa, joten skenaariot laskettiin kahdella arvolla, $\epsilon = 0.6$ ja 0.4 . Kuvassa 59 on esitetty kokonaislämmöntuotannon kasvu uusille skenaarioille.



Kuva 59. Kokonaislämmöntuotannon suhde pelkästään keskitetyn lämpöpumpun lämmöntuottoon, vertailutapaukset.

Edellä olevista tapauksista $\epsilon = 0.4$ vastaa kohtalaisen hyvin lähdeartikkelin lukemia ”suurin lämpötilanpudotus” - tapauksessa (kuva 58, oikea puoli). Kokonaislämmöntuotanto nousee yleisyyssasteen kasvaessa nopeammin kuin lähdeartikkelissa, mutta suuruusluokka on sama. On huomionarvioista, että kokonaistuotannon kasvu ei ole lineaarista, vaan kummassakin tapauksessa kokonaistuotanto kasvaa nopeammin välillä 20 % - 40 %, kuin välillä 10 % - 20 %. Kuvasta ilmenee myös, että LTO:n hyötysuhteella on merkittävä vaikutus tuloksiin. Näin ollen yksi mahdollinen selitys lämpöpumpputapausten tulosten eroavaisuuteen on, että lähdeartikkelissa lämpöpumppujen ottama lämpöteho on pienempi kuin tässä työssä. Artikkelissa jäteveden keskimääräinen lämpötilanpudotus lämpöpumpuilla riippui virtaamista, lämpötilasta sekä ajanhetkestä, vaihdellen noin kahden ja 12 asteen välillä. Tässä työssä jäteveden lämpötila lämpöpumpuilla pudotettiin 4 asteeseen aina kun lämmöntarvetta oli riittävästi, mikä tarkoittaa suurempaa, noin 5 - 17:n asteen lämpötilanpudotusta ajanhetkestä riippuen (ks. jäteveden lämpötilaprofiili kuvassa 24).

Eroavaisuuksien syitä voidaan selittää mallien sijasta myös mallinnettujen alueiden ominaisuuksilla. Käytännössä se tarkoittaisi, että Tukholmassa keskitetyille laitokselle saapuvan jäteveden lämpötila riippuu rakennuksilta lähtevän jäteveden lämpötilasta vahvemmin kuin Turussa, ja tällöin kiinteistö-LTO:n määrän kasvu näkyy selkeämmin laitoksen lämmöntuotannossa. Tämä puolestaan voi johtua siitä, että Tukholman viemäriverkossa lämmönsiirto ympäristöön on jostain syystä (viemärityyppi, virtaamat, putkikoot, viemärin topologia,..) vähäisempää kuin Turun viemäriverkossa.

7.8 Tulosten tarkastelu

Skenaariotarkastelut tehtiin osaverkostoille, joissa osa puhdistamoalueiden jätevesivirtaamista jäi tarkastelun ulkopuolelle. Turun tapauksessa tarkastelun ulkopuolelle jäivät Raision, Kaarinan ja Ruskon alueilta tulevat jätevesivirtaamat, jotka muodostavat runsaan 30 % osuuden Kakolanmäen puhdistamolle tulevasta jäteveden kokonaisvirtaamasta. Nämä virtaamat olivat kuitenkin mukana jätevesiverkoston laskelmissa ja vaikuttivat puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaan. Verkostolaskelmissa em. alueilta tulevan jäteveden lämpötilaksi oletettiin maan lämpötila + 1 °C, koska mitattua dataa ei ollut saatavilla, eikä verkostolaskelmien laajentaminen näille alueille ollut mahdollista. Tehdyissä asuinrakennusten lämmöntalteenottotarkasteluissa ei otettu ko. alueiden vaikutusta mitenkään huomioon. Jos Raision, Kaarinan ja Ruskon alueet olisivat olleet mukana skenaariotarkasteluissa, olisi mitä luultavimmin rakennusten lämmöntalteenottopotentiali entisestään kasvanut verrattuna puhdistamon jälkeisen keskitetyn lämpöpumppulaitoksen lämmöntalteenottopotentialin pienentymiseen. Vaikutukset jäteveden lämpötilaan olisivat luultavimmin jääneet vähäisiksi.

HSY:n Viikinmäen puhdistamoalueen tarkastelun ulkopuolelle jäi huomattavasti suurempi alue kuin Turussa. Tarkasteluista jäi kokonaan pois Tuusulan suunnalta tulevan tunneliviemäriin virtaamat, koska siitä ei ollut saatavilla lämpötilatietoja eikä riittävän tarkkaa tietoa virtaamasta. Lisäksi verkostolaskelmat kattoivat vain osan Helsingin alueen jätevesiverkostosta ja laskelmiin jouduttiin lisäämään useita vakiolämpötilassa liitettuja virtaamia eri puolille verkostoa. Vakiolämpötiloiksi oletettiin maan lämpötila + 3 °C eli pari astetta Turun laskelmia lämpimämpiä. Tämä oletus perustui siihen, että vakiolämpötilassa liitetyt virtaamat tulevat hyvin läheltä, jolloin rakennuksilta lähtevien jätevesien lämpötilat eivät ehdi jäähtyä kovin paljoa. Laskettu tilanne on huomattavasti Turun tapausta epäselvempi ja spekulointi puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilan suhteen vaikeampaa verrattuna tilanteeseen, että mallinnuksessa olisivat olleet mukana kaikki puhdistamolle tulevat jätevesivirtaamat. Läheltä mallinnettua alueita tulevien virtausten mukana olon vaikutus puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaan on kiistatonta, mutta koska niiden osuus mallinnetun alueen virtaamasta on kuitenkin vähäinen (noin 20 %), niin myös vaikutukset olisivat vähäisiä. Myös vaikutukset lämmöntalteenottotarkasteluihin olisivat arviolta vähäiset. Tuusulan jätevesitunnelin vaikutus, varsinkin lämmöntalteenottotarkasteluihin, olisi arviolta sen sijaan merkityksellistä. Luultavasti vaikutus olisi saman kaltainen kuin Turun tapauksessa, eli rakennusten lämmöntalteenotto kasvaisi suhteessa keskitetyn lämmöntalteenottolaitoksen pienentyvään lämmöntalteenottopotentiaaliin. Vaikutukset puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaan olisivat luultavimmin myös merkityksellisiä, koska tehdyissä laskelmissa sitä ei ollut lainkaan mukana ja se muodostaa kuitenkin noin 40 % puhdistamolle tulevasta kokonaisvirtaamasta.

Valitut kiinteistökohtaiset lämmöntalteenottoskenaariot ovat kaikki kaukana nykyisestä tilanteesta, jossa jäteveden lämmöntalteenottoa harrastetaan vain muutamissa kiinteistöissä. Jo laskettu 25 %:n taso edellyttäisi merkittävää kiinnostuksen kasvua lämmöntalteenottoa kohtaan ja 100 %:n kattavuudet eivät ole käytännössä realistisia.

Tässä hankkeessa kehitetty, mittauksiin perustuva, sovitepohjainen malli rakennuksen sisällä tapahtuvalle jäteveden jäähtymälle on kirjoittajien tietämän mukaan maailman mittakaavassa ainutlaatuinen. Rakennuksessa tapahtuvaa jäähtymää on aiemmissa tutkimuksissa käsitelty hyvin yksinkertaisesti, joka ottaa huomioon vain jäteveden sekoituslämpötilan vesikalusteilta lähtiessään. Nyt kehitetty malli ottaa huomioon paitsi jäteveden lämpötilan, niin myös ulkolämpötilan ja jätevesivirtaaman vaikutuksen jäähtymään. Kehitetty malli perustuu vain yhden kerrostalon mittauksiin ja tältä osin mallia pitäisi tarkentaa ja kehittää paljon laajemmin, eri rakennustyyppejä ja eri vuosikausien rakennuksia sisältävän, mittausaineiston perusteella. Hankkeen aikana havaittiin, että mittaus tietoa rakennuksen jätevesivirtaamista ja lämpötiloista ei ole laajemmin saatavilla eikä kiinteistöissä ole yleisesti mittarointia tältä osin. Huoneistokohtaisen vedenkulutuksen mittauksen yleistyessä on jatkossa helpompaa saada selville virtaamat ja viemäriin syötettävän jäteveden lämpötilat, mutta edelleenkin puutteeksi jää jäteveden lämpötila rakennuksesta poistuessaan. Tutkimuksessa samaa jäähtymämallia käytettiin sekä kerrostaloille että pientaloille (omakoti- ja rivitalot), joka aiheuttaa tuloksiin epätarkkuutta erityisesti pientalojen osalta. Pientalojen osuus mallinnetuissa alueissa on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin kerrostalojen (Turussa pientaloja 30 % ja HSY:n alueella 12 %), joka osaltaan lieventää tätä ongelmaa.

Tässä hankkeessa ei vertailtu lämmöntalteenottoratkaisujen kustannustehokkuutta, joka olisi oman tutkimuksen paikka. Tarkastelematta jäi myös lämmöntalteenoton käytettävyyteen ja huoltoon liittyvät näkökulmat, joilla on merkittävä vaikutus erityisesti rakennuskohtaisten järjestelmien toimintaan ja lämmöntalteenoton tehokkuuteen. Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Golzar and Silveira, 2021) on analysoitu rakennuskohtaisen keskitetyn lämmöntalteenoton kannattavuutta rakennuksen omistajan näkökulmasta ja saatu se tehtyjen laskelmien perusteella kannattavaksi. Rakennuksen omistajan näkökulmasta rakennuskohtaisen lämmöntalteenoton kiinnostavuutta lisää, että energiakustannusten säästön lisäksi sillä on mahdollista vaikuttaa energiankäytön ilmastovaikutuksiin rakennustasolla. Tällä hetkellä jäteveden lämmöntalteenotolla ei ole mahdollista vaikuttaa rakennuksen energialuokitukseen, koska sitä ei ole sisällytetty E-luvun laskentaohjeisiin. Tässä yhteydessä on tietysti syytä muistaa kokonaisuus eli etenkin ympäristövaikutukset eivät koko jäteveden käsittelyketjussa ole yksiselitteiset: lämmöntalteenotto rakennuksilla vähentää keskitetyn lämpöpumppulaitoksen kaukolämmöntuotantoa ja lisää paineita kasvattaa puhdistamojen puhdistuskapasiteettia.

Skenaariotarkasteluissa käytettyjen rakennuskohtaisten lämpöpumppujen mallinnustapa, jossa oletetaan jäteveden jäähtyvän asetettuun minimilämpötilaan (+4 °C) aina kun lämmölle on käyttöä, on hyvin ideaalinen. Todellisuudessa jäteveden lämpöä käytetään luultavimmin rinnakkain muiden lämmönlähteiden ohella, kuten esitellyssä Tampereen Pohjolankadun kohteessa. Tällöin jäteveden jäähtymä riippuu kokonaisuuden toiminnasta eikä ole niin radikaalia kuin skenaarioissa käytetty tapa, jossa jäteveden lämpöä hyödynnetään koko ajan maksimaalisesti. Sama asia koskee myös keskitetyn kaukolämpöpumpun mallinnustapaa, eli senkin laskennassa käytettiin samaista minimilämpötilaa (+4 °C) laskettaessa tuottopotentiaalia. Todellisuudessa prosessi on monimutkaisempi ja jätevettä käytetään lämmönlähteenä rinnan esimerkiksi kaukokylmän kanssa, jolloin jätevettä ei aina jäädytetä minimilämpötilaan. Lisäksi keskitetyn lämpöpumppujärjestelmän käyttöön liittyy muitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat jäteveden lämmön hyödyntämiseen, kuten eri kaukolämmön tuotantotapojen hintasuhteet.

Rakennusten ja keskitettyjen laitosten lämpöpumppujen mallinnuksessa käytettiin vakioämpökerrointa (COP=3). Todellisuudessa lämpökertoimet riippuvat höyrystys- ja lauhdutusolosuhteista sekä käytetystä tekniikasta. Tässä hankkeessa lämpöpumppujen tarkempaa mallintamista ei katsottu tarkoituksenmukaiseksi.

8. Käyttövesilämpöpumpun tarkastelua Turun seudun vesijärjestelmässä

8.1 Turun seudun käyttövesiverkosto

Turun seudun raakavesi otetaan Kokomäenjoesta Huittisissa. Vedenottamolta esikäsitelty raakavesi pumpataan noin 30 kilometrin päähän Säskylässä Virttaankankaalla sijaitsevalle tekopohjavesilaitokselle. Veden viipymä vedenottamolta tekopohjavesilaitokselle on noin 12 tuntia. Tekopohjavesilaitoksella veden viipymä on 3 - 4 kuukautta, jonka jälkeen puhdistettu vesi pumpataan kahdessa eri linjassa noin 60 kilometrin päähän Saramäen ja Laakkarin kalliosäiliöihin. Laakkarin haaraan otetaan lisävettä Oripäänkankaan pohjavedenottamolta ennen Laakkarin kalliosäiliötä. Veden kulkureitti on esitetty kuvassa 60. Kalliosäiliöissä vesi viipyy lähes vuorokauden ja säiliöistä kuluttajalle vesi matkaa kuluttajalle vaihtelevasti, viipymä on maksimissaan 2 viikkoa.



Kuva 60. Turun seudun vesijärjestelmän yleiskartta (kuva: Turun Seudun Vesi Oy).

Saramäen kalliosäiliöön tulee valtaosa puhdistetusta vedestä (keskimäärin runsaat 49 000 m³/päivä) ja huomattavasti pienempi osuus ohjataan Laakkarin säiliöön (keskimäärin runsaat 13 000 m³/päivä). Vesien päävirtaamat on esitetty kuvassa 61.

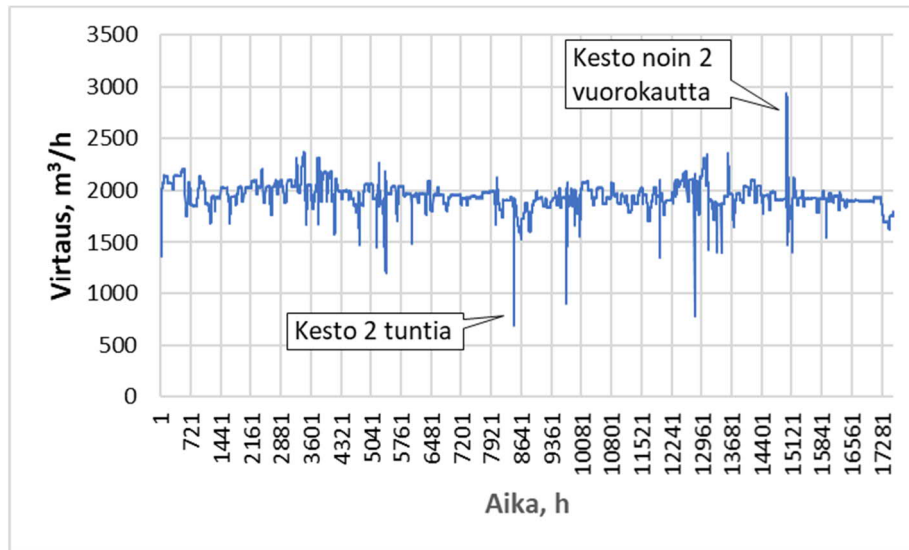


Järjestelmäkaavio ja vesimäärät vuonna 2019



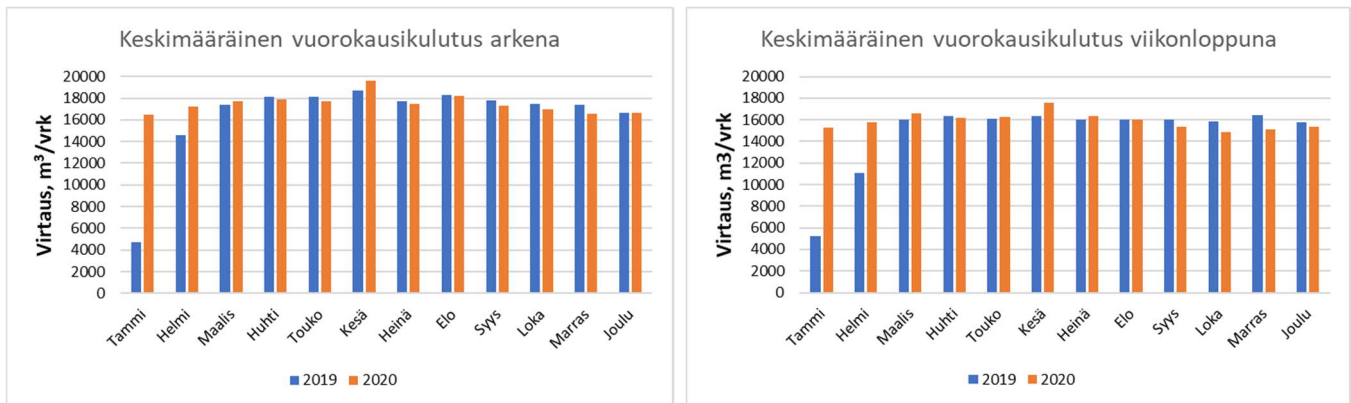
Kuva 61. Päävirtaamat Turun seudun vesijärjestelmässä (kuva: Turun Seudun Vesi Oy).

Mitatut tunnitaiset virtaamat Virttaankankaalta Saramäen kalliosäiliöön pysyvät kohtuullisen vakaana muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, kuva 62. Vakaana pysyvä virtaus antaa hyvän lähtökohdan lämpöpumpun toiminnalle.

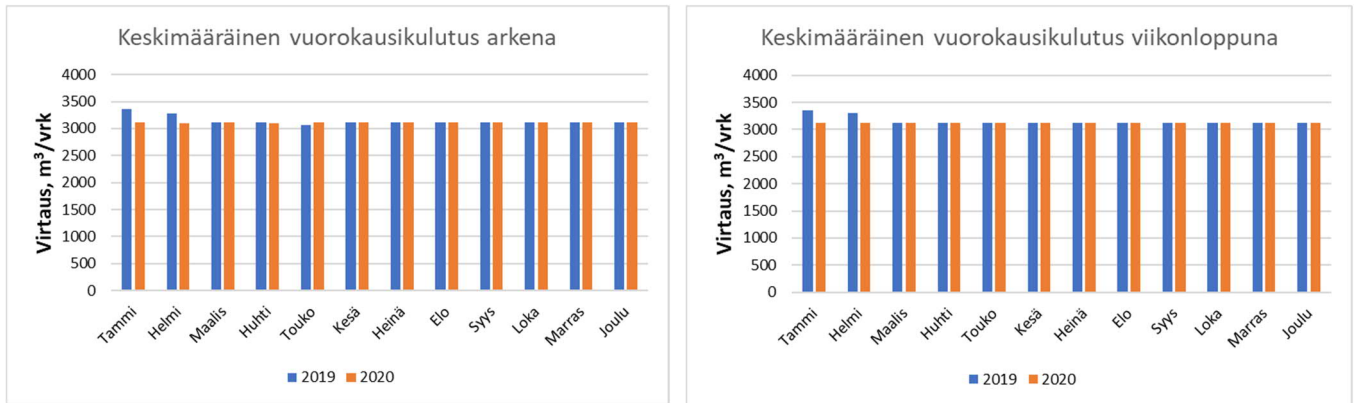


Kuva 62. Mitattu tunnitainen virtaus Virtaankankaalta Saramäelle vuosina 2019 - 2020.

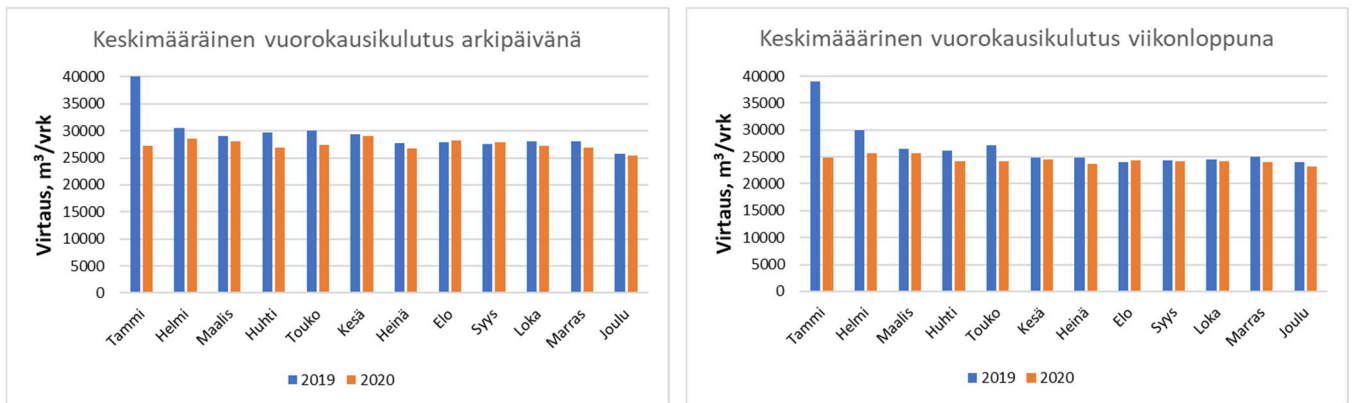
Saramäen kalliosäiliöstä vesi johdetaan kolmeen eri runkolinjaan, jotka suuntautuvat Raisioon, Moisioon ja Halisiin. Suurin virtaama on Halisten haarassa ja Moision haaran virtaama on selvästi pienempi kuin muiden haarojen virtaamat. Kuvissa 63 - 65 on esitetty haarojen keskimääräiset vuorokausikulutukset kuukausittain vuosille 2019 ja 2020. Raision haarassa on tehty putkistomuutoksia alkuvuonna 2019, joka on vaikuttanut haarojen virtaamiin.



Kuva 63. Raision haaran mitatut keskimääräiset kuukausittaiset vuorokausikulutukset arkipäiville ja viikonlopuille vuosina 2019 – 2020.



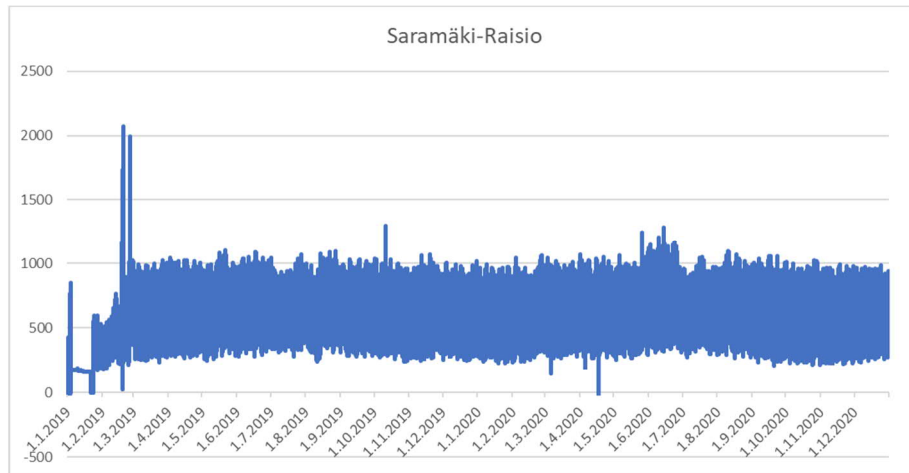
Kuva 64. Moision haaran mitatut keskimääräiset kuukausittaiset vuorokausikulutukset arkipäiville ja viikonloppulle vuosina 2019 – 2020.



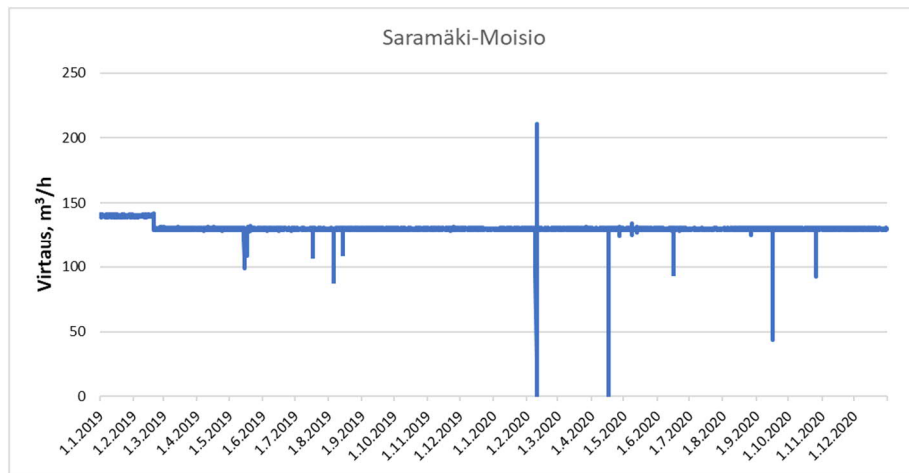
Kuva 65. Halisten haaran mitatut keskimääräiset kuukausittaiset vuorokausikulutukset arkipäiville ja viikonloppulle vuosina 2019 – 2020.

Moision haaran virtaamat ovat tasaisimmat sekä koko vuoden osalta että viikonpäivien suhteen. Raison ja Halisten haaroissa on havaittavissa, että arkikulutus on hieman suurempaa kuin viikonloppuna ja kuukausikulutuksissa on hieman poikkeavuutta kuukausien välillä.

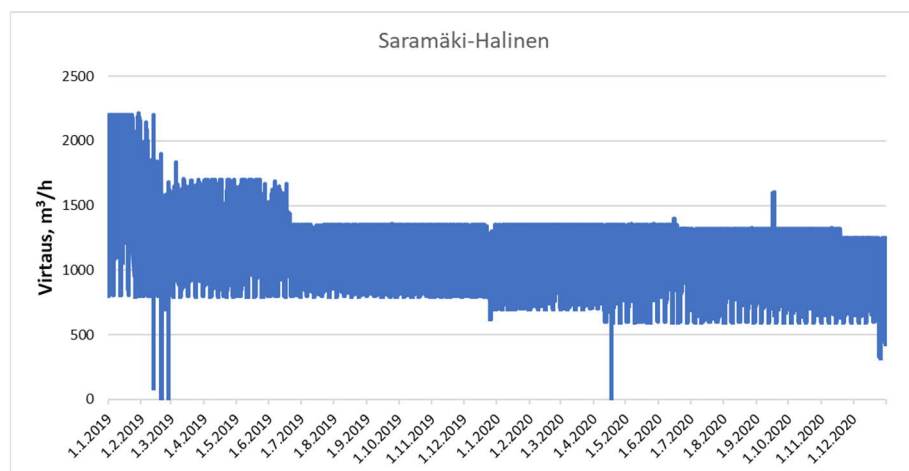
Tunnittaisista mittauksista on selvästi havaittavissa haarojen virtaamien erilainen luonne, kuvat 66 - 68.



Kuva 66. Raision haaran mitatut tuntikulutukset vuosina 2019 – 2020.

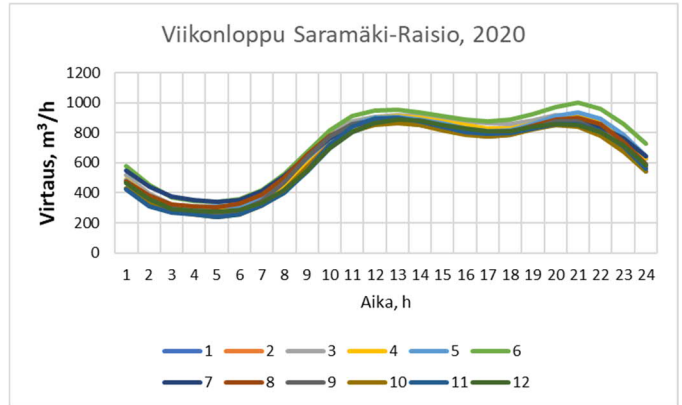
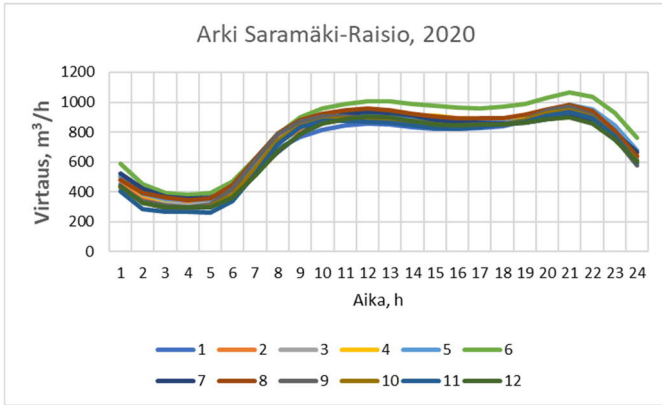


Kuva 67. Moisiohaaran mitatut tuntikulutukset vuosina 2019 – 2020.

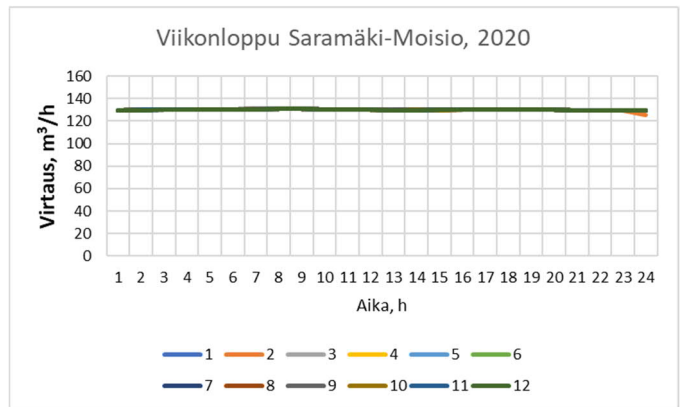
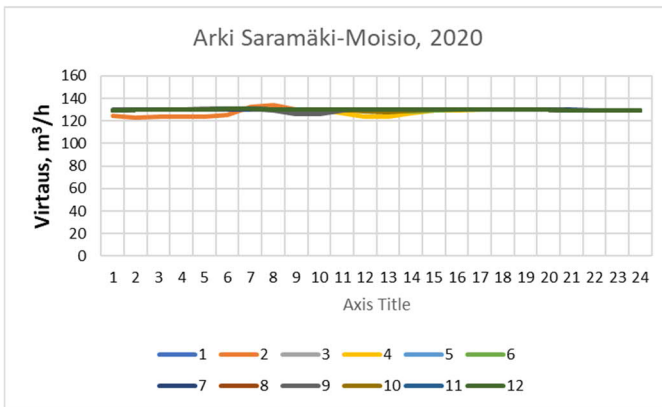


Kuva 68. Halisten haaran mitatut tuntikulutukset vuosina 2019 – 2020.

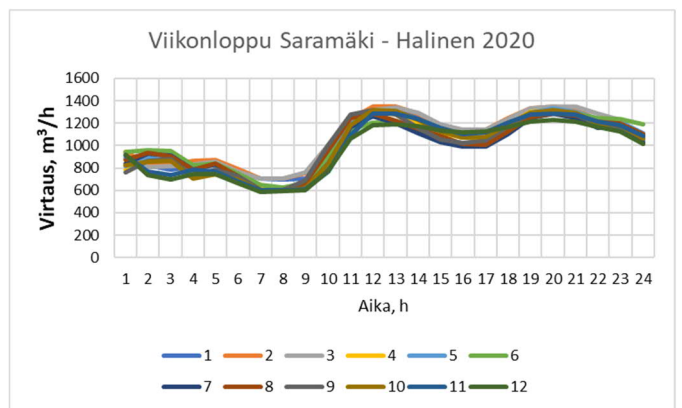
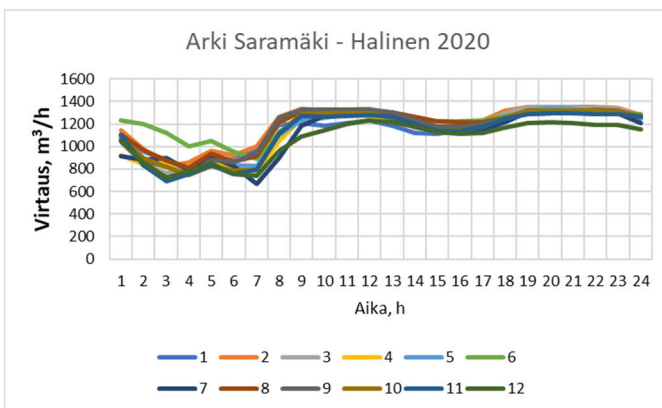
Raision ja Halisten haarojen tuntikulutuksien heilahtelu johtuu mitä ilmeisimmin asuinrakennusten aiheuttamasta kulutuksen vaihtelusta vuorokauden eri aikoina. Eri haarojen kuukausittaiset keskimääräiset vuorokautiset tuntivirtaukset on esitetty kuvissa 69 - 71.



Kuva 69. Raision haaran mitatut kuukausittaiset keskimääräiset tuntikulutukset arkipäiville ja viikonlopulle vuonna 2020.



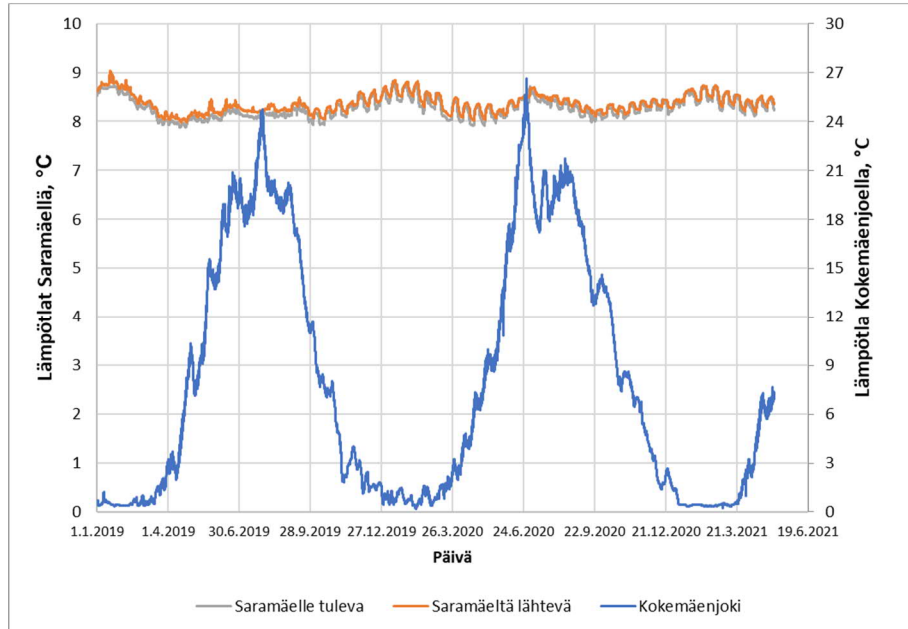
Kuva 70. Moision haaran mitatut kuukausittaiset keskimääräiset tuntikulutukset arkipäiville ja viikonlopulle vuonna 2020.



Kuva 71. Halisten haaran mitatut kuukausittaiset keskimääräiset tuntikulutukset arkipäiville ja viikonlopulle vuonna 2020.

Vuorokautisista virtaamaprofiileista Raision ja Halisen haaroissa käy selväksi kulutuskäyttäytyminen, jossa virtaama on pienimmillään aamuyön tunteina ja suurimmillaan päivällä.

Veden lämpötilat vedenottamolla Huittisissa Kokemäenjoesta ja toisaalta Saramäen kalliosäiliöön tulevan veden ja sieltä lähtevän veden lämpötilat on esitetty kuvassa 72.

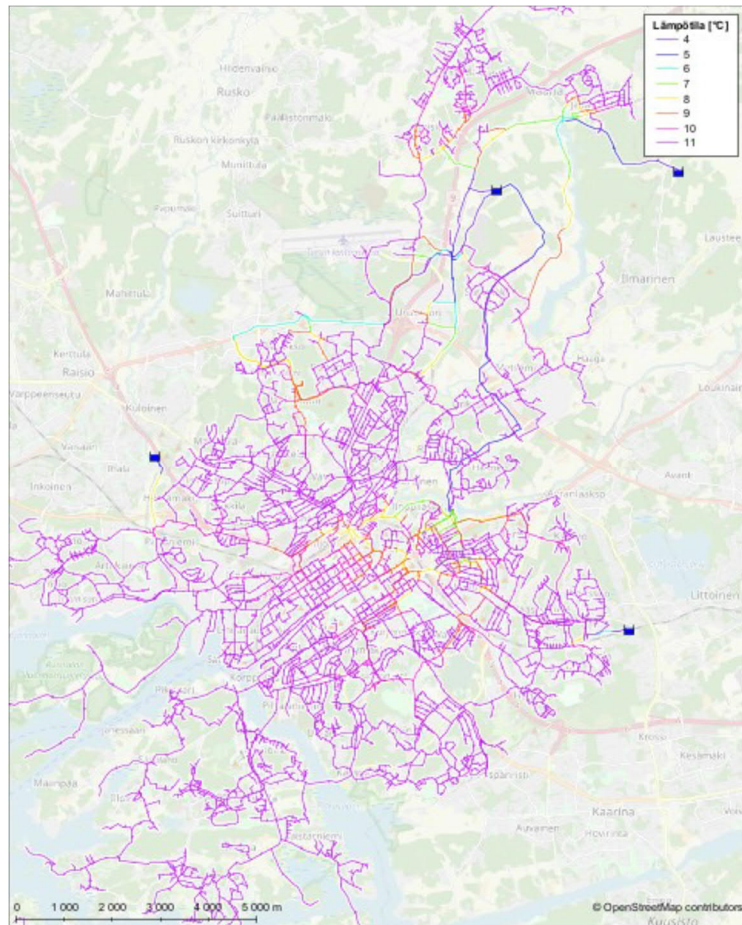


Kuva 72. Saramäen kalliosäiliöön tulevan ja lähtevän veden lämpötila sekä veden lämpötila vedenottamolla Huittisissa (Kokemäenjoki).

Kokemäenjoesta otetun veden lämpötila vaihtelee voimakkaasti vuodenajan mukaan: talvella lähellä 0 °C ja kesällä korkeimmillaan lähes 27 °C. Sen sijaan Saramäelle tulevan ja sieltä lähtevän veden lämpötila pysyy verraten vakaana keskimäärin noin 8.5 °C, vaihteluvälin ollessa 1 °C. Tulevan ja lähtevän veden lämpötiloissa ei mittaustarkkuuden rajoissa ole eroa.

8.2 Lämpöpumpun vaikutukset ja tuottopotentiaali

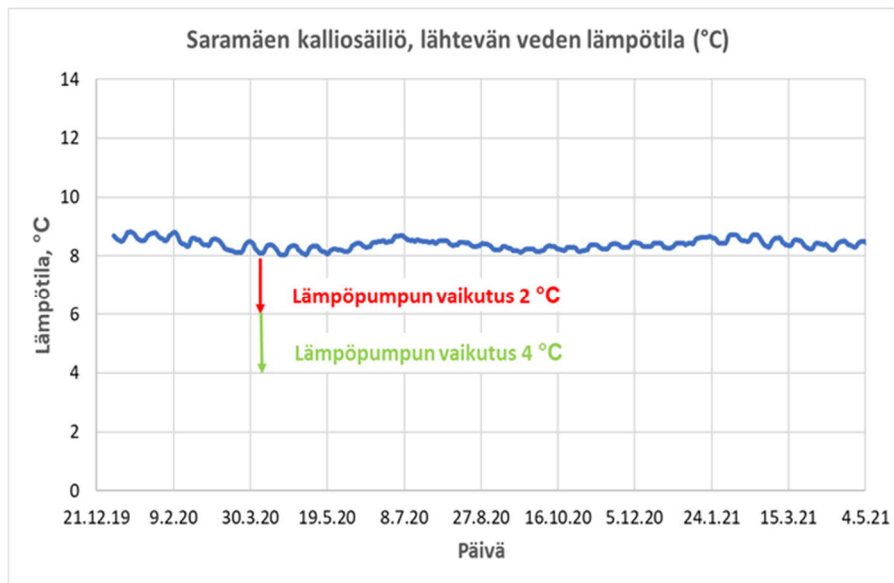
Puhdistetusta käyttövedestä mahdollisesti lämpöpumpuilla otettavan lämmitysenergian vaikutuksia kiinteistölle tulevan veden lämpötilaan tutkittiin Fluiditin Turun kaupungin käyttöveden verkostomallilla (Pitkänen). Turussa käyttövesi tulee puhdistettuna Saramäen kalliosäiliöön, josta se johdetaan kiinteistöille. Kalliosäiliössä varastoitavan veden lämpötila pysyy hyvin vakaana, runsaassa 8 °C:ssa vuodenajasta riippumatta, kuva 72. Laskennassa oletettiin lämpöpumpuilla jäädytettävän kalliosäiliöltä lähtevän (tai tulevan) veden lämpötilaa 2 tai 4 °C:lla. Verkostomallilla laskettiin vastaavasti rakennuksille tulevan käyttöveden lämpötila mallin sisältämällä realistisilla virtaamilla. Kuvassa 73 on esimerkki verkostolaskennan tuloksista äärimmäisissä olosuhteissa kesällä, kun maan lämpötila on korkeimmillaan (+12 °C) ja verkostoon syötettävän käyttöveden lämpötila alimmillaan (+4 °C).



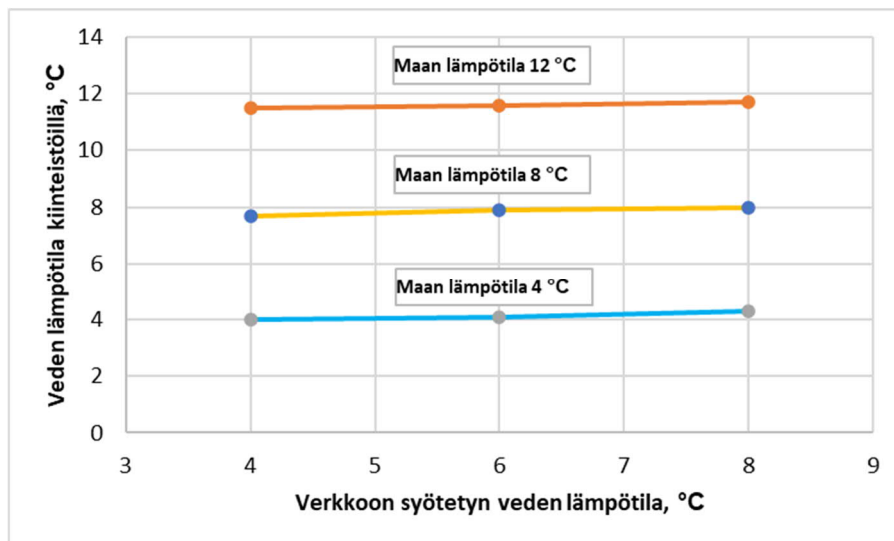
Kuva 73. Esimerkki käyttövesiverkoston lämpötilalaskelmasta tilanteessa, jossa maaperän lämpötila on +12 °C ja verkostoon Saramäen kalliosäiliöltä syötettävän veden lämpötila on + 4 °C. Käyttöveden lämpötila asettuu hyvin lähelle maaperän lämpötilaa, keskilämpötila kulutusasteilla on 11.5 °C (kuva: Fluidit Oy).

Käyttövesiverkon lämpötila-analyysin tuloksena on, että käyttöveden lämpötila kulutusasteilla asettuu hyvin lähelle maaperän lämpötilaa riippumatta verkostoon syötetyn veden lämpötilasta. Laskennallisesti suurin poikkeama maaperän lämpötilasta oli 0,5 °C, joka saavutettiin syyskesän tilanteessa, jossa maaperän lämpötila oli +12 °C ja verkostoon syötetyn veden lämpötila oli + 4°C. Tässä tilanteessa veden lämpötila kulutusasteilla oli keskimäärin +11.5 °C (kuva 75). Myös lämpötilaerot verkoston eri osissa ovat vähäisiä.

Kaikki laskennan tulokset esitetään kuvassa 75. Tulokset perustuvat Arttu Pitkäsen tekemiin laskelmiin Fluidit Oy:n laskentamallilla. Kuvassa 74 havainnollistetaan laskentatapausten veden lämpötiloja suhteessa Saramäen kalliosäiliön lämpötilaan.



Kuva 74. Käyttöveden lämpötila Saramäen kalliosäiliössä sekä laskennassa käytetyt rakennuksille lähtevät vaihtoehtoiset lämpötilat.

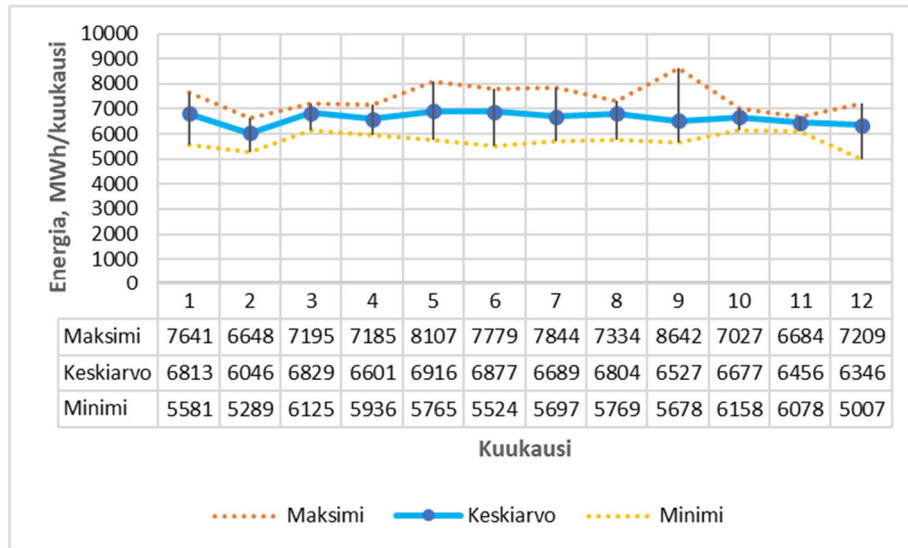


Kuva 75. Kiinteistöille tulevan veden keskimääräinen lämpötila riippuen maan lämpötilasta (vuodenajasta) ja Saramäen kalliosäiliöltä lähtevän veden lämpötilasta. Tulokset perustuvat Arttu Pitkäsen (Fluidit Oy) laskelmiin.

Tuloksista nähdään, että kiinteistöille tuleva keskimääräinen käyttöveden lämpötila on hyvin lähellä kulloistakin maan lämpötilaa riippumatta kalliovarastolta lähtevän veden lämpötilasta. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttövedestä mahdollisesti otettava lämpöenergia ei juurikaan näy kiinteistöillä eikä vaikuta kiinteistöiltä lähtevään jäteveden lämpötilaan eikä lisää kiinteistöjen käyttöveden lämmitysenergian kulutusta.

Lämpöpumpun lämmöntuottopotentiaalia arvioitiin Virttaankankaalta Saramäelle johtavassa linjassa, josta virtaaman mittaustiedot oli saatavilla. Lämpöpumpun käyttöveden lämpötilaa jäädyttäväksi vaikutukseksi oletettiin 4 °C (8 °C -> 4 °C). Tällä jäähtymällä ei edellä esitettyjen verkostolaskelmien mukaan pitäisi olla vaikutusta kiinteistöille tulevan veden lämpötilaan ja toisaalta lämpöpumpun toimintalämpötila pysyy selvästi yli jäätymisrajan 0 °C. Lämpöpumpun lämmöntuottoa arvioitiin vakiona pysyvällä lämpökertoimella

COP = 3. Kuvassa 76 esitetään vuosien 2019 ja 2020 virtaamatietojen perusteella lasketut lämmitysenergian keskimääräiset kuukausituotot ja kyseisten vuosien minimi ja maksimituotot. Minimi ja maksimi edustavat kunkin kuukauden tuntitason minimi- ja maksimiarvoa.



Kuva 76. Vuosien 2019 ja 2020 virtaamatiedoista määritetyt kuukausitason lämmitysenergian tuottopotentialiarviot Virttaankankaalta Saramäelle johtavaan käyttövesilinjaan asennetulla lämpöpumpulla (oletuksena veden jäähtymä $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lämpöpumpun COP = 3).

Virttaankankaalta Saramäelle johtavasta käyttövesilinjasta olisi laskelman mukaan saatavissa vuositasolla noin 120 GWh/a lämmitysenergiaa. Virttaankankaalta tulee myös toinen linja Oripäänkankaan pohjavesiottamon kautta Laakkarin kalliosäiliöön (kts. kuva 61), josta olisi myös mahdollista ottaa lämmitysenergiaa. Tämän linjan virtaama on noin 27 % Saramäenlinjan virtaamasta, joka karkeasti ottaen vastaa noin 30 GWh:n vuotuista lämmitysenergiapotentialiaa, jos arvioinnissa käytetään Oripäänkankaan jälkeistä virtaamaa ja samaa jäähtymää ja lämpöpumpun lämpökerrointa kuin Saramäen linjalle ($\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ja COP = 3).

Energiateollisuus ry:n julkaiseman kaukolämpötilaston mukaan Turku energian vuonna 2020 toimittama kaukolämpöenergia oli noin 1884 GWh, tästä käyttövedestä saatavissa oleva lämpöenergia, noin 150 GWh/a (120 GWh/a + 30 GWh/a), kattaisi 8 %.

Lämpöä on mahdollista ottaa myös kalliosäiliöiden jälkeisistä linjoista, mutta tällöin virtaamat eivät ole niin vakaita, vaan vaihtelevat vuorokaudenajan mukaan (kts. kuvat 69 -71). Myös linjojen lämpötilat vaihtelevat vuoden eri aikoina maan lämpötilojen mukaan, sitä voimakkaammin, mitä lähempänä ollaan kulutuspeiteitä. Tämä ilmiö pienentää käyttövedestä otettavissa olevaa lämmitysenergiaa erityisesti kevättalvella (tammikuu – maaliskuu), jolloin tuotanto menee pahimmillaan mahdottomaksi, kun veden lämpötilat laskevat alle $+4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Käyttövettä olisi mahdollista hyödyntää myös jäähdytykseen, jota on tarkasteltu myös lähteessä (Kauppila 2020). Jäähdytyskäyttö voitaisiin toteuttaa kahdella periaatteellisella tavalla: 1) käyttövettä käytetään ensin jäähdytykseen ja lämpötilan annetaan nousta mahdollisesti jopa $+12 \text{ }^\circ\text{C}$:een ja sitten jäähdytetään vesi aina $+4 \text{ }^\circ\text{C}$:een, 2) jäähdytetään vesi ensin lämpöpumpulla $+4 \text{ }^\circ\text{C}$:een, jonka jälkeen annetaan veden lämmetä jäähdytysjärjestelmässä takaisin esimerkiksi lähtölämpötilaan $+8 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Käyttötapa 1 jopa kaksinkertaistaisi lämmityspotentialiaalin, jos jäähdytystä ja lämmitystä voitaisiin hyödyntää täysimääräisesti koko vuoden. Samalla käyttövedestä saataisiin lisäarvoa jäähdytysenergian myynnillä. Käyttötapa 2 ei lisäisi lämmityspotentialiaalia, mutta kylläkin jäähdytysenergiaa.

9. Yhteenveto

Tässä raportissa julkaistut tulokset ovat osa laajempaa hankekokonaisuutta. Hankekokonaisuudessa ”Lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa ja vaikutus jätevesien käsittelyyn (JV-LÄMPÖ)” tarkastellaan kokonaisvaltaisesti veden sisältämää lämpöenergiaa sekä lämmön hyödyntämisen että jätevedenkäsittelyn näkökulmasta.

Tässä työpaketissa (TP1) selvitettiin rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton vaikutuksia jäteveden lämpötiloihin puhdistamolle tullessaan sekä vaikutuksia kaupunkitason keskitettyjen lämpöpumppujen lämmöntuotantopotentiaaleihin. Puhdistamolle saapuvan jäteveden lämpötilalla on suuri merkitys jäteveden puhdistustulokseen ja puhdistamon jälkeen tapahtuvalle keskitetylle lämmöntalteenotolle suurilla lämpöpumpuilla, joita energialaitokset käyttävät kaukolämmön tuotannossaan. Jäteveden lämpötilan vaikutusta puhdistustulokseen, erityisesti typenpoistoon, on selvitetty tämän hankekokonaisuuden toisessa hankeosiossa Aalto-yliopiston toimesta (Ahonen, 2021).

Keskeisiä käytännön kysymyksiä olivat jäteveden tuotomäärä ja lämpötila rakennuksilla, sekä kuinka jäteveden lämpötila muuttuu lähtiessä vesikalusteista ja kulkiessa rakennuksen sisäisessä viemärisssä ja kaupungin viemäriverkostossa. Jäteveden tuotantoon ja rakennuksen sisäiseen jäähtymään kehitettiin työssä omat mallinsa. Kaupunkien viemäriverkostojen laskelmat teki toisessa hankeosiossa Fluidit Oy omalla verkostomallillaan (Pitkänen, 2022). Näihin laskelmiin perustuen kehitettiin kaupungin viemäriverkostossa tapahtuvalle jäähtymälle sovitteellinen malli. Kehitetyt mallit 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.

Rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton vaikutus puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaa alentavasti 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 %. Vuositasolla Turun tapauksessa rakennuksilla jätevedestä talteenotettu energia on noin 2.6 ja HSY:n alueella noin 1.9 kertaa suurempi kuin keskitetyn lämpöpumpun talteenoton vähennys rakennusten lämmöntalteenottoskenaariosta riippumatta.

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 lämmitysenergiatarpeeseen, 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 käyttövettä on mahdollista hyödyntää myös kaukojäähdytyksessä. Samalla jäähdytysenergian myynnistä saataisiin lisäarvoa.

Seuraavassa on vielä lyhyet yhteenvetot raportin pääkohdista.

9.1 Kirjallisuusanalyysi

Rakennuksissa jäteveden lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa lämmönsiirtimin joko suoraan lämmitettävään käyttöveteen tai epäsuorasti lämpöpumpulla. Suoraan käyttövettä lämmittävät tekniikat ovat joko vesikalustekohtaisia (suihku, lattiakaivo) tai kiinteistökohtaisesti keskitettyjä ratkaisuja (lämmönsiirrin viemäriinjassa). Lämpöpumpuilla on jäteveden lämpöä mahdollista käyttää myös tilojen ja

ilmanvaihdon lämmittämiseen. Keskitetty jäteveden lämmöntalteenotto tapahtuu suurilla lämpöpumpuilla kaupunkitasolla jäteveden puhdistamojen jälkeen.

Hajautetun LTO:n verkostovaikutuksia on käsitelty aiemmin muutamissa artikkeleissa sekä energiapotentiaalin että vaikutusten (puhdistamoon sekä keskitettyyn LTO:hon) osalta. Nimenomaan rakennuksilla tapahtuvan jäteveden LTO:n verkostovaikutuksista löydettiin neljä artikkelia, joista kaksi on tehty Ruotsissa ja kaksi Keski-Euroopassa. Relevanteista artikkeleista laadittiin koontitaulukko. Suora vertailu eri lähteiden tulosten välillä on haastavaa, koska aiempien tutkimusten tutkimusmenetelmissä sekä tutkittavissa alueissa on suuria eroavaisuuksia. Vaikka kutakin mallia on validoitu erikseen, eri malleja ei ole käytetty keskinäiseen vertailuun samalla alueella, jolloin mallien eroavaisuuksien käytännön merkitys jää epäselväksi.

Jäteveden jäähtymä viemäriverkossa mainitaan kolmessa neljästä artikkelista merkittäväksi tekijäksi, joka kasvattaa rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmön talteenoton potentiaalia myöhemmin tapahtuvaan LTO:hon verrattuna. (Golzar and Silveira, 2021):ssa todetaan, että rakennuksilla talteen otettu energia pienentää puhdistamon jälkeisen LTO:n tuotantoa vähemmän kuin rakennuksilla talteen otetun energian määrän, johtuen viemäriämpöhäviöiden vähenemisestä.

9.2 Data-analyysi

Tutkimuksessa tehtiin data-analyysi Helenin toimittamalle kaukolämmön mittausaineistolle 258 asuinrakennuksesta Helsingin alueelta, tavoitteena erotella kaukolämpökulutus LKV:n, lämpöhäviön, ja tilojen lämmityksen komponentteihin. Analysoitavaan dataan sisältyi kerros- rivi- ja pientaloja eri ikäluokista. Kehitettyä data-analyysityökalua validoitiin synteettistä dataa sekä yhden asuinkerrostalon kulutusdataa vastaan; työkalun tuottamat vuorokausi- ja kuukausiprofiilit vastasivat todellista kulutusta melko hyvin. Analyysin pohjalta laadittiin erilaisia kulutusprofiileja tunti-, kuukausi- ja vuositasolla eri talotyypeille ja ikäluokille. Tämän työn jätevesimallissa hyödynnettiin vain kulutuksen vuorokausiprofiileja, mutta tuloksia voidaan mahdollisesti jatkossa hyödyntää yleisemmin; suomalaisen vedenkäytön ajallisista profiileista on tehty aiemmin vain rajallisia tutkimuksia (esim. (Ahmed, Pyly and Kurnitski, 2015) ja (Ahmed, Pyly and Kurnitski, 2016)), joissa käsiteltiin muutamaa kerrostaloa. LKV-profiilien epäsuora mittaus KL-datasta mahdollistaa suurien aineistojen käsittelyn, koska mittausdata on jo olemassa. Jatkossa onkin syytä pohtia KL-data-analyysille suurempia aineistoja, muiden rakennustyyppien sisällyttämistä, muita mahdollisia sovelluskohteita, sekä menetelmien jatkokehitystä.

9.3 Jäteveden tuottomalli

Rakennusten jäteveden lämmöntalteenoton tuotantopotentiaalin arvioimiseksi kehitettiin vesikalustekohtaisiin tuntitason kulutuksiin pohjautuva stokastinen jäteveden tuottomalli, jossa on eroteltu jokaisen vesikalusteen (suihku, hanat, WC, tiskikone, pesukone) tuntikohtaisiin kulutusprofiileihin. Vesikalusteiden erottelu mahdollistaa vesikalustekohtaisen LTO:n mallinnuksen, ja tätä hyödynnettiin skenaariotarkasteluissa suihkulämmönvaihtimia mallinnettaessa. Tuottomallin lähtökohtana oli useissa kansainvälisissä tutkimuksissa käytetty malli (Wärff *et al.*, 2020), jota muokattiin soveltuvaksi suomalaiseen vedenkulutustapaan (Korhonen *et al.*, 2020). Edellä kuvatun data-analyysin perusteella määriteltiin kuumen veden käytön tuntitason vuorokausiprofiilit erikseen arkipäiville ja viikonlopuille.

9.4 Jäteveden jäähtymämallit

Rakennuksen sisällä tapahtuvalle jäteveden jäähtymälle kehitettiin, mittauksiin perustuva sovitepohjainen malli, joka ottaa huomioon paitsi jäteveden lämpötilan, niin myös ulkoilman lämpötilan ja jätevesivirtaaman. Kehitetty malli on ilmeisesti ainutlaatuinen, sillä tiedossa olleissa kansainvälisissä tutkimuksissa rakennuksen sisällä tapahtuvaa jäähtymistä on tarkasteltu varsin yksinkertaisella mallilla, joka ottaa huomioon vain jäteveden lämpötilan (Wärff *et al.*, 2020). Kehitetty uusi malli perustuu Tampereella

(Pohjolankatu 18-20) sijaitsevan, 1970-luvulla rakennetun, kerrostalon jätevedestä tehtyihin mittauksiin. Malli ottaa huomioon jäteveden lämpötilan lisäksi ulkoilman lämpötilan ja jätevesivirtaaman vaikutukset rakennuksen sisällä tapahtuvaan jäteveden jäähtymiseen. Kiinteistöissä jätevesi jäähtyy merkittävästi ennen kunnallista viemäriverkostoa, mikä johtuu osin ulkoilmaan tuulettuvien viemäreiden lämpöhäviöistä ja osittain lämpöhäviöistä rakennuksen sisäpuolelle. Kaupunkitason viemäriverkostojen laskelmat toteutti Fluidit Oy omassa, tästä työstä erillisessä, työpaketissaan. Fluiditin tekemien laskelmien pohjalta kehitettiin tässä raportissa käytetyt jäähtymäsovitteet, joilla jäteveden jäähtymä rakennuksilta jäteveden puhdistamolle voidaan arvioida kiinteistöiltä lähtevän jäteveden lämpötilan ja maan lämpötilan perusteella kuukausitasolla. Jäähtymäsovitteet määritettiin erikseen sekä Turun että HSY:n jätevesiverkostoille.

9.5 Skenaariotarkastelut

Rakennusten jäteveden lämmöntalteenottoratkaisuksi valittiin suihkuun liitetty passiivinen ratkaisu ja kiinteistökohtainen lämpöpumppuun perustuva aktiivinen ratkaisu. Nämä ratkaisut valikoituivat, koska ne arvioitiin todennäköisimmiksi ratkaisuksi pientaloissa (suihku) ja kerrostaloissa (lämpöpumppu). Jäteveden lämmöntuotantopotentiaalia arvioitiin eri tasoilla talteenottoskenaarioilla: 1) vertailutapaus ilman rakennuksilla tapahtuvaa lämmöntalteenottoa, 2) 25 % pientaloista varustettu suihkuun asennetulla lämmöntalteenotolla ja 25 % kerrostaloista varustettu rakennuskohtaisilla jätevesilämpöpumpuilla, 3) 50 % pientaloista suihkun lämmöntalteenotolla ja 50 % kerrostaloista lämpöpumpulla, 4) 75 % pientaloista suihkun lämmöntalteenotolla ja 75 % kerrostaloista lämpöpumpulla, 5) 100 % pientaloista suihkun lämmöntalteenotolla ja 100 % kerrostaloista lämpöpumpulla 6) 100 % pientaloista lämpöpumpuilla ja 100 % kerrostaloista lämpöpumpuilla.

Kaupunkitason tarkastelut jouduttiin rajaamaan Turun Kakolanmäen ja HSY:n Viikinmäen puhdistamojen alueisiin, koska vain näistä alueista oli resurssien puitteissa mahdollista tehdä kaupunginosatason viemäriverkoston simulointeja. Tarkastellun alueen ulkopuolelle jäi Turussa noin 30 % Kakolanmäen puhdistamolle tulevasta jätevesivirtaamasta. Tarkastelun ulkopuolelle jäivät Raisiosta, Kaarinasta ja Ruskosta tulevat virtaamat. Turun mallinnetun alueen asukasmääräksi arvioitiin noin 286000. Helsingissä tarkastellun alueen jätevesivirtaama kattoi noin 50 % Viikinmäen puhdistamolle tulevasta kokonaisjätevesimäärästä. Täysin tarkastelun ulkopuolelle jäi noin 35 % Viikinmäelle tulevasta jätevesimäärästä (Tuusulan suunnasta tuleva tunneliviemäri). HSY:n Viikinmäen puhdistamoalueen tarkasteluissa mukana olevan alueen asukasmääräksi arvioitiin noin 540000.

9.5.1 Skenaariotarkastelujen tulokset

Rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton vaikutus puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaa alentavasti 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. Eri kuukausien osalta havaittiin hieman poikkeavia jäähtymiä, suurimmillaan vaikutukset olivat keväisin ja syksyisin.

Rakennuksilla tapahtuvan jäteveden lämmöntalteenoton todettiin lisäävän kaupunkitasolla lämmöntuotantopotentiaalia verrattuna tilanteeseen, jossa lämpöä otetaan talteen vain keskitetysti puhdistetusta jätevedestä. Turun alueen skenaariotarkasteluissa arvioitiin kaupunkitason lämpöenergian kokonaistuoton kasvavan 15 – 82 % rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton johdosta. Tarkasteltu Turun alue ei kattanut koko Kakolanmäen puhdistamon viemärintialuetta, vaan siitä puuttui Raision, Kaarinan ja Ruskon alueet. Puuttuvien alueiden laskentaan sisällyttämisen arvioitiin lisäävän entisestään kaupunkitason lämmöntuotantopotentiaalia. HSY:n alueella kaupunkitason lämpöenergian kokonaistuotannon arvioitiin kasvavan 12 – 53 % rakennuksilla tapahtuvan lämmöntalteenoton johdosta. Viikinmäen puhdistamoalueen tarkasteluista puuttui osia Helsingin viemäriverkostosta ja kokonaan Tuusulan suunnasta tulevaan tunneliviemäriin liitetyt alueet.

Vuositasolla Turun tapauksessa rakennuksilla jätevedestä talteenotettu energia on noin 2,6 kertaa suurempi kuin keskitetyn lämpöpumpun talteenoton vähennys rakennusten

lämmöntalteenottoskenaariosta riippumatta. HSY:n alueella samainen suhde on noin 1.9. HSY:n tapauksen pienempi suhdeluku johtuu verkoston suuremmista vuodoista. Suuremmat vuodot lisäävät keskitetylle lämpöpumpulle tulevaa virtausta ja samalla vaimentavat rakennusten lämmöntalteenoton vaikutusta jäteveden lämpötilaan, jotka vaikuttavat suoraan lämmöntalteenottopotentiaaliin.

Tuloksia verrattiin lähimpään vastaavaan kirjallisuuslähteeseen, (Golzar and Silveira, 2021):ssä tehtyyn Tukholman Henriksdalin puhdistamon alueen vastaavantyyppiseen analyysiin. Havaittiin, että tutkimuksien tulokset vastasivat laadullisesti pääsääntöisesti toisiaan: kaupungin kokonaislämmöntuotanto kasvaa kiinteistökohtaisen jäteveden LTO:n yleisyysasteen kasvaessa, vaikka keskitetyn laitoksen tuotanto vähenee. Vertailua varten ajatut skenaariot pelkällä passiivisella LTO:lla saatiin sopivalla lämmönsiirtimen tehokkuudella vastaamaan kohtuullisen hyvin lähdeartikkelin tuloksia (kokonaislämmöntuotannon kasvu) vastaavilla yleisyysasteilla. Lämpöpumpuskenaarioiden osalta kokonaislämmöntuotannon kasvu on verrokkiartikkelissa kuitenkin huomattavasti maltillisempaa, mikä voi johtua lämpöpumpujen mallintamisen eroista tutkimusten välillä, tai muista mallinnukseen tai mallinnettujen alueiden eroihin liittyvistä syistä.

9.6 Käyttövesiverkon lämpöpumppu

Tutkimuksessa arvioitiin Turun käyttövesiverkoston mahdollisesti asennettavan lämpöpumpun lämmöntuottopotentiaalia, sekä vaikutuksia kiinteistöjen käyttöveden lämmitystarpeeseen. Esitetyt tulokset perustuvat Fluidit Oy:n tekemiin verkostolaskelmiin Turun verkostomallilla. Laskelmien perusteella käyttövedestä otettavalla lämmöllä, joka laskisi verkostoon syötettävän veden lämpötilaa 4 °C:lla, ei olisi merkittävää vaikutusta kiinteistöjen käyttöveden lämmitysenergiatarpeeseen. Laskelmien mukaan kylmän veden lämpötila asettuu hyvin lähelle kulloistakin maan lämpötilaa riippumatta verkostoon syötetyn veden lämpötilasta. Suurimmillaan lämpöpumpun jäädyttävä vaikutus kiinteistöille tulevan kylmän veden lämpötilaan olisi suuruusluokaltaan 0.5 °C ja vuotuinen vaikutus jäisi tätäkin pienemmäksi. Tämä jäähtymä vastaa alle 1 % käyttöveden lämmitysenergiatarpeen vuotuista lisäystä. Lämpöpumpun vuotuiseksi lämmitysenergian tuottopotentiaaliksi arvioidaan 150 GWh/a, joka vastaa noin 8 %:n osuutta Turun Seudun Energiantuotanto Oy:n kaukolämmön tuotannosta. Lämpöteknisesti paras sijainti lämpöpumpuille olisi ennen Saramäen ja Laakkarin kalliosäiliöitä, koska virtaama- ja lämpötilaolosuhteet olisivat tällöin vakaimmat. Mitä lähemmäksi kulutuspeiteitä lämpöpumput asennettaisiin, sitä enemmän virtaamat ja lämpötilat vaihtelevat. Veden lämpötilat, jotka siis seuraavat maan lämpötiloja, laskevat keväällä jopa niin alas (< 4 °C), että lämmön hyödyntäminen estyy. Jos käyttövedettä pystytään hyödyntämään myös jäädytykseen, on lämmityspotentiaalia teoreettisesti mahdollista kasvattaa jopa kaksinkertaiseksi. Samalla saataisiin lisäarvoa jäädytysenergian myynnistä. Edellä esitetty lämmitysenergiapotentiaalinen kaksinkertaistaminen onnistuisi antamalla käyttöveden ensin lämmitä jäädytysprosessissa lyhytaikaisesti (8 °C -> 12 °C), jonka jälkeen vesi jäädytettäisiin lämpöpumpulla alle alkuperäisen lämpötilan (12 °C -> 4 °C).

Lähdeviitteet

- Abdel-Aal, M. *et al.* (2018) "Modelling the potential for multi-location in-sewer heat recovery at a city scale under different seasonal scenarios," *Water Research*, 145, pp. 618–630. doi:10.1016/j.watres.2018.08.073.
- Abdel-Aal, M. *et al.* (2019) "Potential influence of sewer heat recovery on in-sewer processes," *Water Science and Technology*, 80(12), pp. 2344–2351. doi:10.2166/wst.2020.061.
- Ahmed, K., Pylsy, P. and Kurnitski, J. (2015) "Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings," *Energy and Buildings*, 97, pp. 77–85. doi:10.1016/J.ENBUILD.2015.03.051.
- Ahmed, K., Pylsy, P. and Kurnitski, J. (2016) "Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings," *Solar Energy*, 137, pp. 516–530. doi:10.1016/J.SOLENER.2016.08.033.
- Ahonen, M. (2021) *Effects of wastewater heat recovery on nitrogen removal in Finnish wastewater treatment plants*. Master's thesis. Aalto University. Available at: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2021121910944>.
- Arnell, M. and Saagi, R. (2020) *Modelling of Heat Recovery Equipment*. Lund.
- ATHCO-Engineering A/S | Customized Process Equipment (no date). Available at: <https://www.athco-engineering.dk/> (Accessed: April 25, 2022).
- Blokker, E.J.M., Vreeburg, J.H.G. and van Dijk, J.C. (2010) "Simulating Residential Water Demand with a Stochastic End-Use Model," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), pp. 19–26. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000002.
- Cecconet, D. *et al.* (2019) "Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy," *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 116*, 12(1), p. 116. doi:10.3390/SU12010116.
- Degefa, M.Z. *et al.* (2018) "Data-driven Household Load Flexibility Modelling: Shiftable Atomic Load," *Proceedings - 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT-Europe 2018* [Preprint]. doi:10.1109/ISGTEurope.2018.8571836.
- EcoDrain (no date). Available at: <https://ecodrain-worldwide.com/en/> (Accessed: April 25, 2022).
- Ecopal – Älykkäät energiaratkaisut (no date). Available at: <http://ecopal.fi/en/ecowec-stain-solid-energy-costs/> (Accessed: April 25, 2022).
- Energy from Wastewater - HUBER SE (no date). Available at: <https://www.huber.de/products/energy-from-wastewater.html> (Accessed: May 4, 2022).
- Ensavetec - Energy Saving by Shower water - Intelligent Floor Drain (no date). Available at: <https://www.ensavetec.com/> (Accessed: April 25, 2022).
- Golzar, F., Nilsson, D. and Martin, V. (2020) "Forecasting Wastewater Temperature Based on Artificial Neural Network (ANN) Technique and Monte Carlo Sensitivity Analysis," *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 6386*, 12(16), p. 6386. doi:10.3390/SU12166386.

Golzar, F. and Silveira, S. (2021) "Impact of wastewater heat recovery in buildings on the performance of centralized energy recovery – A case study of Stockholm," *Applied Energy*, 297, p. 117141. doi:10.1016/J.APENERGY.2021.117141.

Hadengue, B. *et al.* (2021) "In-building heat recovery mitigates adverse temperature effects on biological wastewater treatment: A network-scale analysis of thermal-hydraulics in sewers," *Water Research*, 204, p. 117552. doi:10.1016/J.WATRES.2021.117552.

Hepbasli, A. *et al.* (2014) "A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems," *Energy Conversion and Management*, 88, pp. 700–722. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2014.08.065.

Hillebrand, S. (2015) *Entwicklung eines stochastischen Abwasseranfallmodells zur Untersuchung von Wärmerückgewinnungsszenarien [Development of a Stochastic Wastewater Generation Model for Investigating Heat Recovery Scenarios]*. BSc Thesis. Leopold Franzens University Innsbruck, Austria.

Kaukolämpötilasto - Energiateollisuus (no date). Available at: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view> (Accessed: June 1, 2022).

Kauppi, K. (2020) *Alueellisen vedenhankintajärjestelmän energiahöydyntäminen - Turun Seudun Vesi*. EnerSys CM Oy, (23).

Korhonen, A. *et al.* (2020) "Kestävä vedenkäyttö – vedenkäyttöselvitys."

Nykvist, A. (2012) *Värmeåtervinning ur spillvatten i befintliga flerbostadshus*. KTH.

Pitkänen, A. (2022) *Jätevesiverkoston lämmönsiirtosimulaattorin kehitys ja hukkalämmön talteenoton mallintaminen*. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Available at: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202202252161>.

Recoup WWHRs - Waste Water Heat Recovery (WWHRs) for showers (no date). Available at: <https://recoupwwhrs.co.uk/> (Accessed: April 25, 2022).

Reyes, D. (2019) "Modelling heat recovery from urban wastewater systems - Case study from Malmö."

Saagi, R. *et al.* (2022) "City-wide model-based analysis of heat recovery from wastewater using an uncertainty-based approach," *Science of The Total Environment*, 820, p. 153273. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2022.153273.

Sitzenfrei, R., Hillebrand, S. and Rauch, W. (2017) "Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems," *Water Science and Technology*, 75(5), pp. 1243–1250. doi:10.2166/wst.2016.598.

Soto, P.D. (2015) *Improvement of the energy efficiency of a drain water heat exchanger*. Student thesis. University of Gävle.

Stamminger, R. and Schmitz, A. (2017) "Load profiles and flexibility in operation of washing machines and dishwashers in Europe," *International Journal of Consumer Studies*, 41(2), pp. 178–187. doi:10.1111/ijcs.12325.

THERMOWATT LTD. (no date). Available at: <https://www.thermowatt-global.com/pages/technology> (Accessed: April 25, 2022).

Wallin, J. (2021) "Case studies of four installed wastewater heat recovery systems in Sweden," *Case Studies in Thermal Engineering*, 26. doi:10.1016/J.CSITE.2021.101108.

Wärff, C. (2020) *Household Wastewater Generation Model*. Lund.

Wärff, C. *et al.* (2020) "Modelling heat recovery potential from household wastewater," *Water Science and Technology*, 81(8), pp. 1597–1605. doi:10.2166/wst.2020.103.

Wong, L.T., Mui, K.W. and Guan, Y. (2010) "Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong," *Applied Energy*, 87(2), pp. 703–709. doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.008.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen... 1010/2017 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX® (no date). Available at: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010> (Accessed: April 25, 2022).

Liite 1. Lasketut viemäriverkostojen lämpötilat taulukkoina.

Taulukko 15. Turun tapauksen lasketut rakennuksilta lähtevän jäteveden lämpötilat eri lämmöntalteenottoskenaarioilla.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
1	17.98	15.22	12.46	9.70	6.94	4.00
2	17.99	15.22	12.45	9.68	6.91	4.00
3	18.36	15.52	12.68	9.83	6.99	4.00
4	19.37	16.35	13.34	10.32	7.30	4.00
5	20.82	17.56	14.30	11.04	7.78	4.01
6	22.03	19.13	16.23	13.33	10.43	7.15
7	22.96	20.19	17.43	14.66	11.90	8.73
8	23.00	20.42	17.83	15.24	12.65	9.68
9	22.06	18.83	15.60	12.37	9.14	5.09
10	20.81	17.60	14.39	11.18	7.97	4.00
11	19.82	16.77	13.71	10.66	7.61	4.00
12	18.94	16.03	13.12	10.21	7.30	4.00

Taulukko 16. Turun tapauksen lasketut puhdistamolle tulevat jäteveden lämpötilat eri lämmöntalteenottoskenaarioilla.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
1	9.82	9.11	8.40	7.69	6.98	6.23
2	8.49	7.78	7.07	6.36	5.65	4.90
3	7.92	7.19	6.46	5.73	5.00	4.23
4	8.35	7.57	6.80	6.02	5.25	4.40
5	10.70	9.86	9.02	8.19	7.35	6.38
6	14.36	13.62	12.87	12.13	11.38	10.54
7	16.00	15.29	14.58	13.87	13.16	12.35
8	17.84	17.18	16.51	15.85	15.18	14.42
9	17.14	16.31	15.48	14.65	13.82	12.78
10	15.49	14.67	13.85	13.02	12.20	11.18
11	13.74	12.96	12.17	11.39	10.60	9.68
12	12.00	11.25	10.50	9.76	9.01	8.16

Taulukko 17. Turun tapauksen lasketut puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilamuutokset rakennusten eri lämmöntalteenottoskenaarioilla verrattuna tapaukseen ilman rakennusten lämmöntalteenottoa.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
1	0.00	0.71	1.42	2.13	2.84	3.59
2	0.00	0.71	1.42	2.13	2.85	3.59
3	0.00	0.73	1.46	2.19	2.92	3.69
4	0.00	0.77	1.55	2.32	3.10	3.95
5	0.00	0.84	1.67	2.51	3.35	4.32
6	0.00	0.74	1.49	2.23	2.98	3.82
7	0.00	0.71	1.42	2.13	2.84	3.65
8	0.00	0.66	1.33	1.99	2.66	3.42
9	0.00	0.83	1.66	2.49	3.32	4.36
10	0.00	0.82	1.65	2.47	3.30	4.32
11	0.00	0.78	1.57	2.35	3.13	4.06
12	0.00	0.75	1.49	2.24	2.99	3.84

Taulukko 18. HSY:n tapauksen lasketut rakennuksilta lähtevän jäteveden lämpötilat eri lämmöntalteenottoskenaarioilla.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
3	18.34	15.49	12.65	9.81	6.97	4.00
6	22.00	19.01	16.02	13.03	10.04	6.65
9	22.22	18.97	15.72	12.48	9.23	5.15

Taulukko 19. HSY:n tapauksen lasketut puhdistamolle tulevat jäteveden lämpötilat eri lämmöntalteenottoskenaarioilla.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
3	8.49	7.52	6.55	5.59	4.62	4.27
6	14.79	13.76	12.73	11.70	10.67	10.27
9	17.48	16.35	15.21	14.08	12.94	12.46

Taulukko 20. HSY:n tapauksen lasketut puhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilamuutokset rakennusten eri lämmöntalteenottoskenaarioilla verrattuna tapaukseen ilman rakennusten lämmöntalteenottoa.

Kuukausi	LTO 0 %, °C	LTO 25 %, °C	LTO 50 %, °C	LTO 75 %, °C	LTO 100 %, °C	100 % LP, °C
3	0.00	0.97	1.93	2.90	3.87	4.22
6	0.00	1.03	2.06	3.09	4.12	4.51
9	0.00	1.13	2.27	3.40	4.54	5.02