



Niklas Sinisalo

# Patterilämmitysverkoston lämpötila- tasojen optimointi lämmitysmuodon saneerauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

6.5.2022

## Tiivistelmä

Tekijä:	Niklas Sinisalo
Otsikko:	Patterilämmitysverkoston lämpötilatasojen optimointi lämmitysmuodon saneerauksessa
Sivumäärä:	69 sivua + 10 liitettä
Aika:	6.5.2022
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	Aki Valkeapää, Yliopettaja Oskari Loikkanen, Diplomi-insinööri

---

Tässä YAMK-insinöörityössä selvitetään saneerauskohteen vanhojen lämmitys-pattereiden hyödyntämispotentiaalia lämmitysmuodon saneerauksessa. Saneerauksessa uusitaan öljylämmitys maalämpöön. Pattereiden menoveden lämpötilatasoa halutaan maalämpöhankkeissa madaltaa, koska nykyisillä kiinteistölämpöpumpuilla ei tehokkaasti pystytä tuottamaan yhtä korkeita lämpötiloja kuin öljykattiloilla.

Pattereiden uusimispäätöksen tekee LVI-suunnittelija, usein vajailla tai puutteellisilla lähtötiedoilla. Vanhojen pattereiden lämmönluovutustehojen tarkastustavasta ei alalla ole yksimielistä näkemystä. Nopeilla tarkastustavoilla päädytään usein uusimaan kiinteistön kaikki patterit. Tässä työssä selvitetään vanhojen pattereiden luovutustehon optimointimahdollisuuksia tarkempien laskentatapojen kautta. Työn tavoitteena on selvittää, tuleeko esimerkki kiinteistön patterit uusia maalämpöön siirryttäessä.

Tämä opinnäytetyön tilaaja on Sweco Talotekniikka Oy. Swecolla kehitetään dynaamiseen laskentaohjelmaan perustuvaa maalämpökytkentäkaavioiden simulointityökalua. Tämän työn esimerkki kiinteistön maalämpöjärjestelmä simuloidaan laskentaohjelmalla ja arvioidaan ohjelman soveltuvuutta todellisen saneerauskohteen näkökulmasta.

Avainsanat: Lämmityspatteri, lämmitys, lämpötilatasot, saneeraus, simulointi

## Abstract

Author: Niklas Sinisalo  
Title: Temperature optimization in radiator network in heating renovation  
Number of Pages: 69 pages + 10 appendices  
Date: 6.5.2022

Degree: Master of Engineering  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Professional Major: HVAC Engineering  
Supervisors: Aki Valkeapää, Principal Lecturer  
Oskari Loikkanen, Master of Science

---

This master's thesis looked into the potential of using old water-based radiators when changing from oil-based heating to geothermal heating. The supply temperatures of the radiators would need to be lowered because geothermal heat pumps designed for property would not be able to supply as high water temperatures as energy-effectively as the oil-based heating sources could. The aim was to establish whether the old radiators really need to be replaced in renovations.

This thesis calculated manually using different methods radiators water temperatures and heating powers. Using manually calculated water temperatures this thesis simulated the schematics of the geothermal heat pump chosen for the property with a dynamic calculation programme under development. These complex calculations were implemented on the case property to determine whether it was possible to use lower water temperatures in its radiators.

The results of the thesis calculations are used in the future development of the calculation programme so that it can be used in renovation projects.

Keywords: Radiator, heating, temperatures, renovation, simulation

# Sisällys

Lyhenteet

Alkusanat

1	Johdanto	1
2	Tutkimussuunnitelma	2
2.1	Tutkimusmenetelmät ja tulosten hyödyntäminen	2
2.2	Rajaukset ja työssä tarkisteltavat muuttujat	3
3	Öljylämmitysjärjestelmän toimintaperiaate	5
4	Maalämpöjärjestelmän toiminta- ja mitoitusperusteet	6
4.1	Maalämmön lainsäädäntö ja ohjeet	8
4.2	Lämpöpumppuprosessi	9
4.3	Lämpöpumppumitoituksen lähtötietotarpeet saneerauksissa	11
4.4	Maalämpöpumppumitoitus	12
4.5	Lämmin käyttövesi ja varaajat	14
4.6	Lisälämmitys ja tilalämmitysjärjestelmän varaaja	15
4.7	Energiakaivot	15
4.8	Tilalämmitysjärjestelmät	16
4.9	Sähköjärjestelmä	18
4.10	Muut huomioon otavat asiat saneerauskohteissa	18
5	Esimerkkikiinteistö	19
5.1	Nykyiset talotekniset järjestelmät ja tehdyt energiatehokkuusparannukset	21
6	Lämmitysjärjestelmän lämpötilatasojen optimointi	21
6.1	Lämpöhäviölaskelma	24
6.2	Pattereiden mitoitusperiaatteet ja esimerkkikiinteistön patterit	29
6.3	Pattereiden luovutustehon tarkastus yksinkertaisella tavalla	32
6.4	Vanhojen pattereiden lämpötilatasojen optimointi	34
6.5	Pattereiden lämpötilatasojen optimointi, osa pattereista uusitaan	41
6.6	Uusien pattereiden mitoitus	45

7	Esimerkkikiinteistön energiantarpeet ja MLP-mitointi	48
7.1	Maalämpöjärjestelmän ja energiakaivojen mitointi	48
8	Kytkäkaavion simulointi dynaamisella laskentaohjelmalla	49
8.1	Kytkäkaavio	50
8.2	Simuloinnin säädä	51
8.3	Simulointiohjelman käyttö	52
8.4	Energiamallin muokkaus simulointia varten	54
8.5	Simulointi ja tulokset	56
8.6	Parametrien muutoksen vaikutus simulointituloksiin.	57
8.6.1	Lämmitysvaraajan tilavuuden muutos.	58
8.6.2	Sähkökattilan tuotantolämpötilan rajoitus	60
8.6.3	Lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan tuotantolämpötilan rajoitus	61
8.7	Simuloinnin yhteenveto	62
9	Johtopäätökset ja tulosten analysointi	64
	Lähteet	70

## Liitteet

Liite 1: Lämpöhäviölaskelman tulokset

Liite 2: Simulointitulokset

## Lyhenteet

MLP:	Maalämpöpumppu
LIV:	Ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysjärjestelmä. Käsittää ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin, putkistot, pumput ja venttiilit.
LV ja LVK:	Lämmin käyttövesi ja lämpimän käyttöveden kierto.
q <sub>50</sub> -luku:	Rakennusvaipan ilmanvuotoluku, yksikkö m <sup>3</sup> /(h*m <sup>2</sup> )
U-arvo	Lämmönläpäisykerroin, yksikkö W/m <sup>2</sup> *K. Arvoa käytetään muun muassa rakenteen läpi johtuvan energiamäärän laskennassa.
COP:	<i>Coefficient of Performance</i> , on lämpökerroin, jolla kuvataan, miten moninkertaisen määrän lämpöenergiaa lämpöpumppu tuottaa itse kuluttamaansa sähköenergiaan verrattuna.
SPF:	<i>Seasonal Performance Factor</i> , lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian ja kuluttaman sähköenergian vuotuinen suhde, kun energiankulutus lasketaan koko vuoden lämmöntarpeesta.

## **Alkusanat**

Tämä YAMK-opinnäytetyö on kirjoitettu työnantajalleni Sweco Talotekniikka Oy:lle. Työn ohjasivat DI Oskari Loikkanen ja Yliopettaja Aki Valkeapää.

Kiitos kaikille, jotka ovat olleet osana prosessia. Haluan erityisesti kiittää Oskaria, joka jakoi tukea ja auttaa raskaassa ja tiukassa aikataulussa. Oskari osasi auttaa ja ohjata työn oikeaan suuntaan, kun työ oli lähteä sivuraiteille. Erityiskiitos kuuluu myös perheelle, ilman heidän tukeaan olisi kirjoitusprosessi ollut huomattavasti raskaampi pandemian keskellä.

Opintojen aikana entinen työnantajani Optiplan Oy yhdistyi Swecoon. Haluan kiittää kaikkia nykyisiä ja aikaisimpia esimiehiäni tasapuolisesti siitä, että Optiplaniilla alkunsa saaneen opinnäytetyön aiheen lisäarvo tunnistettiin myös Swecolla. Aiheen työstämistä jatkettiin, vaikka työnantaja vaihtui. Kiitos myös esimiehilleni siitä, että ovat mahdollistaneet joustavan työn ja opintojen yhteensovituksen.

Erityiskiitos kuuluu myös tässä työssä käytetyn esimerkkikiinteistön omistajaorganisaatiolle, joka tunnisti työn tuoman lisäarvon tulevalle maalämpöhankkeelle ja jotka salli kiinteistönsä tutkimisen työssä. Ilman esimerkkikiinteistöä olisi työstä tullut periaatteellinen, nyt tuloksia voidaan suhteuttaa todelliseen rakennukseen.

Helsingissä 6.5.2022

*Niklas Sinisalo*

## 1 Johdanto

Maalämpöön siirtyessä saneerauskohteissa tulee selvittää vanhojen vesikierrosten pattereiden uusimistarve. Pattereiden menoveden lämpötilatasoja halutaan maalämpöhankkeissa madaltaa, koska nykyisillä kiinteistölämpöpumpuilla ei tehokkaasti ja hyvällä hyötysuhteella pystytä tuottamaan yhtä korkeita lämpötiloja kuin öljykattiloilla. Lämmitysjärjestelmien lämpötilat optimoimalla, lisätään maalämpöpumpun vuosittaista energiapitoa, kokonaishyötysuhdetta ja vähennetään lisälämmittimien, kuten sähkökattiloiden ja sähkövastusten käyttöä. Kappaleessa 3 käsitellään öljylämmityksen toimintaperiaatteita, kappaleessa 4 maalämmön toimintaperiaatteita sekä suunnitteluprosessia saneerauskohteiden näkökulmasta. Kappaleessa 5 esitellään tämän työn esimerkikiinteistö ja kappaleessa 7 kiinteistön maalämpöjärjestelmä.

Tämä opinnäytetyön tilaajana toimii Sweco Talotekniikka Oy. Swecolla havaittiin tarve kehittää pattereiden tehojen tarkastelutapaa sekä laskentaprosessia. Pattereiden uusimispäätöksen tekee LVI-suunnittelija aikaisessa hankesuunnitteluvaiheessa, usein vajailla tai puutteellisilla lähtötiedoilla. Patteritehojen tarkastustavasta ei alalla ole yksimielistä näkemystä. Päätös pattereiden uusimisesta tehdään usein nopeilla ja yksinkertaisilla tarkastustavoilla, joiden perusteella tehdään helposti päätös pattereiden uusimisesta. Tämän työn kappaleessa 6 selvitetään vanhojen pattereiden luovutustehojen optimointimahdollisuuksia sekä tarkemman laskentatavan vaikutusta pattereiden uusimispäätökseen.

Swecolla on käynnissä kehitysprojekti, jossa maalämpökytkentäkaavioiden dynaamista laskentaohjelmaa räätälöidään Swecon tarpeiden mukaiseksi. Simulointiohjelma on tätä työtä kirjoitettaessa kehitysvaiheessa; ohjelma perustuu uudishankkeisiin. Tämän työn esimerkikiinteistön tulevaa maalämpöjärjestelmää tarkastellaan simulointiohjelmalla ja arvioidaan ohjelmistoversion soveltuvuutta todellisen saneerauskohteen näkökulmasta. Tarkoituksena on simuloida esimerkikiinteistön maalämpöjärjestelmä tässä työssä laskettuja lämmitysverkoston lämpötilatasoja hyödyntäen ja vertailla tuloksia toisiinsa. Tämän työn

kappaleessa 8 käsitellään simulointiohjelmaa, sen käyttöä ja vertaillaan simulointituloksia.

## 2 Tutkimussuunnitelma

Työn tavoitteena on selvittää ja vertailla esimerkkikiinteistön vanhan patterilämmitysjärjestelmän saneerausvaihtoehtoja energiamuotoa vaihdettaessa. Tarkoituksena on kehittää LVI-suunnittelijalle toimintatapa, jota seuraamalla pystytään aikaisessa hankesuunnitteluvaiheessa määrittämään lämmitysjärjestelmälle tarvittavat saneeraustoimenpiteet ja toimintalämpötilat. Työn toisena tavoitteena on selvittää kytkentäkaavioiden dynaamisen simulointiohjelman soveltuvuus saneerauskohteille. Työn tärkeimmät tutkimuskysymykset ovat:

*Millä toimenpiteillä vanha patterijärjestelmä saadaan toimimaan tehokkaasti uuden maalämpöjärjestelmän kanssa?*

*Soveltuuko tämänhetkinen simulointiohjelman versio saneerauskohteiden kytkentäkaavion simulointiin?*

Patterilämmitysverkoston lämpötilatasojen madaltamisesta energiamuotoa vaihdettaessa, ei alalla ole yksiselitteistä näkemystä tai selkeää toimintatapaa. Aihetta käsittelevät julkisesti saatavat julkaisut ovat pitkälti muita opinnäytetöitä, jotka käsittelevät aihetta ohimennen tai toteavat, että aihetta tulisi tutkia tarkemmin. Tämän työn tavoitteena on tuoda aiheen moniulotteisuus esille. Työ tarjoaa lukijalle kokonaisvaltaisen kuvan siitä, mitä maalämpöön siirryttäessä tulisi huomioida vanhojen pattereiden saneerauspäätöstä tehdessä.

### 2.1 Tutkimusmenetelmät ja tulosten hyödyntäminen

Tavoitteena on avata tutkimuskysymysten moniulotteisuutta ja tuoda lukijan tietoisuuteen lämpötilatasojen muuttamisen tuomat mahdollisuudet ja haasteet esimerkkikiinteistön avulla. Työn tarkoituksena on tuoda esille eri asiantuntijoiden tietotaitoa ja niin sanottua hiljaista tietoa, joka tällä hetkellä on yksittäisen

suunnittelijan saatavilla vain, jos hän osaa kysyä oikean kysymyksen oikealta henkilöltä. Tavoitteena on myös tuoda Swecon henkilöstön tietoisuuteen kytkentäkaavioiden dynaaminen laskentaohjelma, jonka kehitys on tätä työtä kirjoittaessa käynnissä. Työssä selvitetään laskentaohjelman rajoitteet ja vahvuudet. Laskentaohjelman kehitysryhmässä on pääsääntöisesti ollut energiasuunnittelijoita, tämän työn kautta saadaan laskentatyökalua koskevia kehitysideoita myös LVI-suunnittelijan näkökulmasta.

Tämän työn lähteinä käytetään jo kirjoitettuja tieteellisiä julkaisuja, määräyksiä, asetuksia, asetuksiin perustuvia ohjeita, RT-kortteja, esimerkkikiinteistön MLP-hankesuunnitelmaa, kiinteistön omistajaorganisaatiolta saatuja sekä kohdekäynnillä havaittuja lähtötietoja. Työssä tehdään laskelmia pattereiden menolämpötilojen optimoimiseksi, selvitetään uudet menovesien lämpötilakäyrät, lasketaan lämpöhäviöitä sekä selvitetään rakennuksen vaipan tiiveyden ( $q_{50}$ -luvun) vaikutusta lämpöhäviöihin. Uusien lämpötilakäyrien perusteella selvitetään dynaamisen laskentaohjelman soveltuvuus todelliseen saneerauskohteeseen.

## 2.2 Rajaukset ja työssä tarkisteltavat muuttujat

Työssä tarkastellaan tutkimuskysymyksiä esimerkkikiinteistön avulla. Itse kiinteistö, kiinteistön vanha talotekniikka ja sijainti määrittävät pitkälti tämän tutkimuksen sisällön. Menoveden lämpötilan alentaminen vaikuttaa kiinteistön maalämpö- ja lämmitysjärjestelmiin monella tavalla. Kappaleissa 3 ja 4 käsitellään yleisemmällä tasolla öljy- ja maalämpöjärjestelmien toimintaperiaatteita.

Työssä käsitellään saatavilla olevaa kirjallisuutta, paljon laskettua numeerista sekä simulointiohjelman tuottamaa dataa. Työn sisältö oli rajattava sekä jätettävä asioita tarkistelun ulkopuolelle. Rajaukset tehtiin kuitenkin niin, että tulokset ja vertailtavat vaihtoehdot olisivat mahdollisimman luotettavia ja periaatteellisesti monistettavissa muihin kohteisiin. Työssä tarkistellaan seuraavia tapauksia ja muuttujia:

- Lämpöhäviölaskelmat:
  - Tarkastelu tehdään neljälle huoneelle.
  - Lämpöhäviöt lasketaan ulkolämpötila-alueella  $-26^{\circ}\text{C}$  -  $+20^{\circ}\text{C}$  kahden asteen välein.
  - Lämpöhäviölaskelmille tehdään herkkyystarkastelu  $q_{50}$  luvun vaikutuksesta lämpöhäviöihin.
- Patterilämmitysverkoston optimointi:
  - Vanhojen pattereiden luovutustehon yksinkertainen tarkastustapa, jossa meno- ja paluulämpötilat määritetään.
  - Vanhojen lämmityspattereiden luovutustehot optimoidaan, lasketaan paluulämpötilat.
  - Osa pattereista uusitaan, muut optimoidaan.
  - Kaikki lämmityspatterit uusitaan ja suunnitellaan matalammille lämpötilatasoille.
- Simulointiohjelman tarkastelun muuttajat:
  - Lämmitysverkostojen lämpötilatasojen vaikutus MLP-laitteiden toimintaan.
  - Lämmitysverkostojen varaajan tilavuuden muuttamisen vaikutus MLP-laitteiden toimintaan.
  - Sähkökattilan tuottaman veden lämpötilan asetusarvon rajoittamisen vaikutus MLP-laitteiden toimintaan.
  - Lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan veden lämpötilan asetusarvon rajoittamisen vaikutus MLP-laitteiden toimintaan.
- Muut rajaukset:
  - Koko kiinteistön kattavaa lämpöhäviölaskelmaa ei tehdä. Laskelma tehdään neljälle huoneelle.
  - Maalämpöjärjestelmää ei tässä työssä mitoiteta. Järjestelmän mitoitustietoina käytetään Sweco Talotekniikka Oy:n tekemää maalämmön hankesuunnitelmaa.
  - Maalämpöjärjestelmän kytkentäkaavion putkikytkentää ei vaihdeta simulointivaihtoehdoille. Kytkentämuutokset tulee tehdä ohjelmistokehittäjän toimesta.

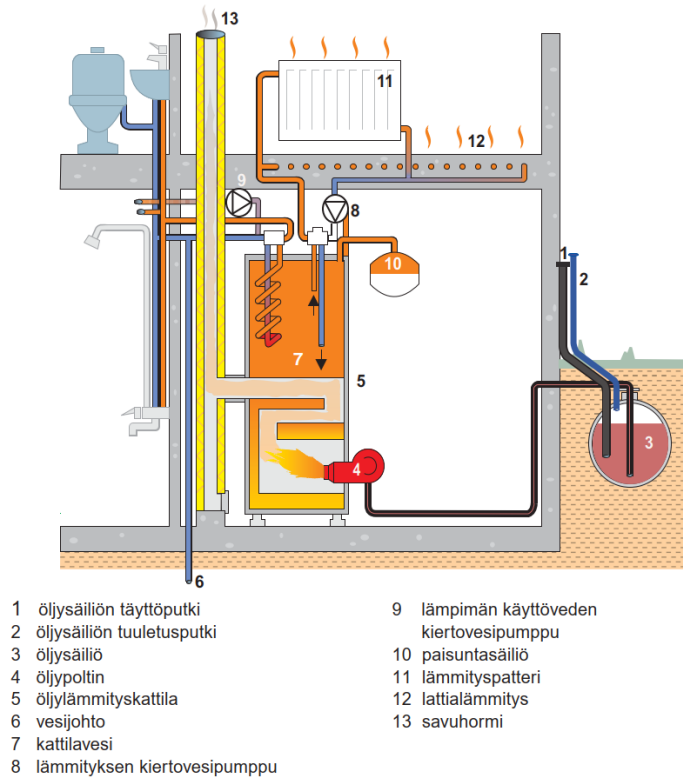
Erillistä suunnittelijoiden käyttöön saatavaa kokonaisvaltaista työkalua on työn tulosten perusteella lähes mahdotonta tehdä tutkimuskysymysten moniulotteisuuden takia. Työkaluun jouduttaisiin tekemään liikaa oletuksia, joiden takia tulosten luotettavuus kärsisi, tästä syystä laskelmat on tehtävä kohteen todellisilla tiedoilla. Työssä tehdään yksittäisille osakokonaisuuksille laskentatyökaluja, joita voi hyödyntää tulevissa suunnittelutoimeksiannoissa Swecolla.

### 3 Öljylämmitysjärjestelmän toimintaperiaate

Öljylämmitysjärjestelmässä käytetään polttoaineena kevyttä polttoöljyä. Öljylämmitysjärjestelmän pääkomponentit ovat:

- Öljysäiliö
- Öljylämmityskattila

Säiliö sijoitetaan yleisesti asuinrakennuksissa rakennuksen ulkopuolelle maan alle (kuva 1 s. 6 kohta 3). Öljylämmityskattila on öljypolttimen (kuva 1 kohta 4) ja kattilan (kuva 1 kohta 5) muodostama yksikkö, jossa öljyn palamisesta muodostuvalla lämpöenergialla lämmitetään vettä (kuva 1 kohta 7). Lämmitetty kattilavesi pumpataan kiinteistön lämmitysjärjestelmien käyttöön (kuva 1 kohdat 8, 11 ja 12). Lämmin käyttövesi lämmitetään kierukalla kattilavedessä vesien sekoittumatta (kuva 1 kohdan 7 vasemmassa reunassa). Öljykattilalla pystytään tuottamaan korkeita menovedenlämpötiloja. Öljylämmitteisten kiinteistöjen tilalämmitysjärjestelmät ovat mitoituslämpötiloiltaan tyypillisesti 70/40 °C, 80/50 °C tai 90/60 °C. (Rakennustieto RTS, 2005, s. 2, 4, 5)



Kuva 1. Öljylämmitysjärjestelmän toimintaperiaate (Rakennustieto RTS, 2005, s. 5).

#### 4 Maalämpöjärjestelmän toiminta- ja mitoitusperusteet

Tässä kappaleessa käsitellään yleisellä tasolla maalämpöjärjestelmän mitoittamista ja suunnitteluprosessia suuremmissa kiinteistöissä suunnittelijan näkökulmasta. Kappaleissa 5 ja 7 esitellään tässä työssä tarkasteltavaa maalämpöjärjestelmää ja sen mitoittamista.

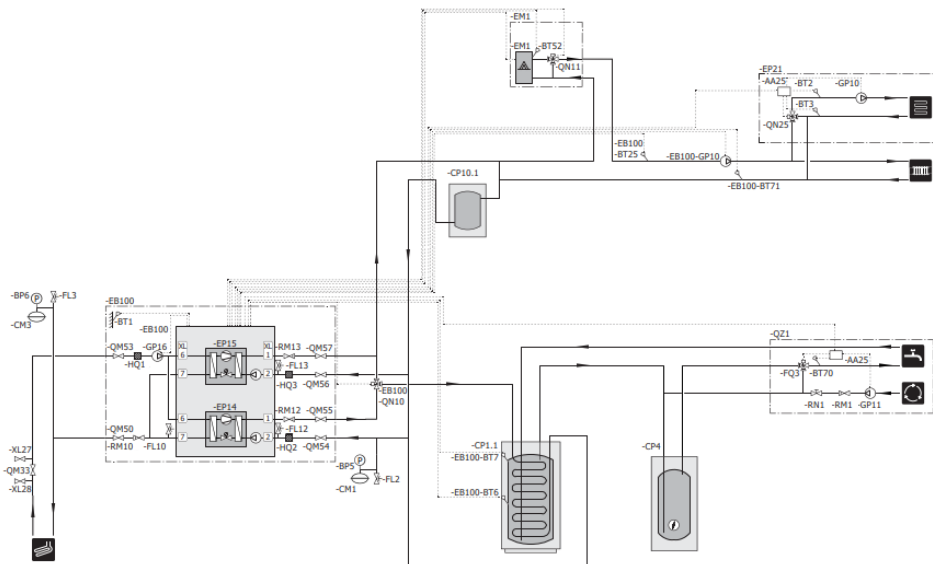
Maalämpöjärjestelmien suunnittelusta ja mitoituksesta on saatavilla rajoitetusti tieteellisiä julkaisuja ja ohjeita. Usein järjestelmien suunnittelu jää LVI- ja energiasuunnittelijoiden vastuulle. Monella lämpöpumpputoimittajilla on omia suunnitteluohjeita ja ohjelmia suunnittelijoiden avuksi. *Ympäristöministeriö (Janne Juvonen ja Toivo Lapinlampi)* on julkaissut oppaan vuonna 2013 maalämmön hyödyntämisestä pientaloissa. Oppaan periaatteita voidaan soveltaa myös isommissa kiinteistöissä (Ympäristöministeriö, 2013). Kuvassa 2 s. 7 on Nibe

Oy:n F1345 maalämpöpumpun kytkentäkaavio, laitetoimittajan suunnitteluohjelmasta. Kuva on periaatekuva, jossa järjestelmän pääkomponentit on esitetty (Nibe, 2022).

Maalämpöjärjestelmän pääkomponentit kuvassa 2 vasemmalta oikealle ovat:

- Energiakaivot
- Lämpöpumpputyksikkö (EB100)
- Varaajat (CP10.1, CP1.1 ja CP4)
- Lisälämmittimet; EM1 sähkökattila ja CP4 sähkövastukset varaajassa.

Maalämpöjärjestelmässä kerätään maaperään varastoitua aurinkoenergiaa kiertämällä nestettä putkissa energiakaivoissa. Lämmennyt neste johdetaan maalämpöpumpulle. Lämpöpumpussa sähköllä toimiva kompressorit tuottaa kuumaa vettä. Kappaleessa 4.2 käsitellään lämpöpumpun toimintaa tarkemmin. Kompressorin tuottama kuuma vesi varastoidaan varaajiin, josta energiaa johdetaan järjestelmien käyttöön. Järjestelmässä käytetään usein kylmimpien ajan-kohtien lämpimän veden riittävyyden takaamiseksi sähköistä lisälämmitystä, kuten sähkökattilaa ja sähkövastuksia. (Helen, 2021)



Kuva 2. Nibe F1345 maalämpöjärjestelmän periaatekytkentäkaavio. (Nibe, 2022)

#### 4.1 Maalämmön lainsäädäntö ja ohjeet

Pelkän lämpöpumpun kytkeminen esimerkiksi öljykattilan tilalle ei yleensä vaadi rakennusvalvonnan lupahakemusta (Helsingin kaupungin rakennusvalvonta, 2021, s. 9). Maalämpöjärjestelmän energiakaivojen poraus vaatii aina rakennusluvan tai toimenpideluvan (Rakennustieto RTS, 2018, s. 3). Lupahakemukseen on muun muassa liitettävä: laskelma energian riittävydestä kyseisellä kaivomäärällä sekä asemapiirustus, johon on merkitty kaivojen sijainnit tontilla. Hankkeelle tulee ilmoittaa koulutustasoltaan ja työkokemukseltaan riittävän pätevä vastuullinen suunnittelija. (Helsingin kaupungin rakennusvalvonta, 2021)

Rakennusten lämmitysjärjestelmille ei juurikaan ole lainsäädäntöä tai ohjeistusta viranomaisilta. *Energiateollisuus ry* on kerännyt julkaisuhetkellä ajantasaiset lainsäädännöt K1 julkaisuun (Energiateollisuus ry, 2021). *Ympäristöministeriön asetuksessa 1010/2017* määritellään uudisrakennukselle tai yli 50 m<sup>2</sup> laajennuksen energiankulutuksen laskentatavan. (Ympäristöministeriö, 2017a). *Ympäristöministeriö* on julkaissut asetusta tukevan ohjeen, jossa esitetään käytännössä, miten energialaskenta suoritetaan (Ympäristöministeriö, 2017b).

Käytäntö on osoittanut, että riittävän lämmitysjärjestelmän mitoitus jää usein suunnittelijoiden vastuulle. Kaukolämpökohteissa kaukolämpökaaviot toimitetaan paikallisella energiatoimittajalla hyväksyttäväksi. Maalämpöjärjestelmän kytkentäkaavioita ei yleensä toimiteta rakennusvalvontaan tai energialaitokselle, jolloin laitteiston mitoituksen varmistus jää pelkästään suunnittelijaorganisaation vastuulle.

K1 julkaisussa (Energiateollisuus ry, 2021) ja *Rakennustieto RTS* RT-kortissa LVI 11-10624 (Rakennustieto RTS, 2018) käsitellään lämpöpumppujen hybridijärjestelmiä, joissa lämpöpumpun rinnalle asennetaan kaukolämpösiirrin. K1 ja LVI 11-10624 julkaisuja voidaan osittain soveltaa myös lämpöpumppuhankkeissa, joissa kaukolämpöön ei liitytä. Lainsäädännön vähyys mahdollistaa lämpöpumppukohteissa suunnittelijoiden normaalista poikkeavien tai räätälöityjen ratkaisujen toteutuksen. Suunnittelijoiden on laskennallisesti osoitettava, että

normaalista poikkeavilla ratkaisuilla päästään asetusten ja ohjeiden mukaisiin sisäolosuhteisiin. (Ympäristöministeriö, 2017a)

## 4.2 Lämpöpumppuprosessi

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti lämpöpumppuprosessin tai toiselta nimeltään kylmätekni- sen kierto- prosessin toimintaperiaatteet.

Lämpöpumppujen toimintaperiaate perustuu kylmätekni- seen kierto- prosessiin, jossa kompressorin avulla siirretään lämpöä matalammasta lämpötilasta korke- ampaan. Prosessissa käytetään kylmäaineita, jotka ovat nesteytettyjä kaasuja. Kylmäaineita käytetään lämpöpumpuissa niiden olomuodon muuntautumisky- vyn takia. Kun aine muuttuu nesteestä höyryksi, kykenee se sitomaan energiaa ympäriltään. Kylmäaineen muuttuessa höyrystä nesteeksi luovuttaa se sidotun energian ympäristöönsä. Kylmäaineiden olomuodon muutosta hyödyntäen voi- daan suuriakin energiamääriä siirtää pienillä massavirroilla. Aineen olomuotoon vaikuttaa siihen kohdistuva paine sekä lämpötila. Kylmätekni- stä prosessia voi- daan tarkastella ja laskea kylmäainekohtaisen *log p,h-tilapiirroksen* avulla. (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 17-19)

Kaikissa lämpöpumpuissa on vähintään seuraavat neljä pääkomponenttia:

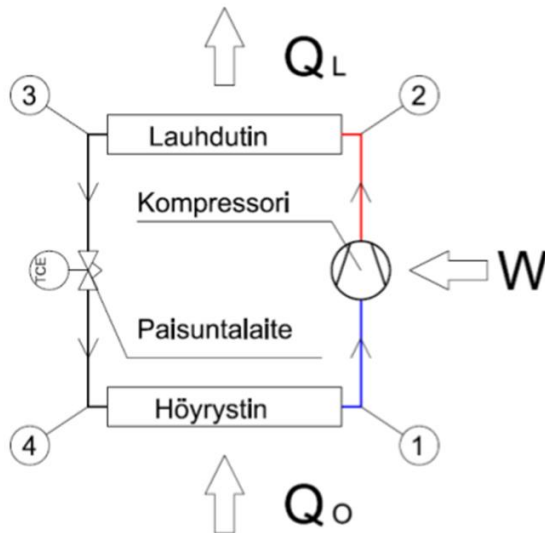
- kompressori
- lauhdutin
- paisuntalaite
- höyrystin.

Höyrystimessä matalapaineinen ja matalalämpötilainen kylmäaine sitoo it- seensä energiaa maapiiristä saapuvasta nesteestä (kuva 3 s. 11,  $Q_0$ ), jolloin kylmäaine lämpenee ja höyrystyy (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 50). Maalämpöjärjestelmissä käytetään lämmönsiirtimiä höyrystiminä ja lauhdut- timina, joissa energia siirtyy aineesta toiseen ilman fyysistä sekoittumista (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 50, 55-56 , 59-60). Lämmennyt, matalapaineinen höyry imetään putkessa kompressorille (kuva 3 s. 11, kohta 1).

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Siirrettäessä lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeaan tulee prosessissa tehdä työtä, eli lisätä energiaa. Kylmäteknisessä prosessissa työ on kompressorin käyttämä sähköenergia (kuva 3 s. 11, [W]). Kompressorin nostaa kylmäaineen paineen höyrystymislämpötilasta lauhtumislämpötilaan. Paineenkorotus nostaa kylmäaineen lämpötilaa huomattavasti, jolloin aine tulistuu ja muuttuu höyryksi. (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 18, 50-51)

Kompressorilta tulistunut korkealämpötilainen ja korkeapaineinen höyry siirtyy lauhduttimelle (kuva 3 s. 11, kohta 2). Lauhduttimessa kuumasta höyrystä siirretään energiaa esimerkiksi veteen ja lämmitysjärjestelmien käyttöön (kuva 3  $Q_L$ ). Lauhduttimessa höyrystynyt kylmäaine tiivistyy takaisin nesteeksi, eli lauhtuu. Korkeapaineinen ja jäähtynyt neste johdetaan paisuntalaitteelle (kuva 3 kohta 3). (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 18, 50, 55-56)

Paisuntalaitteessa jäähtyneen ja korkeapaineisen nesteen painetta alennetaan. Nesteestä osa höyrystyy paisunnassa, jolloin kylmäaineen lämpötila laskee entisestään. (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 18, 50) Paisuntalaitteelta osittain höyrystynyt, matalalämpöinen ja matalapaineinen kylmäaine johdetaan höyrystimelle (kuva 3 s. 11, kohta 4), josta kiertoprosessi alkaa alusta. (Kaappola;Hirvelä;Jokela;& Kianta, 2015, s. 17-18)



Kuva 3. Kylmäteknisen kierto-prosessin periaate (Kaappola, 2021).

#### 4.3 Lämpöpumppumitoituksen lähtötietotarpeet saneerauksissa

Lämpöpumppujärjestelmän mitoituksessa käytetään uudisrakennuksissa energiankulutuksen lähtötietoina laskennallisia arvoja (Ympäristöministeriö, 2017a, s. 8, 15 §). Saneerauksissa suositellaan käytettäväksi toteutuneita energiankulutustietoja, kuten järjestelmän kuluttamaa öljymäärää. Kulutetun öljymäärän perusteella voidaan rakennuksen todellinen energiankulutus ja tehontarve arvioida. Lämpöpumppujärjestelmää suunniteltaessa tulisi suunnittelijoiden käyttöön toimittaa useamman vuoden eritelty energiakulutushistoria, ettei järjestelmää mitoiteta poikkeusvuoden tiedoilla (Rakennustieto RTS, 2018, s. 4). Mikäli kulutustietoja ei ole saatavilla, suositellaan energiatarpeen laskentaa dynaamisella laskentaohjelmalla, laatimalla kohteesta kolmiulotteinen energiamalli. Energiamallinnuksen lähtötiedot ovat tärkeitä. Hankkeeseen ryhtyvän on toimitettava kaikki saatavilla olevat tiedot rakenteista, tehdyistä saneerauksista sekä rakennuksen käyttöajat ja tilojen käyttötarkoitukset. Energiamallinnuksen teko vajaille lähtötiedoilla on riskialtista, esimerkiksi rakennuksen ilmatiiviyyden arviointi on haastavaa suorittamatta tarkemmittauksia. Vanhojen rakenteiden lämmönläpäisyarvot voivat poiketa alkuperäisistä suunnitelmista, jolloin energiamallinnuksen tulokset vääristyvät. (Ympäristöministeriö, 2013, s. 30).

Suunnittelijoiden käyttöön tulisi toimittaa käyttöveden kulutustiedot. Mikäli lämpimän käyttöveden veden osuutta kulutuksesta ei tiedetä, voidaan asuinrakennuksissa laskenta-arvona käyttää 40 % käyttöveden kokonaiskulutuksesta (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 26-27) (Rakennustieto RTS, 2018, s. 4). Saneerauskohteiden suunnittelussa päästään parhaaseen lopputulokseen mitä enemmän todellisia ja toteutuneita lähtötietoja rakennuksesta pystytään toimittamaan suunnittelijoille. IV-koneiden ja oviverhokojien tiedossa olevat tekniset tiedot tulee toimittaa suunnittelijoille yhdessä automatiikkasuunnitelmien kanssa. IV-koneiden ohjaus ja suunnitteluarvot vaikuttavat oleellisesti energiankulutukseen ja sen kautta uuden maalämpöjärjestelmän mitoitukseen. IV-koneiden ohjaustapa tulee huomioida maalämpöjärjestelmän suunnittelussa. Pakkaspuolituksella tai tarpeen mukaan ohjattujen IV-koneiden energiankulutus eroaa huomattavasti koneista, joka jatkuvasti käyvät samoilla ilmamäärillä. Lämmitysverkostojen lämpötilatasot ja mitoitus tiedot vaikuttavat oleellisesti maalämpömitoitukseen, lämpöpumpun hyötysuhteeseen sekä energiakaivojen mitoitukseen. (Rakennustieto RTS, 2018, s. 4) (Ympäristöministeriö, 2013, s. 30). Sähkön kulutustiedot ja keskuskaaviot tulisi toimittaa suunnittelijalle, jotta rakennuksen pääsulakkeiden ja tonttijohdon riittävyys voidaan varmistaa.

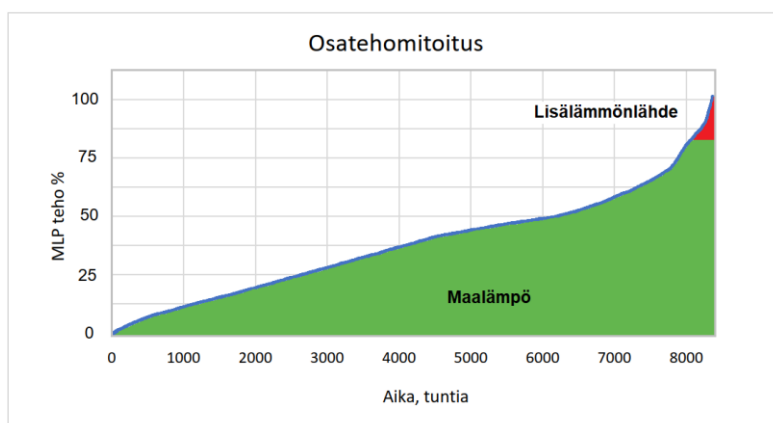
#### 4.4 Maalämpöpumppumitoitus

Maalämpöjärjestelmä mitoitetaan, kun rakennuksen energiatarve on tiedossa. Lämpöpumpun tehomitoitus on käyttö- ja investointikustannusten optimointia. Maalämpöjärjestelmän sekä mahdollisen lisälämmitysjärjestelmän (esimerkiksi sähkökattila) kokonaisenergiapetto ja huipputehomitoitus tulee kattaa koko rakennuksen energiankulutuksen ja tehontarpeen myös kylmimpinä ajanjaksoina. (Ympäristöministeriö, 2013, s. 31)

Itse maalämpöpumpun tehomitoitus kannattaa optimoida. Kohteesta riippuen käytetään joko täystehomitoitusta tai osatehomitoitusta. Täystehomitoitettu lämpöpumppu pystyy tuottamaan kylmimpinä ajanjaksoina rakennuksen tarvitseman huipputehon ilman erillisiä sähkövastuksia tai sähkökattiloita. Täystehomi-

toitettu lämpöpumppu käy suurimman osan vuodesta pienellä teholla. Lämpöpumpun tehonsäätöön tulee täystehomitoituksessa kiinnittää erityistä huomiota. Nykyisillä portaattomilla tehonsäädöllä varustetuilla lämpöpumpuilla täystehomitoitus on mahdollinen. Energiakenttä mitoitetaan täystehomitoituksessa huipputehon mukaan, joka kasvattaa kaivojen lukumäärää ja syvyyksiä. (Ympäristöministeriö, 2013, s. 30-31)

Yleisin mitoitustapa isommissa kiinteistöissä on osatehomitoitus. Osatehomitoitettu lämpöpumppu pystyy tyypillisesti tuottamaan 60–85 % rakennuksen tarvitsemasta huipputehosta. Tällä lämpöpumpulla, katetaan 90–98 % rakennuksen vuosittaisesta energiankulutuksesta, loput 2–10 % tuotetaan sähkövastuksilla tai sähkökattilalla. Kuva 4 esittää osatehomitoitetun maalämpöjärjestelmän energiaperiteon periaatteen ulkolämpötilan pysyvyyskäyrässä. Noin 80 % tehontarpeesta tuotetaan maalämpöpumpulla (vihreä alue), loput (punainen alue) tuotetaan lisälämmönlähteellä, esimerkiksi sähköllä. (tomallensenera, 2013) (Ympäristöministeriö, 2013, s. 30-31) Kappaleessa 7 esitellään tässä työssä tarkasteltavaa osatehomitoitettua maalämpöjärjestelmää.



Kuva 4. Osatehomitoitetun maalämpöjärjestelmän energiaperiteo ulkolämpötilan pysyvyyskäyrässä.

#### 4.5 Lämmin käyttövesi ja varaajat

Lämmintä käyttövettä (LV) voidaan tuottaa maalämpöjärjestelmällä monella tavalla, joko pelkällä maalämmöllä, pelkällä sähköllä tai näiden yhdistelmällä. Kylmää käyttövettä voidaan myös esilämmittää lämpöpumpun alijäähdyttimellä tai tilalämmitysverkoston vedellä siirtimellä tai kierukalla. Putkikytkentä tulee optimoida valitun vaihtoehdon mukaan. Yhteistä kaikille on kuitenkin se, että yleensä lämmintä käyttövettä varastoidaan varaajaan, jotta lämpöpumpun tehoa ei tarvitse kasvattaa kohtuuttoman suureksi. LV-varaajan koko tulee mitoittaa riittävän suureksi rakennuksen käyttöprofiili huomioiden. LV-varaajan putkikytkentää suunniteltaessa on huomioitava, että talousvesi ja lämmitysjärjestelmien vedet eivät saa sekoittua. Lämpimän käyttöveden kierron (LVK) häviöt huomioidaan maalämpömitoituksessa. LVK:n lämpöhäviöt ovat jatkuvia mutta teho yleensä pieni. LVK:n häviöistä muodostuu kuitenkin vuoden aikana huomattava energiamäärä. (Rakennustieto RTS, 2018, s. 10)

LV:n ja LVK:n putkikytkennän ja tuotantotavan suunnitteluun kannattaa käyttää aikaa. Lämpimän käyttöveden tarve on hetkittäistä ja ympärivuotista, eikä lämpöpumppua aina kannata käynnistää lämmityskauden ulkopuolella lyhyiksi ajoiksi. Joskus onkin elinkaarikustannusmielessä kannattavampaa tuottaa koko LV ja LVK suoralla sähköllä. Lämpimän käyttöveden lämpötilan tulee olla koko käyttövesijärjestelmässä vähintään 55°C. LV-verkoston syötettävä vesi saa olla enintään 65°C. LV-varaajassa oleva vesi voi olla yli 65°C, tällöin LV-verkoston syötettävä vesi tulee sekoittaa kylmään käyttöveteen ennen verkoston syöttämistä. LVK:n paluuvesi tulee olla vähintään 55°C. (Rakennustieto RTS, 2018, s. 10) LVK:n paluuveden lämpötilaksi voidaan kuitenkin saneerauskohteissa hyväksyä 50°C (Energiateollisuus ry, 2021, s. 60).

#### 4.6 Lisälämmitys ja tilalämmitysjärjestelmän varaaja

Lisälämmitystä tarvitaan osatehomoitetuissa järjestelmissä, koska lämpöpumppu ei pysty yksin kattamaan tehontarvetta kylmimpinä ajanjaksoina. Lisälämmitys voidaan toteuttaa joko varaajiin asennettavilla sähkövastuksilla, sähkökattilalla tai näiden yhdistelmällä. (Rakennustieto RTS, 2018, s. 9)

Lisälämmityksen teho tulee mitoittaa vähintään niin, että järjestelmän kokonais-teho (lämpöpumppu + lisälämmitys) kattaa koko tehontarpeen mitoituspakkasen aikana. Käytännössä lisälämmitys kannattaa ylimitoittaa, mikäli sähköjärjestelmä sen mahdollistaa. Ylimitoituksella voidaan kattaa mahdollisimman suuri energiamäärä lämpöpumpun vioittuessa tai huoltotoimenpiteiden aikana. (Rakennustieto RTS, 2018, s. 9)

Lämmitysverkostojen varaaja tai varaajat tulee mitoittaa riittävän suuriksi, jolloin lämpöpumpun käynnistymiskerrat voidaan vähentää minimiin. Varaajan mitoitukseen vaikuttaa muun muassa ilmanvaihtokoneiden ja oviverhopuhaltimien aiheuttamat hetkelliset tehopiikit (Rakennustieto RTS, 2018, s. 9). Lämpöpumppu, oikein mitoitettuna, käy pidempiä aikoja mutta harvemmin, tämä pidentää kompressorin käyttöikää.

Sähkökattilan ja lämmitysvaraajien putkikytkentöjen suunnittelussa pätee sama, kun lämpöpumpun putkikytkennässä; yhtä oikeaa tapaa ei ole, vaan kytkentä tulee optimoida kohde- ja laitekohtaisesti.

#### 4.7 Energiakaivot

Maalämpöpumpun mitoituksen rinnalla suunnitellaan ja mitoitetaan energiakaivot. Ympäristöministeriön ohjeen (Ympäristöministeriö, 2013) mukaan tärkeimmät energiakaivojen mitoituksessa huomioitavat seikat ovat:

- Kallion- ja maaperän koostumus ja rakenne.
- Pohjavesiolosuhteet
- Lämmitysjärjestelmien lämpötilatasot.

Edellä mainituista pohjavesiolosuhteet ovat merkittävimpiä. Energiakaivojen määrän ja syvyyksien mitoitus tulee käyttää siihen tarkoitettua mitoitus-/mallinnusohjelmaa. Mallinnusohjelmalla pystytään tarkistamaan kaivokentän lämpötilatason kehittymistä koko tarkasteltavan jakson aikana. Tarkastelu tulee tehdä, jotta kaivoista otettava energia ei ylitä kaivoon uusiutuvan energian määrää tarkastelujakson aikana. Mikäli energiaa otetaan kaivoista enemmän kuin niihin uusiutuu, voivat kaivot jäätyä. Tarkastelujakson pituus vaihtelee kohdekohtaisesti 20–100 vuoden välillä. Saneerauskohteissa tarkastelujakson pituus on yleensä 20–30 vuotta. Energiakaivojen mallinnusohjelmassa on pystyttävä huomioimaan: kallioperän lämmönsiirron ominaisuudet, energiakaivojen väliset etäisyydet, kaivojen muodostama konfiguraatio tontilla sekä kaivosta otettava ja sinne mahdollisesti ladattava energiamäärä (Rakennustieto RTS, 2018, s. 5-6). Kappaleessa 7.1 esitellään tässä työssä tarkisteltavan maalämpöjärjestelmän kaivokentän mitoitus 50 vuoden tarkastelujaksolle.

Kaivokentän mitoituksen lähtökohtana on kiinteistön todellinen energiantarve, lämpöpumpun vuosihyötysuhde ja huipputehontarve. Kaivojen sijoituksessa tontille tulee huomioida etäisyysuositukset toisista kaivoista, rakennuksista, tontinrajoista sekä muusta maanalaisesta tekniikasta. Suunnittelijan nyrkkisääntönä kannattaa pitää, mitä suurempi kaivokenttä, sitä tärkeämpää on kaivokentän optimointi. Kaivokenttä on maalämpöjärjestelmien yksi suurimmista yksittäisistä investointikohteista ja huolellisella optimoinnilla vältytään ali- tai ylimitoituksesta. Kaivokentälle suositellaan tehtäväksi TRT-mittaus (terminen vastetestti), jolla maaperän todellinen lämmönluovutus voidaan mitata. Kaivojen mitoitus suositellaan tarkistettavaksi TRT-testimittauksien perusteella.

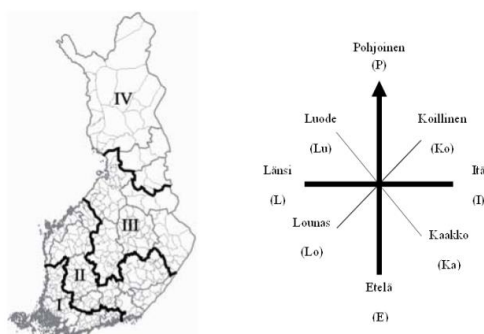
(Rakennustieto RTS, 2018, s. 6-7)

#### 4.8 Tilalämmitysjärjestelmät

Maalämpöjärjestelmään liitettäviksi tilalämmittimiksi soveltuvat parhaiten matalalämpöiset järjestelmät, esimerkiksi lattialämmitys. Vain harva nykyisistä kiinteistölämpöpumpuista pystyy tuottamaan yli 60 °C vettä tehokkaasti, hyvällä

hyötysuhteella. Maalämpöön voidaan liittää myös korkeammilla lämpötiloilla toimivia ilma- ja patterilämmitysjärjestelmiä. Tällöin korkeamman lämpötilan saavuttamiseksi käytetään edellisten kappaleiden mukaan sähkökattilaa tai sähkövastuksia. Saneerauskohteissa lämmityspattereiden riittävä lämmönluovutus tulee tarkistaa. Tarvittaessa tilalämmittimet vaihdetaan tehokkaampiin, järjestelmien lämpötilatasojen muuttuessa. (Ympäristöministeriö, 2013, s. 10) Esimerkikiinteistön tilalämmitysjärjestelmän riittävyttä ja saneerausvaihtoehtoja käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.

Tilalämmitysjärjestelmät mitoitetaan niin, että rakennukseen suunnitellut sisälämpötilat saavutetaan mitoitussulkolämpötilassa, auringon aiheuttamaa lämpökuormaa ei huomioida (Ympäristöministeriö, 2011, s. 16). Kuva 5 esittää vyöhykekohtaisesti ulkolämpötilan mitoitussulkolämpötilat. Suomi on jaettu neljään vyöhykkeeseen, Etelä-Suomessa, säävyöhykkeellä 1 mitoitettava ulkolämpötila on  $-26^{\circ}\text{C}$  ja Lapissa säävyöhykkeellä 4,  $-38^{\circ}\text{C}$ .



Kuva L1.1. Säävyöhykkeet ja ilmansuuntien lyhenteet.

Säävyöhyke	Mitoitettava ulkoilman lämpötila, °C
I	-26
II	-29
III	-32
IV	-38

Kuva 5. Säävyöhykekohtaiset mitoitussulkolämpötilat. (Ympäristöministeriö, 2017a, s. 17)

## 4.9 Sähköjärjestelmä

Kiinteistön nykyinen sähköjärjestelmä asettaa saneerauskohteissa usein rajoitteita uusille huipputehoiltaan suuremmille laitteille. Esimerkiksi vanhan öljylämmitysjärjestelmän tarvitsema sähköteho on lähes olematon lämpöpumppuun verrattuna. Maalämpöpumpun tuottamasta lämpöenergiasta noin 1/3 on lämpöpumpun käyttämää sähköenergiaa (SULPU, 2021). Käytännössä, 100 kW lämmitysenergiaa tuottavan lämpöpumpun sähköteho on noin 33 kW, kun saman tehoisen öljypolttimen sähköteho on alle 1 kW (Oilon, 2021). Lämpöpumpun lisäksi maalämpöjärjestelmässä (osatehomitoituksessa) käytetään sähkökattiloita ja/tai sähkövastuksia, joiden huipputehot tulee huomioida liittymiä, keskuksia ja sulakkeita suunniteltaessa ja tarkastaessa (Ympäristöministeriö, 2013, s. 30). Käytännössä on todettu, että maalämpöjärjestelmä vaatii aina muutoksia kiinteistön sähkökeskuksiin. Öljystä maalämpöön vaihdettaessa joudutaan lähes aina tekemään muutoksia liittymistehoon ja tonttijohtoon. Sähkön kulutustiedot ja keskuskaaviot tulee toimittaa suunnittelijalle, jotta rakennuksen pääsulakkeet ja tonttijohdon riittävyys voidaan varmistaa

## 4.10 Muut huomioitavat asiat saneerauskohteissa

Öljylämmitteisten rakennusten lämmönjakohuoneet ovat usein ahtaita uudelle maalämpöjärjestelmälle. Lämmönjakohuonetta joudutaan usein laajentamaan tai muuttamaan muita tiloja lämmönjakohuoneeksi. Huomioitavaa vanhan kattilahuoneen laajennuksessa on, että seinät ovat lähes aina palo-osastoituja. Ympäristöministeriön rakennusten paloturvallisuutta käsittelevä asetuksen 848/2017, 1.§ ja 4.§ mukaan, palo-osastoinnin muutos on rakennuslupan alaista työtä. Lämmönjakohuoneiden laajennukset tai siirtämiset voivat edellä mainitun mukaan vaatia rakennuslupaprosessin käynnistämisen.

Huomioitavaa on myös vanhan rakennuksen lämmönjakohuoneeseen johtava haalausreitti. Vanhojen rakennusten ovet ja portaat ovat usein ahtaita ja voivat aiheuttaa rajoitteita valittavien laitteiden suhteen, varsinkin, jos rakennus on

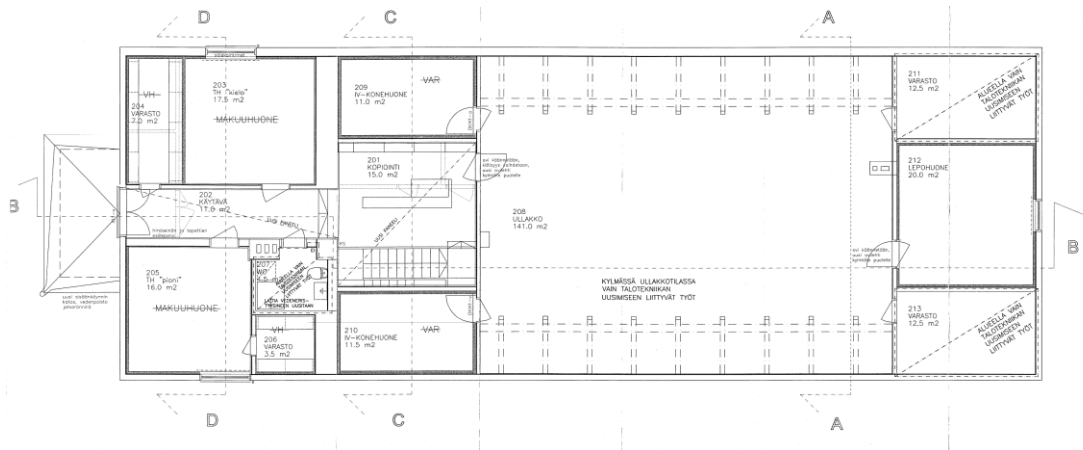
suojeltu eikä oviaukkoja voida laajentaa. Mikäli oviaukkoja ei voida laajentaa tulee laitteet valita niiden fyysisten kokojen perusteella, millä välttämättä ei saavuteta parasta lopputulosta.

Vanhat käyttämättömiksi jäävät öljysäiliöt suositellaan purettaviksi. Maa-asenteisten öljysäiliöiden ympäröivä maa-aines tulee tutkia. Mikäli maa-aines todetaan pilaantuneeksi, tulee se vaihtaa. Maa-aineen vaihdosta voi muodostua huomattavia kustannuksia.

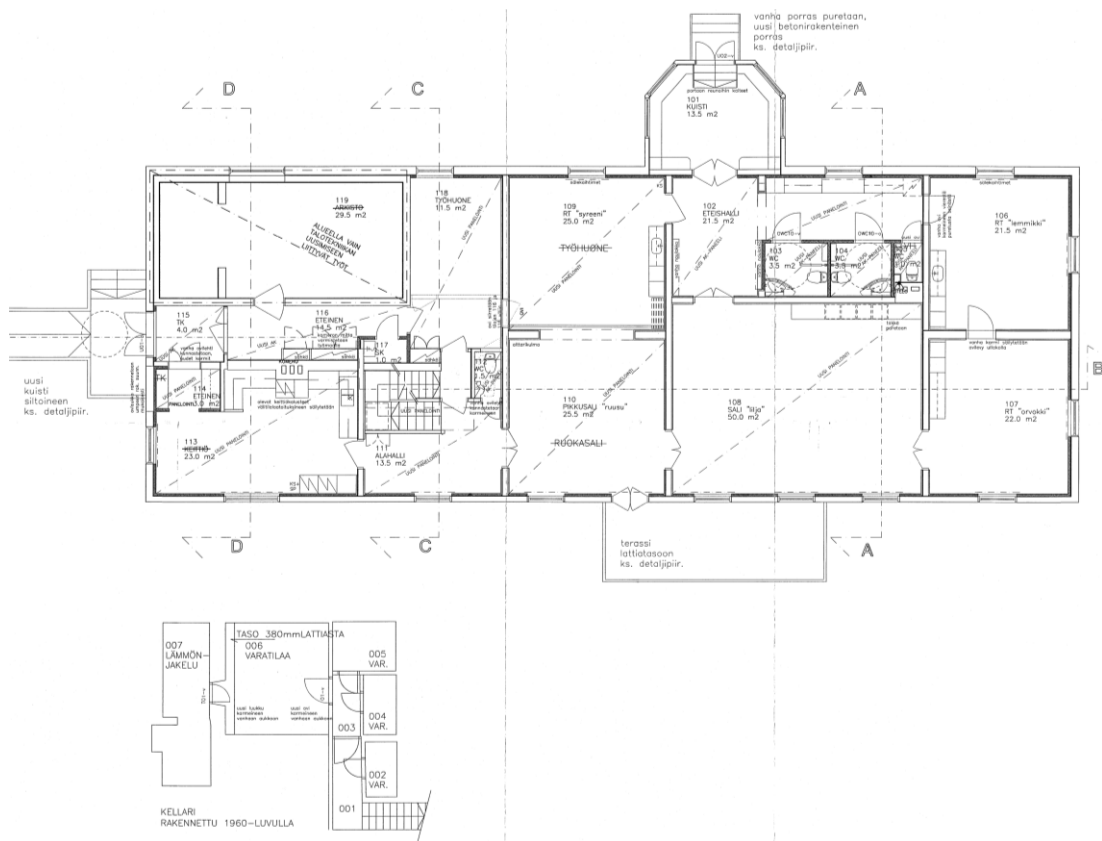
## 5 Esimerkkikiinteistö

Kiinteistö sijaitsee Vihdissä. Kiinteistö on hirsirakenteinen kaksikerroksinen rakennus osittaisella kellarikerroksella, rakennusvuosi 1855. Kiinteistöä on käytetty seurakunnan pappilana, tässä työssä kiinteistöstä käytetään nimeä *Pappila*.

Rakennuksen pinta-ala on 727 m<sup>2</sup> ja tilavuus 1712 m<sup>3</sup>. Yläkerta on osittain kylmää ullakotilaa (kuva 6 s. 20), ja kellarikerrosta on rakennuksen alla vain osittain (kuva 7 s. 20). Kellarikerroksessa sijaitsee nykyinen lämmönjakohuone ja varastotilaa. Kuvassa 7 esitetty ensimmäisen kerroksen arkkitehdin pohjapiirustus. Rakennuksessa on tehty muutoksia suunnitelman jälkeen, arkisto on muutettu keittiöksi, keittiö ei ole laitoskeittiö, vaan vastaa kotitalouskeittiötä. Tontilla sijaitsee ulkorakennus, johon uudet maalämpölaitteet sijoitetaan. Pappilan käyttö painottuu enimmäkseen päiväkäyttöön, lasten iltapäiväkerhotoimintaan ja erilaisten tilaisuuksien järjestämiseen. Laskelmissa Pappilan käyttöajoiksi on arvioitu: arkisin kello 8–21 ja viikonloppuisin kello 8–18. Rakennus ei ole majoituskäytössä.



Kuva 6. Esimerkkikiinteistön 2.kerros arkkitehdin pohjapiirustus vuodelta 2008 (Vihti, 2009)



Kuva 7. Esimerkkikiinteistön 1.kerros ja kellarikerroksen arkkitehdin pohjapiirustus vuodelta 2008 (Vihti, 2009)

## 5.1 Nykyiset talotekniset järjestelmät ja tehdyt energiatehokkuusparannukset

Pappilan lämmitys on toteutettu aluelämmityksellä, jonka energiamuotona toimii öljy. Aluelämmitysjärjestelmän öljykattilat sijaitsevat lähistöllä sijaitsevan rakennuksen lämmönjakohuoneessa, josta ne palvelevat Pappilan lisäksi muita lähistön rakennuksia. Energia johdetaan aluelämmityspotkilla Pappilaan. Pappilan lämmönjakohuoneessa on siirripaketti, josta energia siirretään järjestelmien käyttöön. Pappilassa on erilliset LIV- ja patterilämmitysverkostot. Lämmin käyttövesi tuotetaan siirtimellä.

Rakennuksen energiatehokkuutta on parannettu 2010-luvun vaihteessa. Ikkunat on uusittu, ulkoseiniä, alapohjaa, yläpohjaa ja kylmän ullakkotilan lämpimien tilojen vastaisia rakenteita korjattu ja lisäeristetty.

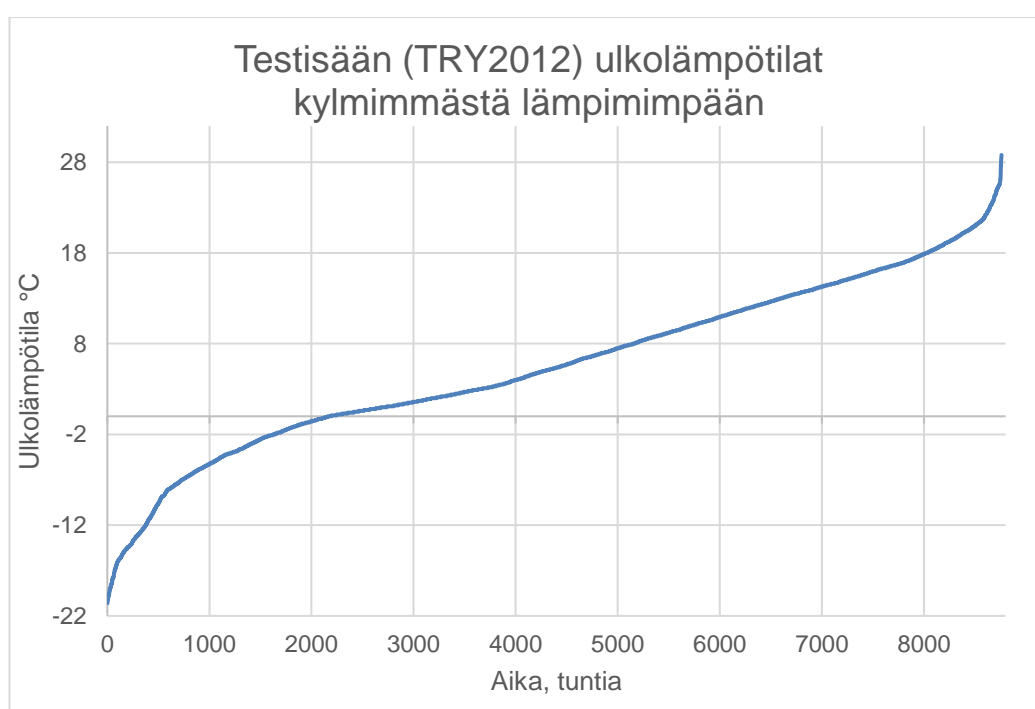
LVIA-tekniikka on saneerattu lähes kokonaisuudessaan 2010-luvun vaihteessa. Rakennukseen on lisätty koneellinen ilmanvaihto ristivirta LTO-laitteilla ja vesikiertoisilla lämmityspattereilla. IV-koneita on kaksi. IV-koneiden lisäksi kiinteistössä on kaksi huippuimuria, toinen palvelee kellaritiloja ja toinen alustatilaa. Patterilämmitysjärjestelmä on saneerattu kokonaisuudessaan. Kaikki putket, patterit ja termostaattiventtiilit on uusittu 2010-luvun vaihteessa. Automatiikkajärjestelmä on modernisoitu 2020-luvulla, talotekniikka on liitetty etävalvontajärjestelmään.

Sähköjärjestelmä on uusittu 2000-luvun vaihteessa. Sähköjärjestelmän liittymäkoko on 3x63 A. Käyttöpaikan huipputeho (yhden tunnin keskiarvo) on todettu mittauksen perusteella olevan 20.8 kW.

## 6 Lämmitysjärjestelmän lämpötilatasojen optimointi

Rakennuksen lämmitysjärjestelmä tulee mitoittaa niin, että rakennuksen suunnitellut sisäolosuhteet voidaan ylläpitää mitoitusulkolämpötilassa (Ympäristöministeriö, 2017a, s. 14 §32). Pappila sijaitsee säävyöhykkeellä 1, jolloin mitoitusulkolämpötila on -26°C (kuva 5 s. 17).

Dynaamisilla laskentaohjelmilla tehtävissä energialaskelmissa käytetään *Ilmatieteenlaitoksen* kehittämää testivuoden säädataa (TRY2012). Testisään dataan on koottu vuosien 1989–2018 tuntikohtaisista keskilämpötiloista. Mitatun tiedon perusteella on jokaiselle päivälle kerätty tuntikohtaisia sääolosuhteita, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin vuosien 1989–2018 keskimääräistä säätä (Honkala, 2021, s. 36). Vantaan testisäässä kylmin ulkolämpötila on  $-20,6\text{ °C}$ , lämpimin  $28,8\text{ °C}$  ja keskilämpötila  $5,6\text{ °C}$ . Alle  $0\text{ °C}$  lämpötiloja on yhteensä 2158 tuntia, eli noin 90 päivää. (Ilmatieteenlaitos, 2021) Kuva 8 esittää testisään ulkolämpötilat järjestettynä kylmimmästä lämpimämpään.



Kuva 8. Ilmatieteenlaitoksen testisään (TRY2012) ulkolämpötilat kylmimmästä lämpimämpään. (Ilmatieteenlaitos, 2021)

Koska TRY2012 kylmin ulkolämpötila on  $-20,6\text{ °C}$  ja asetusten mukaan, rakennuksen suunnitellut sisäolosuhteet tulee saavuttaa myös  $-26\text{ °C}$  lämpötilassa, ei TRY2012 säädataa voida suoraan käyttää pattereiden mitoituksessa. Tässä työssä tutkitaan seuraavasti, miten Pappilan lämmitysjärjestelmä soveltuu maalämpöjärjestelmälle:

- Lasketaan neljän esimerkkihuoneen lämpöhäviöt useassa eri ulkolämpötilassa,  $-26\text{ °C} \dots +20\text{ °C}$ .
- Selvitetään mihin ulkolämpötilaan,  $60\text{ °C}$  menovesi riittää, muuttamatta vanhojen pattereiden lämpötilaeroja.
- Selvitetään mihin ulkolämpötilaan,  $60\text{ °C}$  menovesi riittää, kun vanhojen pattereiden virtaamat ja lämpötilatasot optimoidaan.
- Selvitetään mihin ulkolämpötilaan,  $60\text{ °C}$  menovesi riittää, kun osa pattereista uusitaan.
- Selvitetään mikä menoveden lämpötila tulee olla kaikissa vaihtoehdoissa  $-26\text{ °C}$  ulkolämpötilassa.
- Selvitetään optimaaliset lämpötilatasot, kun kaikki patterit uusitaan.
- Lasketaan kaikille vaihtoehdoille uudet menoveden lämpötilakäyrät.

Pappilan pattereiden tarkistuksen lähtökohtana on, että maalämpöpumpulla voidaan tuottaa maksimissaan  $60\text{ °C}$  vettä. Yli  $60\text{ °C}$  menovesi edellyttää sähkökattilan käynnistämistä. Tarkastelulla halutaan selvittää mihin ulkolämpötilaan  $60\text{ °C}$  menovesi riittää ja mikä menoveden lämpötilan tulee olla  $-26\text{ °C}$  ulkolämpötilassa.

Kuvassa 9 s. 24 on esitetty Pappilan 1.kerroksen lämmitysjärjestelmän LVI-suunnitelmat vuodelta 2008. Kuvassa näkyy runkoputkien sekä pattereiden sijainnit, koot sekä patterikohtaiset tiedot. Kuva 10 s. 24 esittää tarkemmin huoneen 110 patterin tiedot; suunniteltu luovutusteho (kuva 10: 1080 W), valmistajan malli (kuva 10: C22), patterin korkeus ja pituus (kuva 10: 400–1100) sekä termostaattiventtiilin koko ja säätöarvo (kuva 10: TV10/0.15), kuva 10 luku 23 on juokseva numero. Suunnitelmassa esitetyt arvot perustuvat lämmitysverkon mitoituslämpötiloihin meno  $80\text{ °C}$  paluu  $50\text{ °C}$  ulkolämpötilassa  $-26\text{ °C}$ .



Suunnittelijoilla on harvoin todennettuja mittaustuloksia  $q_{50}$ -luvusta ja *ympäristöministeriön ohjeen* ohjearvoissa on suurta hajontaa (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 22). Suunnittelijat tekevät käytössä olevien lähtötietojen perusteella parhaan arvion  $q_{50}$ -luvusta ympäristöministeriön ohjearvojen perusteella. Tässä kappaleessa tehdään herkkyystarkastelu  $q_{50}$ -luvun vaikutuksesta lämpöhäviölaskelmien tuloksille.

Lämpöhäviölaskelma on tärkeä osa pattereiden optimointia. Lämpöhäviölaskelmien perusteella tiedetään mitkä huonekohtaisten patteritehojen tulee olla. Saaneerauskohteissa on usein vuosien varrella parannettu energiatehokkuutta vaihtamalla ikkunoita tai lisäeristämällä rakenteita. Energiaparannukset pystytään huomioimaan uusissa laskelmissa. Vanhojen pattereiden tehot on mitoitettu suunnitteluhetken lämpöhäviöiden perusteella, uudet tehot eroavat vanhoista, mikäli energiaparannuksia on tehty.

Tämän työn lämpöhäviölaskelmat on tehty ympäristöministeriön rakennusten energiatehokkuusohjeen mukaan (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 64-70). Liitteessä 1 on esitetty tätä työtä varten tehdystä Excel-työkalusta kuvakaappaus, jota käytettiin lämpöhäviölaskennassa. Työkalussa on viitattu käytettyyn kaavaan ympäristöministeriön ohjeesta. Pappilan lämpöhäviölaskelmien suurimpina epävarmuustekijöinä oli vaipan ilmanvuotoluku ( $q_{50}$ ) ja ikkunoiden lämmönläpäisyarvo (U-arvo). Ikkunoiden U-arvot arvioitiin oikeusministeriön ohjearvoista asennusvuoden perusteella (Oikeusministeriö, 2017, s. 9). Muut lähtötiedot perustuvat vanhoihin rakennesuunnitelmiin, joiden perusteella on pystytty laskemaan rakenteiden U-arvot ( $W/m^2K$ ) hankesuunnitteluvaiheessa. Taulukko 1 s. 26 esittää lämpöhäviölaskelmassa käytetyt lähtötiedot:

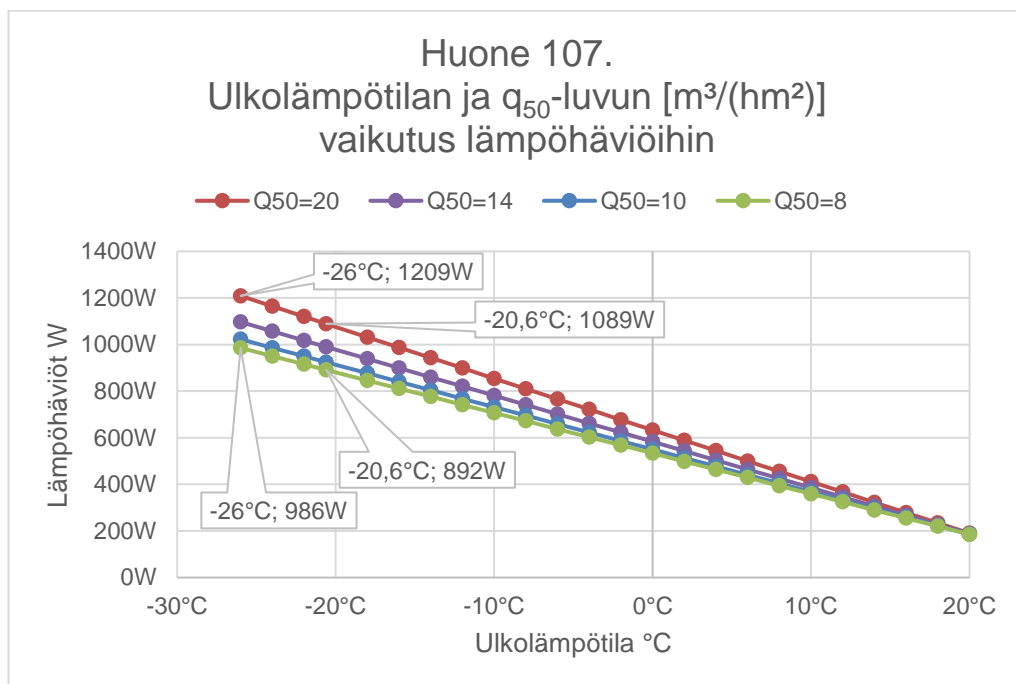
Taulukko 1. Lämpöhäviölaskelman lähtötiedot (Vihti, 2009).

Rakenne	U-arvo	Yksikkö
Ulko-seinä (US)	0,2055	W/m <sup>2</sup> K
Alapohja (AP)	0,1775	W/m <sup>2</sup> K
Yläpohja (YP)	0,1079	W/m <sup>2</sup> K
Lämpimien tilojen välipohja (VP1)	2,367	W/m <sup>2</sup> K
Ullakkotilan välipohja (VP2)	0,2	W/m <sup>2</sup> K
Ikkunat	2,1	W/m <sup>2</sup> K
Ulko-ovet	1,4	W/m <sup>2</sup> K
Kylmäsilta nurkka	0,06	W/mK
Kylmäsilta ikkunakarmi	0,04	W/mK
Kylmäsilta ulko-ovenkarmi	0,04	W/mK
Ilmanvaihdon tuloilman lämpötila	20	°C
Alapohjan alapuoleinen maa	3,4	°C
Sisälämpötila	21	°C
Alapohjatilan lämpötila	1,4	°C

Pappilan lämpöhäviölaskelman tärkeimmät tarkasteltavat ulkolämpötilat ovat: mitoitusulkolämpötilan -26 °C ja TRY2012 alin ulkolämpötila -20,6 °C. Lämpöhäviölaskelmia tehdessä ei ollut varmuutta, mihin ulkolämpötilaan 60°C menovedellä voidaan kattaa lämpöhäviöt. Edellä mainitusta syystä tehtiin lämpöhäviölaskemat kaikille ulkolämpötiloille kahden asteen välillä -26 °C - +20 °C.

Lämpöhäviölaskelma tehtiin Pappilaan neljälle huoneelle; 106, 107, 108 ja huoneille 109/110 (katso kuva 9 s. 24). Huoneet 109 ja 110 ovat samaa tilaa, huoneiden välissä on taittuva siirtoseinä (kuva 9). Huoneet 106 ja 107 ovat lämpöhäviöiden laskennan näkökulmasta käytännössä identtisiä peilikuvia toisistaan. Huoneet 106 ja 107 sisällytettiin tarkasteluun, koska vanhoissa suunnitelmissa patteritehot eroavat toisistaan.

Koska vaipan ilmastuotoluku oli epävarma, tehtiin herkkyytarkastelu eri  $q_{50}$ -luvuilla eri ulkolämpötiloissa. Laskennassa käytettiin  $q_{50}$ -lukuina 20,14,10 ja 8  $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$ , koska ympäristöministeriön ohjearvo heikolle ilmanpitävyydelle on 8–20  $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$  (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 22). Kuva 11 esittää  $q_{50}$ -luvun vaikutuksen huoneen 107 lämpöhäviöihin eri ulkolämpötiloissa. Liitteessä 1 on esitetty numeeriset arvot johon kuva 11 perustuu. Kuvan 11 perusteella voidaan todeta, että ilmastuotoluku vaikuttaa oleellisesti lämpöhäviöihin. Ulkolämpötilassa  $-26^\circ\text{C}$ ,  $q_{50}$ -luvun ollessa 20, on huoneen lämpöhäviö 1209 W ja  $q_{50}$ -luvulla 8 on huoneen lämpöhäviöt 986 W, ero on noin 23 %.  $q_{50}$ -luvun prosentuaalinen vaikutus lämpöhäviöihin ei ole vakio, mutta kuvasta 11 laskettuna ero 8 ja 20 välillä ulkolämpötila-alueella  $-26-0^\circ\text{C}$  on noin 19–23 %. Tässä työssä tullaan käyttämään  $q_{50}$ -arvona 20, millä laskelmiin saadaan pieni varmuuskerroin. Taulukossa 2 s. 28 esitetään lämpöhäviölaskelman tulokset huonekohteisesti eri ulkolämpötiloissa. Taulukosta nähdään, että lämpöhäviöt pienentyvät ulkolämpötilan lämmitessä. Kaikki numeeriset tulokset, eri  $q_{50}$ -luvuilla on esitetty liitteessä 1.

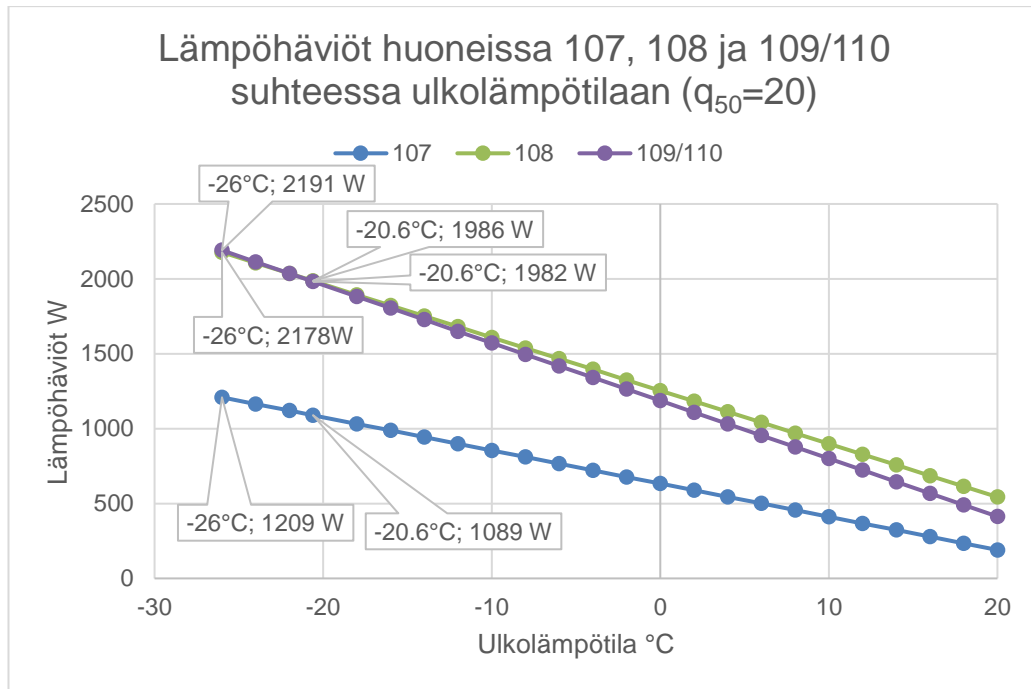


Kuva 11.  $q_{50}$ -luvun vaikutus lämpöhäviöihin huoneessa 107 ulkolämpötila-alueella  $-26-+20^\circ\text{C}$ .

Taulukko 2. Lämpöhäviöt huonekohtaisesti eri ulkolämpötiloissa,  $q_{50}$ - luvulla 20  $m^3/hm^2$ .

	<b>Lämpöhäviöt eri ulkolämpötiloissa, <math>q_{50}=20</math></b>						
<b>Huone</b>	-26 °C	-20,6 °C	-16 °C	-9 °C	-6 °C	-2 °C	+8 °C
106	1209 W	1089 W	987 W	832 W	702 W	544 W	456 W
107	1209 W	1089 W	987 W	832 W	702 W	544 W	456 W
108	2178 W	1986 W	1822 W	1574 W	1411 W	1143 W	970 W
109/110	2191 W	1982 W	1804 W	1534 W	1346 W	1058 W	877 W

Kuvassa 12 s. 29 on esitetty huoneiden 107,108 ja 109/110 lämpöhäviöt ulkolämpötila-alueella -26—+20 °C. Kuvasta 12 nähdään, että huoneiden 108 ja 109/110 lämpöhäviöt risteävät ulkolämpötilassa -22 °C, tämä johtuu alapohjan lämpötilasta, joka on laskelmassa staattinen. Ympäristöministeriön ohjeissa määritetään tuulettuvan alapohjan lämpötila vain mitoitustilanteessa (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 66). Tämän työn lämpöhäviölaskelmassa on käytetty alapohjan lämpötilana mitoitusulkolämpötilan arvoa (1,4 °C) kaikissa ulkolämpötiloissa, tämä lisää varmuuskerrointa laskelmaan.



Kuva 12. Huoneiden 107, 108 ja 109/110 lämpöhäviöt ulkolämpötilassa -26–+20 °C.

Lämpöhäviölaskelman perusteella voidaan todeta, että tässä työssä lasketut lämpöhäviöt ovat hieman suurempia kuin vanhoissa suunnitelmissa esitetyt patteritehot. Huoneen 107 vanhoissa suunnitelmissa esitetty tehontarve on 1170 W. Tämän työn laskelmien perusteella tulee huoneen 107 patteriteho olla 1209 W; ero on pieni ja selittyy erilaisten varmuuskertoimien käytöllä. Omistajaorganisaation kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella on tiedossa, että kiinteistössä ei ole ollut lämmitysongelmia edes kylmimpinä ajanjaksoina. Tämän työn lämpöhäviölaskelmia voidaan näin ollen käyttää seuraavien kappaleiden lähtötietoina pattereiden luovutustehoja tarkastaessa.

## 6.2 Pattereiden mitoitusperiaatteet ja esimerkkikiinteistön patterit

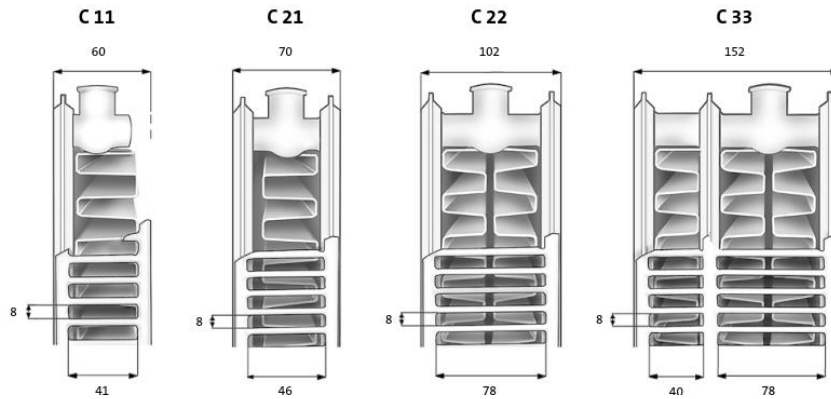
Rakennusten pattereiden fyysiset koot valitaan usein ikkunan leveyden perusteella, mutta patterin vesivirta ja lämpötilat mitoitetaan niin, että luovutusteho vastaa lämpöhäviöitä (Ympäristöministeriö, 2017b, s. 64) (Rakennustieto RTS,

2002). Yleinen mitoitustapa johtaa usein siihen, että patterissa on tehoa yli tarpeen, tästä syystä lämpöhäviölaskelmat tulee tehdä.

Patterin huoneeseen luovuttamaan lämmitystehoon (eli lämmönluovutustehoon tai tehoon) vaikuttaa sen pintalämpötila. Pintalämpötilaan vaikuttavat patterille tulevan veden lämpötila, huonelämpötila, patterin fyysinen koko, vesivirtaama sekä patterin lämmönluovutusominaisuudet. Lämmönluovutusominaisuuksiin vaikuttaa oleellisesti se, miten huoneilma pääsee virtaamaan patterin läpi. Patterin ilman virtausta hallitaan konvektiolevyillä, jotka sijaitsevat vesitäytteisten levyjen välissä tai takana (kuva 13 s. 31). (Seppänen, 2001, s. 168-170)

Vesivirtaamaa kasvattamalla voidaan patterin luovutustehoa kasvattaa, nostamatta menoveden lämpötilaa. Patteriin sisään ja ulos menevän veden lämpötilaero pienenee mitä suuremmaksi virtaamaa kasvatetaan, vaikutus ei ole lineaarinen (Seppänen, 2001, s. 168-170). Virtaaman kasvatus on optimointia, sillä liian suuri virtaama voi aiheuttaa ääniongelmia sekä huoneen yllämpenemistä. Mikäli rakennuksen pattereiden virtaamat eivät ole tasapainossa toisiinsa nähden, voi joissain huoneissa olla alilämpöongelmia samalla, kun toisessa on yllämpöongelma. Saneerauksissa tulee vanhojen säilytettävien putkien ja laitteiden kokojen riittävyys varmistaa kasvaville virtaamille.

Pappilan patterit ovat *Purmo Oy:n* valmistamia *Compact*-mallisia pattereita. Tarkisteltavien huoneiden patterit ovat malleja C11 ja C22. Kuvassa 13 s. 31 esitetty Compact patterin rakenne ylhäältä katsottuna. Patterimerkinnän (C11, C21 jne.) kirjain kuvaa mallia (Compact), ensimmäinen numero vesitäytteisten levyjen lukumäärän ja toinen numero konvektiolevyjen lukumäärän. (Seppänen, 2001, s. 160) (Purmo, 2018)



Kuva 13. Purmo Compact patterin rakenne (Purmo, 2018, s. 14).

Patterien luovutusteho tulee EN 442-standardin mukaan laskea logaritmisesta yllilämpötilasta (kaava 1). Valmistajat ilmoittavat esitteissään patterista saatavan tehon tietyllä yllilämpötilalla. Logaritmisella laskentatavalla tulokset ovat tarkempia, kun aikaisemmin käytetyllä aritermisellä laskentatavalla. (Harju, 2010, s. 105)

$$\Delta T = \frac{t_m - t_p}{\ln \frac{t_m - t_h}{t_p - t_h}} \quad (1)$$

$\Delta T$	Logaritminen yllilämpötila [°C]
$t_m$	Menoveden lämpötila [°C]
$t_p$	Paluuv veden lämpötila [°C]
$t_h$	Huoneen sisälämpötila [°C]

Mikäli suunnitteilla olevan patterin mitoituslämpötilat eroavat valmistajan esitteen lämpötiloista, voidaan uusi luovutusteho laskea kaavalla 2. Kaavalla voidaan esimerkiksi laskea patterin teho lämpötiloille 70/30/21°C ( $t_m/t_p/t_h$ ), kun esitteessä ilmoitetaan teho lämpötiloilla 60/30/20°C. Kaavan 2 suora käyttö edellyttää, että kaikki (uuden ja vanhan) lämpötilat ovat tiedossa.

Patterin, uusi lämmönluovutusteho voidaan laskea eroavista lämpötilatasoista kaavalla 2:

$$\Phi = \Phi_{ref} \cdot \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{ref}} \right)^n \quad (2)$$

$\Phi$	Patterin uusi luovutusteho uusilla lämpötiloilla [W]
$\Phi_{ref}$	Patterin vanha luovutusteho vanhoilla lämpötiloilla [W]
$\Delta T$	Uusi logaritminen yllämpötila, kaavalla (1) [°C]
$\Delta T_{ref}$	Vanha logaritminen yllämpötila, kaavalla (1) [°C]
$n$	LämmönluovutusekspONENTTI (laitevalmistajan esitteestä)

LämmönluovutusekspONENTTI vaihtelee patterin- ja valmistajakohtaisesti. EkspONENTTI on tyypillisesti noin 1,3 (Purmo, 2018). Pappilan vanhojen pattereiden ekspONENTIT on esitetty Purmon laskentatyökalussa (Purmo, 2007).

### 6.3 Pattereiden luovutustehon tarkastus yksinkertaisella tavalla

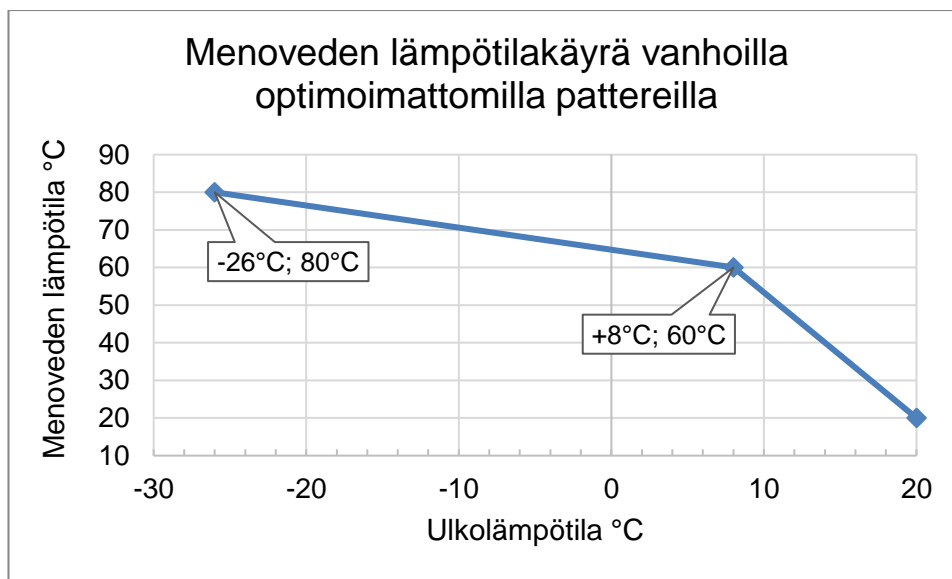
Mikäli meno- ja paluuveden lämpötilaero halutaan pitää samana ja menolämpötilaa pudottaa, voidaan Pappilan vanhojen pattereiden uutta lämmönluovutustehoa tarkastaa suoraan Purmon tehokalkulaattorilla (Purmo, 2007). Uusi luovutusteho voidaan myös laskea kaavoilla 1 ja 2. Alla esimerkki Pappilan huoneen 107, C11–400–1100 patterin luovutustehosta yksinkertaisella tarkastelutavalla, käyttämällä Purmon tehokalkulaattoria:

Vanhoilla lämpötiloilla 80/50/21 °C ( $\Delta T=42,24$ ) saadaan tehoksi 631 W.

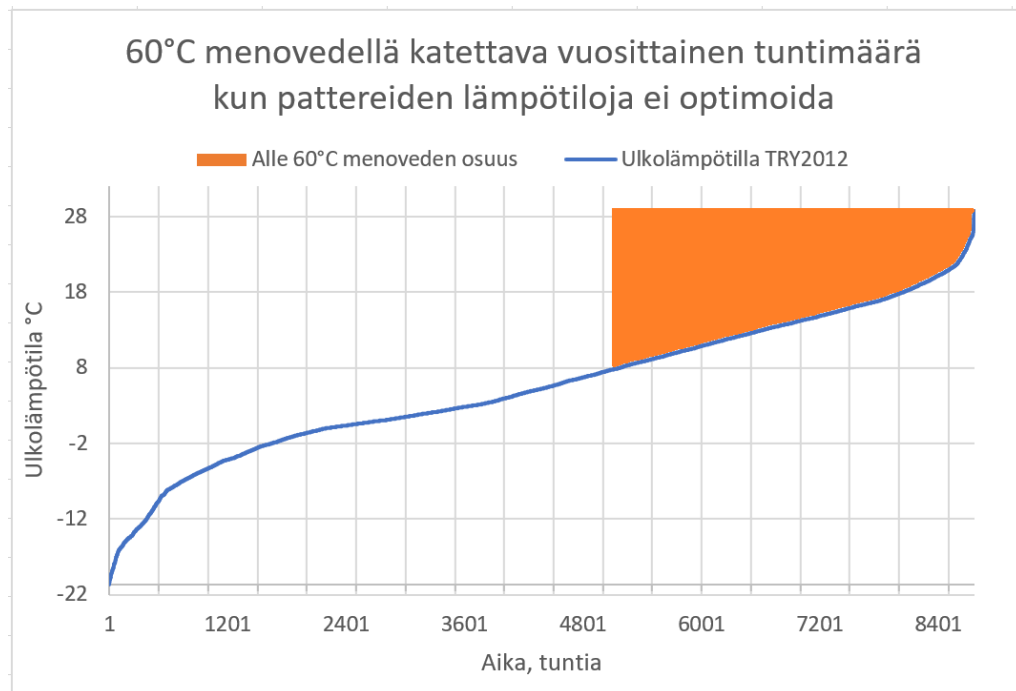
Uusilla lämpötiloilla 60/30/21 °C ( $\Delta T=20,46$ ) saadaan tehoksi 245 W.

Luovutusteho pienenee esimerkkipatterissa huomattavasti koska laskentatavassa ei kasvateta virtaamia. Taulukosta 2 s. 28, huoneen 107 lämpöhäviöitä tarkisteltaessa voidaan todeta, että kahdella 245 W patterilla pystytään kattamaan huoneen lämpöhäviöt vain yli +8 °C ulkolämpötiloissa. Pattereiden paluuv veden lämpötilan ja virtaaman optimointi kannattaa edellisen esimerkin perusteella tehdä. Vesien lämpötiloja ei tarkasteta tällä menetelmällä niin tarkasti, että voitaisiin sanoa, pystytäänkö menoveden lämpötilaa laskemaan mitoitusul-

kolämpötilassa. Tästä syystä lämpötilakäyrän mitoitusulkolämpötilan piste on pidettävä ennallaan. Uusi lämpötilakäyrä on esitetty kuvassa 14. Kuvasta 15 s. 34 nähdään, että alle 60 °C menovedellä, katetaan 3616 tuntia vuoden 8760 tunnista TRY2012 säädatasta, jonka osuus on noin 41 % koko vuoden tuntimäärästä. Mikäli suunnittelija hankesuunnitteluvaiheessa tarkastaa pattereiden riittävyyttä tämän kappaleen menetelmällä, päätyy hän poikkeuksetta ehdottamaan kaikkien kiinteistön pattereiden uusimista, vaikka todellisuudessa näin ei välttämättä tarvitsisi tehdä. Seuraavissa kappaleissa 6.4 ja 6.5 optimoidaan Pappilan pattereiden lämpötilatasoja kahdessa eri tilanteessa.



Kuva 14. Optimoimattomien pattereiden menoveden lämpötilakäyrä.



Kuva 15. Optimoimattomilla pattereilla katettava vuosittainen tuntimäärä alle 60°C menovedellä.

#### 6.4 Vanhojen pattereiden lämpötilatasojen optimointi

Pappilan runkoputkien kokojen tarkastuksen perusteella voidaan todeta, että vesivirtaamia voidaan nostaa kaikkialla jopa 30 % ilman, että painehäviö nousee yli 50 Pa/m, jota pidetään yleisesti maksimiarvona (Seppänen, 2001, s. 147). Kaikkien pattereiden virtaamaa ei kuitenkaan voida nostaa samalla prosenttimäärällä, tällöin osa pattereista luovuttaa liikaa lämpöä huoneeseen. Virtaamien kasvattaminen tulee tarkastella patterikohtaisesti, jolloin järjestelmä voidaan säätää tasapainoon.

Pappilan pattereille tulee laskea uudet virtaamat uudella menoveden lämpötilalla. Veden paluulämpötilaa ei tiedetä. Paluulämpötila tulee optimoida niin, että patterin lämmönluovutustehon ja sisälämpötila suhde ovat tasapainossa. Lämmönluovutustehoon vaikuttaa virtaama, meno-, paluu- ja huonelämpötila. Laskutoimenpide on monitavoiteoptimointia, eikä tätä voida ratkaista yhdellä yhtälöllä. Laskentaan käytetään kaavojen 1 ja 2 lisäksi seuraavia kaavoja:

Patterin paluulämpötila saadaan kaavalla 3, kun virtaama sekä menoveden lämpötila muuttuu:

$$t_p = t_m - \frac{q_{m,ref} \cdot (t_{m,ref} - t_{p,ref}) \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{ref}}\right)^n}{q_m} \quad (3)$$

$t_p$	Uusi paluueden lämpötila [°C]
$t_m$	Uusi menoveden lämpötila [°C]
$q_{m,ref}$	Vanha vesivirtaama, kaavalla (4) [kg/s]
$t_{m,ref}$	Vanha menoveden lämpötila [°C]
$t_{p,ref}$	Vanha paluueden lämpötila [°C]
$\Delta T$	Uusi logaritminen yllämpötila, kaava (1) [°C]
$\Delta T_{ref}$	Vanha logaritminen yllämpötila, kaava (1) [°C]
$n$	Lämmönluovutuseksponentti, laitevalmistajan esitteestä
$q_m$	Uusi vesivirtaama [kg/s]

$q_m$  saadaan kertomalla  $q_{m,ref}$  halutulla virtaamankasvatusprosentilla.

$$q_{m,ref} = \frac{\phi_{ref}}{c_p(t_{m,ref} - t_{p,ref})} \quad (4)$$

$q_{m,ref}$	Patterin vesivirtaama [kg/s]
$\phi_{ref}$	Patterin vanha luovutusteho vanhoilla lämpötiloilla [W]
$t_m$	Uusi menoveden lämpötila [°C]
$q_{m,ref}$	Vanhan patterin vesivirtaama [kg/s]

Kaavojen pohjalta tehtiin Excel-laskentatyökalu (katso kuva 16 s. 36). Koska patterin uutta paluueden lämpötilaa ( $t_p$ ) tarvitaan kaavassa 1 uutta yllämpötilaa ( $\Delta T$ ) laskettaessa ja yllämpötilaa tarvitaan paluueden lämpötilan laskentaan kaavassa 3, toteutettiin laskenta hyödyntämällä Excelin *Goal Seek*-toimintoa. Goal Seek hakee oikean  $t_p$  arvon muuttamalla arvaus solua ( $t_{p,arvaus}$ ), kunnes  $t_p$  ja  $t_{p,arvaus}$  ovat yhtä suuria (kuva 16).

Kuvassa 16 laskentatyökalua Excel-ohjelmassa, laskentasolujen viereiset numerot viittaavat tämän työn kaavoihin. *Vanhoihin tietoihin* täytetään patterin tiedot esitteistä,  $\dot{Q}_{ref}$  kohtaan täytetään patterista saatava maksimiteho esitteen mukaisella yllämpötilalla, ei vanhoissa suunnitelmissa esitettyä patterista otettavaa tehoa. Käyttäjä täyttää kaikki harmaat solut, ja painaa sinistä ”nappia”, josta työkalu suorittaa automaattisesti Goal Seek-laskelman. Laskennan tulokset esitetään *Tulokset* taulukossa. Tulostaulukossa esitetty prosenttiluku kuvaa vanhan ja uuden tehon erotusta.

Vanhat tiedot			Uudet tiedot		
$t_{m,ref}$	80	°C	$t_m$	60	°C
$t_{p,ref}$	50	°C	$t_p$	21	°C
$t_{s,ref}$	21	°C	n	1.3026	
n	1.3026		$q_m$ lisäys	30 %	
$\dot{Q}_{ref}$	631	W			
DT <sub>ref</sub>	42.2	°C [1]			
$q_{m,ref}$	0.0050	kg/s [4]			
<input type="button" value="Paina laskentaa varten"/>			Goal Seek laskenta		
			$t_{p,arvaus}$	44.74	°C
			$t_p$	44.74	°C [3]
			Excel goal seek = 0 muuttamalla $t_{p,arvaus}$	0.000	<b>LASKENTA SUORITTAMATTA JOS SOLU ON PUNAINEN</b>
TULOKSET					
$t_m$	60.0	°C			
$t_p$	44.7	°C			
$t_s$	21.0	°C			
DT	30.7	°C [1]			
$q_m$	0.0065	kg/s [4]			
$q_m$ lisäys	30	%			
$\dot{Q}$	<b>417</b>	W [2]			
Tehoerotus	-33.9	%			

Kuva 16. Laskentatyökalu Excel-ohjelmassa.

Excel-työkalua käyttäen laskettiin patterikohtaiset luovutustehot, virtaamat ja paluulämpötilat menoveden ollessa 60 °C ja 30 % virtaamakorotuksella. Taulukossa 3 s. 37 alimmalla rivillä esitetty prosenttiluku kuvaa pattereista saatavan tehon ja halutun tehon (lämpöhäviöiden) suhdetta. Lämpöhäviöt on esitetty taulukossa 2 s. 28. Laskennan perusteella vanhojen pattereiden uudet luovutustehot eivät riitä kattamaan lämpöhäviöitä -20,6 °C ulkolämpötilassa. Lämpöhäviöitä (taulukko 2) sekä  $\dot{Q}_{TOT}$  arvoja (taulukko 3) vertaillen, voidaan todeta, että huoneen 109/110 vanhat patterit riittävät -6 °C ulkolämpötilaan asti kattamaan huoneiden lämpöhäviöt. Huoneet 106 ja 107 pystyisivät kattamaan lämpöhäviöt

-9 °C ulkolämpötilaan ja huoneen 108, -15 °C asti. Paluulämpötilat ovat kaikissa pattereissa noin 45 °C.

Taulukko 3. Vanhojen pattereiden luovutustehot ja paluulämpötilat 60 °C menovedellä ja 30 % virtaamien korotuksella.

Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -20,6 °C	1089 W	1089 W	1986 W	1982 W
Patteri	C11-400- 1100	C11-400- 1100	C22-300- 1200	C22-400- 1100
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	60	60	60	60
$t_p$ [°C]	44,7	44,7	44,8	44,8
$\Delta T$ [°C]	30,7	30,7	30,8	30,8
$q_m$ [kg/s]	0,0065	0,0065	0,0096	0,0111
$q_m$ lisäys %	30	30	30	30
$\emptyset$	<b>417 W</b>	<b>417 W</b>	<b>613 W</b>	<b>711 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>834 W</b>	<b>834 W</b>	<b>1840 W</b>	<b>1423 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	-23	-23	-7	-28

Patterijärjestelmän tulee olla tasapainossa, eli virtaamat tulee vastata lämmönluovutuksen kautta haluttua sisälämpötilaa. Taulukossa 4 s. 38 esitetään uudet optimoidut virtaamat, tehot ja paluulämpötilat -6 °C ulkolämpötilassa. Virtaamia muuttamalla saadaan luovutusteho vastaamaan lämpöhäviöitä. Pattereiden paluulämpötilat ovat optimoidussa vaihtoehdossa 37–45 °C. Laskuri ei osaa automaattisesti hakea oikeaa virtaamankorotusprosenttia, tämä tulee manuaalisesti tehdä soluun  $q_m$  lisäys ja verrata laskentatulosta lämpöhäviöön.

Taulukko 4. Optimoidut virtaamat, menovesi 60 °C, ulkolämpötilassa -6 °C, vanhat patterit.

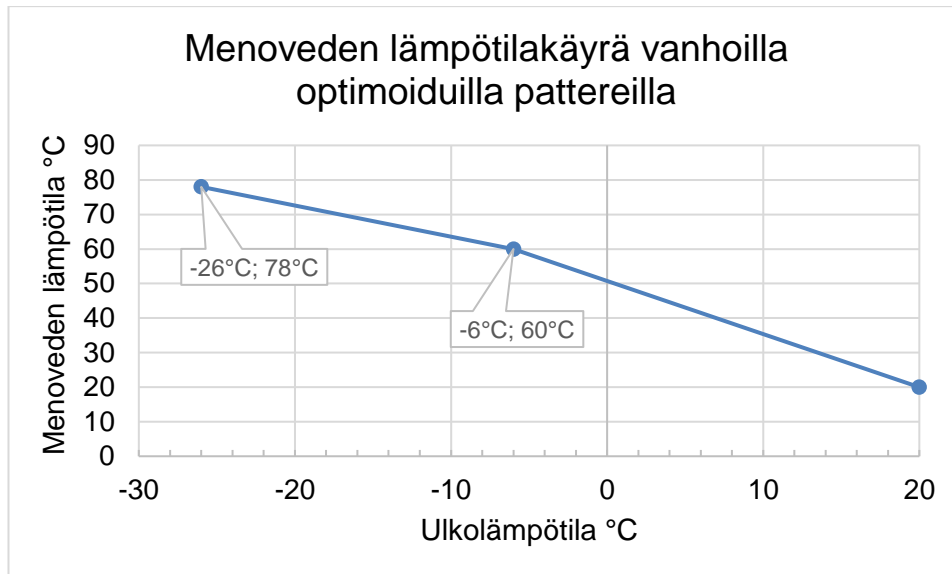
Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -6 °C	766 W	766 W	1467 W	1418 W
Patteri	C11-400- 1100	C11-400- 1100	C22-300- 1200	C22-400- 1100
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	60	60	60	60
$t_p$ [°C]	41,6	41,6	37,1	44,7
$\Delta T$ [°C]	28,8	28,8	25,9	30,7
$q_m$ [kg/s]	0,0050	0,0050	0,0051	0,0111
$q_m$ lisäys %	-1	-1	-31	29
$\emptyset$	<b>383 W</b>	<b>383 W</b>	<b>489 W</b>	<b>710 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>767 W</b>	<b>767 W</b>	<b>1468 W</b>	<b>1420 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0	0	0	0

Kun pattereiden virtaamat ovat tiedossa, lasketaan millä menoveden lämpötilalla ja taulukon 4 mukaisilla virtaamilla ( $q_m$ ) pystytään kattamaan lämpöhäviöt mitoitusulkolämpötilassa -26 °C. Excel-laskentatyökalu ei osaa automaattisesti hakea sopivaa menolämpötilaa, tämä tulee käyttäjän itse kokeilla  $t_m$  solua muuttamalla ja laskentatulosta vertailemalla lämpöhäviöihin. Lämpöhäviöt -26 °C ulkolämpötilalle saadaan taulukosta 2 s. 28. Taulukosta 5 s. 39 nähdään, että menoveden lämpötila on lähes sama, kun vanha (80 °C).

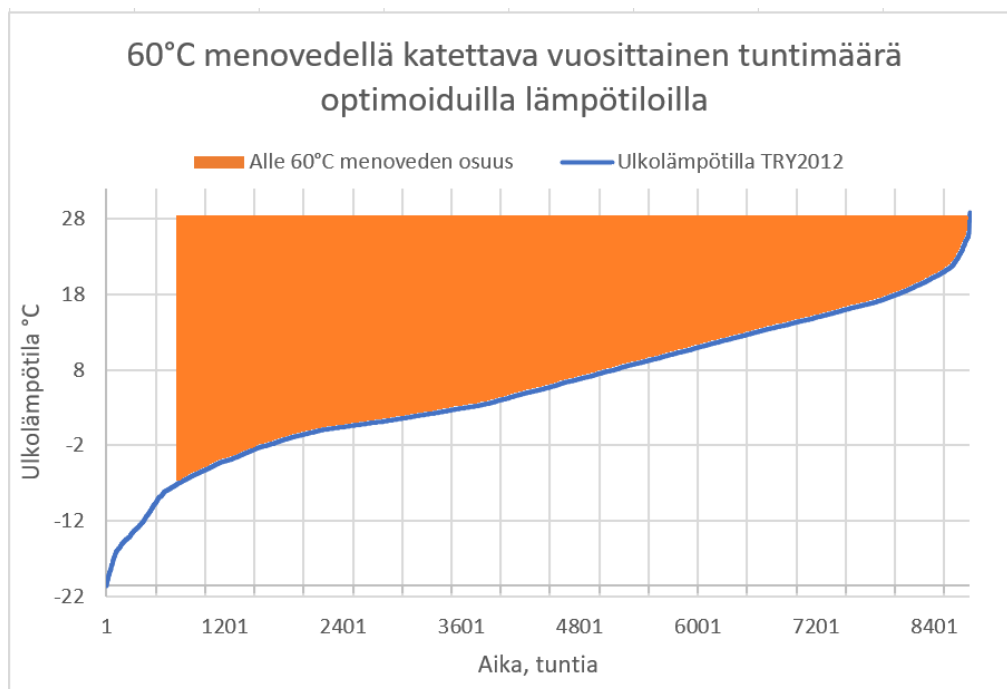
Taulukko 5. Menoveden lämpötila optimoitu ulkolämpötilassa -26 °C, vanhat patterit.

Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -26 °C	1209 W	1209 W	2178 W	2191 W
Patteri	C11-400- 1100	C11-400- 1100	C22-300- 1200	C22-400- 1100
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	78	78	78	78
$t_p$ [°C]	49,0	49,0	42,3	53,7
$\Delta T$ [°C]	40,8	40,8	36,3	43,7
$q_m$ [kg/s]	0,0050	0,0050	0,0051	0,0111
$q_m$ lisäys %	-1	-1	-31	29
$\emptyset$	<b>603 W</b>	<b>603 W</b>	<b>762 W</b>	<b>1130 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>1207 W</b>	<b>1207 W</b>	<b>2285 W</b>	<b>2260 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0	0	5	3

Taulukosta 5 nähdään, että huoneen 109/110 patterit muodostuvat niin sanotuksi pullonkaulaksi. Muiden tarkisteltavien pattereiden virtaamaa voitaisi nostaa, mutta 109/110 huoneen patterin virtaama on jo +29 %. Koska menoveden lämpötila on sama koko järjestelmässä, joudutaan muiden pattereiden menoveden lämpötila mitoittamaan tiukimman patterin mukaan ja tämän perusteella virtaamat. Kuvassa 17 s. 40 esitetään uusi menoveden lämpötilakäyrä perustuen taulukon 4 s. 38 ja taulukon 5 laskentatuloksiin. Kuvasta 18 s. 40 nähdään, että patterien optimoinnilla katetaan 7860 tuntia vuoden 8760 tunnista TRY2012 säädatasta, osuus on noin 90 % koko vuoden tuntimäärästä. Optimoimattomien pattereiden sama tuntimäärä on kuvan 15 s. 34 mukaan 3616 tuntia, eli noin 41 %. Kappaleen 6.2 laskentatavalla vanhat patterit riittävät +8 °C ulkolämpötilaan. Tämän kappaleen optimoinnin perusteella pystytään samalla järjestelmällä, pattereita vaihtamatta ja samalla menoveden lämpötilalla (60 °C) hoitamaan lämmitys -6 °C asti. Yhteenvedona voidaan todeta, että sähkökattilan käyttö pienee huomattavasti optimoiduilla pattereilla.



Kuva 17. Menoveden lämpötiläkäyrä vanhoilla optimoiduilla pattereilla.



Kuva 18. Optimoiduilla pattereilla katettava vuosittainen tuntimäärä alle 60 °C menovedellä.

## 6.5 Pattereiden lämpötilatasojen optimointi, osa pattereista uusitaan

Edellisen kappaleen mukaan pullonkaulaksi eli kriittisimmäksi patteriksi muodostuvat huoneen 109/110 patterit. Tässä kappaleessa lasketaan patterien virtaamat, tehot ja lämpötilatasot, kun huoneen 109/110 patterit uusitaan.

Huoneen 109/110 patterit ovat C22–400–1100. Kohdekäynnin perusteella on todettu, että vanhojen tilalle mahtuu korkeintaan 1600 pitkät patterit. Korkeutta voidaan kasvattaa korkeintaan 50 mm. Huomioitavaa patterin korkeuden muutoksessa on, että asennuskustannukset kasvavat, putkia joudutaan muokkaamaan, kannakkeita vähintään siirtämään tai kannakkeita joudutaan mahdollisesti uusimaan. Patterin korkeuden muutokset kannattaa minimoida.

Uusiksi pattereiksi valittiin *Purmon Compact*-patterit. Purmon teknisen esitteen mukaan C22–450–1600 patterista saadaan 715 W lämmitystehoa lämpötiloilla 60/30/20 °C ( $t_m/t_p/t_h$ ). Eksponentti on kyseiselle patterille 1,3226 (Purmo, 2018, s. 16). Purmon esitteestä saadut tiedot syötetään tätä työtä varten tehtyyn Excel-laskentatyökaluun. Virtaamaa muuttamatta saadaan uudeksi tehoksi 695 W, lämpötiloilla 60/30,84/21 °C ( $t_m/t_p/t_h$ ).

Kun kriittisimmät patterit uusitaan, ovat seuraavaksi kriittisimmät patterit huoneissa 106 ja 107 (katso taulukko 5 s. 39,  $q_m$  lisäys %), eli muut patterit tulee optimoida tämän huoneen pattereiden mukaan. Tässä vaiheessa ei tiedetä mitoitussulkolämpötilaa, 60°C menovedellä. Laskentatyökaluun syötettiin huoneen 106 patterin tiedot ja virtaamaa nostettiin +30 % alkuperäisestä. Menoveden lämpötilaksi asetettiin 60 °C. Tulokseksi saatiin 416 W, huoneessa on kaksi patteria, joten huoneen patteritehoksi saadaan 832 W.

Huoneen 106 lämpöhäviöt ovat -9 °C ulkolämpötilassa taulukon 2 s. 28 mukaan 832 W, joten kaikki patterit optimoidaan tähän ulkolämpötilaan. Taulukossa 6 s. 42 on esitetty vanhojen pattereiden ja huoneen 109/110 uusien pattereiden optimitulokset. Menoveden ollessa 60 °C on pattereilta palaava vesi 33 – 45 °C. Laskentatulosten perusteella nähdään, mikäli huoneiden 106 ja 107 patterit uusittaisiin, että huoneen 108 patterin virtaama voitaisiin nostaa -18 %:sta aina

+30 %:iin. Samalla menoveden lämpötilalla voitaisiin lämpöhäviöt kattaa vieläkin kylmemmässä ulkoilmassa. Uuden patterin virtaamaa nostettiin 20 %, jolloin patterista saadaan 695 W sijaan 772 W, jolla pystytään kattamaan lämpöhäviöt -9 °C ulkolämpötilassa.

Taulukko 6. Optimoidut virtaamat, menovesi 60 °C, ulkolämpötila -9 °C. Huoneessa 109/110 uudet patterit.

Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -9 °C	832 W	832 W	1574 W	1534 W
Patteri	C11-400-1100	C11-400-1100	C22-300-1200	C22-450-1600
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	60	60	60	60
$t_p$ [°C]	44,7	44,7	39,3	33,0
$\Delta T$ [°C]	30,7	30,7	27,4	22,9
$q_m$ [kg/s]	0,0065	0,0065	0,0060	0,0068
$q_m$ lisäys %	30	30	-18	20
$\emptyset$	<b>417 W</b>	<b>417 W</b>	<b>526 W</b>	<b>772 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>834 W</b>	<b>834 W</b>	<b>1578 W</b>	<b>1543 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0	0	0	1

Kun pattereiden virtaamat on tiedossa, lasketaan millä menoveden lämpötilalla ja taulukon 6 mukaisilla virtaamilla pystytään kattamaan lämpöhäviöt -26 °C ulkolämpötilassa. Lämpöhäviöt -26 °C ulkolämpötilalle saadaan taulukosta 2 s. 28. Taulukosta 7 s. 43 nähdään, että menoveden lämpötilalla 74 °C pystytään kattamaan lämpöhäviöt. Huomioitavaa huoneen 108 pattereiden osalta on, että, luovutustehot joudutaan ylivoimaisesti rajoittamaan mitoitusulkolämpötilassa, jotta -9 °C ulkolämpötilassa teho olisi riittävä (katso tehomitoitus % taulukko 6 ja taulukko 7).

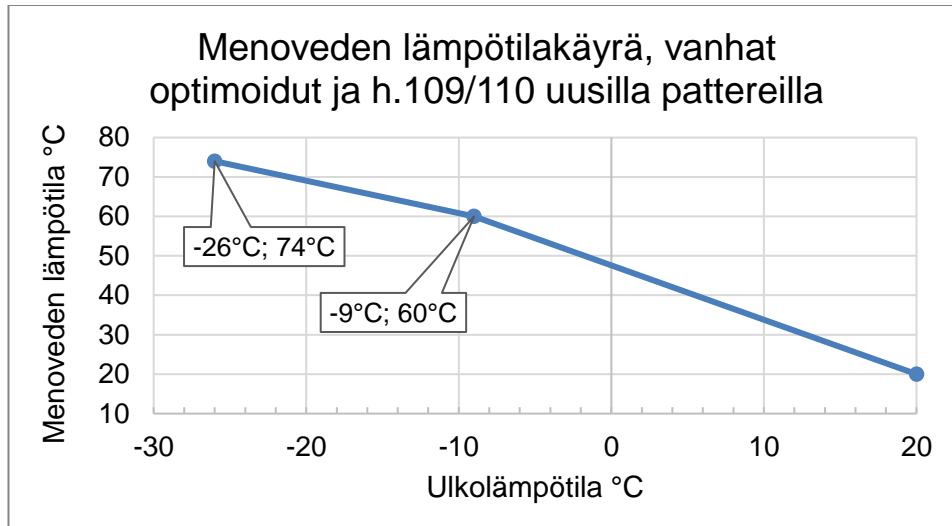
Taulukko 7. Menoveden lämpötila optimoitu ulkolämpötilassa -26 °C. Huoneissa 109/110 uudet patterit.

Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -26 °C	1209 W	1209 W	2178 W	2191 W
Patteri	C11-400- 1100	C11-400- 1100	C22-300- 1200	C22-450- 1600
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	74	74	74	74
$t_p$ [°C]	51,8	51,8	44,2	35,7
$\Delta T$ [°C]	40,9	40,9	36,1	29,9
$q_m$ [kg/s]	0,0065	0,0065	0,0060	0,0068
$q_m$ lisäys %	30	30	-18	20
$\emptyset$	<b>606 W</b>	<b>606 W</b>	<b>756 W</b>	<b>1095 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>1211 W</b>	<b>1211 W</b>	<b>2268 W</b>	<b>2190 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0	0	4	0

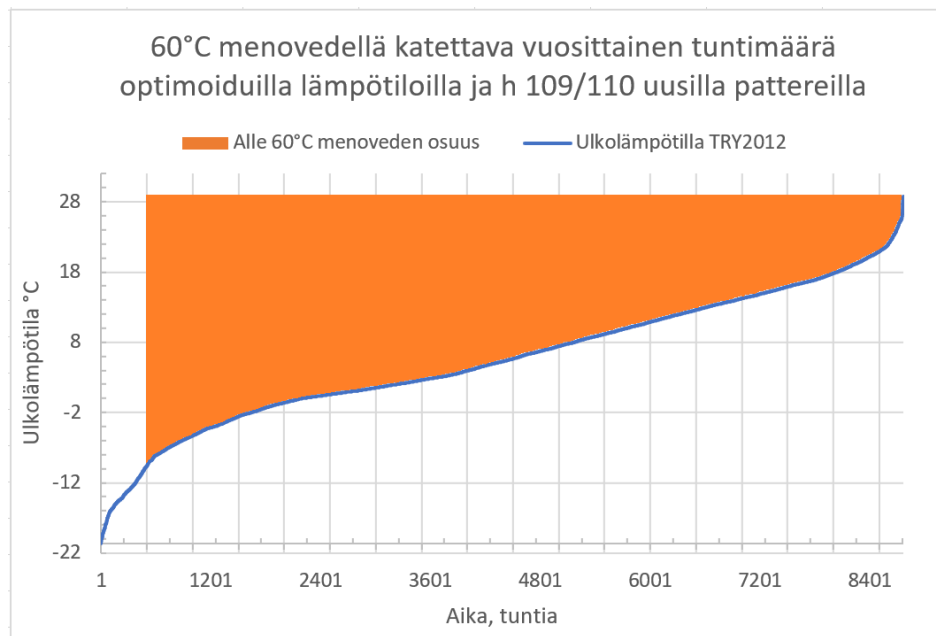
Kyseistä optimointitapaa, missä uusitaan kriittisin patteri ja optimoidaan jäljelle jäävät vanhat, voisi jatkaa, kunnes kaikki paitsi yhden huoneen patterit ovat osaltaan optimoituja. Tätä ei kuitenkaan Excel-työkalulla kannata tehdä, vaan on suositeltavaa käyttää LVI-suunnittelijoiden käytössä olevia suunnitteluohjelmia. Suunnitteluohjelmiin voidaan syöttää niin sanotun ensimmäisen optimointikierroksen veden lämpötilat ja antaa ohjelman laskea koko järjestelmän virtaamat tämän mukaan sopiviksi. Ohjelmat ilmoittavat, mikäli jokin patterin luovutus-teho ei vastaa haluttua tehoa. Ohjelmasta on myös helpompi tarkastaa putkikokojen riittävydet, joiden perusteella pystytään arvioimaan, voidaanko virtaamia nostaa entisestään. Suunnitteluohjelmien käytössä kuitenkin huomioitava, että vanhojen pattereiden tuotetiedot on löydettävä ohjelman tuotekirjastoista. Mikäli vanhojen pattereiden tietoja ei löydy suunnitteluohjelmasta, tulee optimointi tehdä käsin tai käyttää vastaavaa, teknisiltä arvoiltaan huonompaa vaihtoehtoa, jotta tehoja ei alimitoiteta.

Tämän kappaleen vaihtoehdon, jossa osa pattereista uusitaan, muodostuu menoveden lämpötilakäyrä kuvan 19 mukaiseksi. Menoveden mitoitustilanteen

lämpötilaa pystyttiin madaltamaan alkuperäisestä 80 °C. Energiapitoa 60 °C menovedellä saatiin myös kasvatettua vaihtamalla yhden tilan patterit. Alle 60 °C menovedellä pystytään kattamaan vuoden tunneista 8237 tuntia, joka vastaa 94 % TRY2012 säädatasta (kuva 20).



Kuva 19. Menoveden lämpötiläkäyrä, h.109 uusilla pattereilla, muut vanhat patterit optimoitu.



Kuva 20. Optimoiduilla pattereilla ja huoneen 109/110 uusituilla pattereilla katettava vuosittainen tuntimäärä alle 60 °C menovedellä.

## 6.6 Uusien pattereiden mitoitus

Pappilan lämmitysverkoston putkia ei uusita. Uusien pattereiden virtaamat tulee optimoida vanhan putkiston mukaan. Tässä kappaleessa käytetään samaa 30 % virtaaman korotusprosentin maksimiarvoa, kuin edellisissä kappaleissa.

Pappilan uudet patterit mitoitetaan sillä perusteella, että 60 °C menovedellä ka-tetaan lämpöhäviöt -20,6 °C ulkolämpötilassa. Huoneessa 109/110 pattereita voidaan suurentaa aikaisemman kappaleen mukaan korkeintaan kokoon 450–1600. Huoneiden 106, 107 ja 108 pattereiden maksimikorkeus on sama 450 mm, kun huoneessa 109/110, pituutta voidaan lisätä korkeintaan 200 mm.

Uusiksi pattereiksi valittiin *Purmon Compact*-patterit. Kun uusien pattereiden fyysiset kokorajoitteet ja huoneiden lämpöhäviöt -20,6 °C ulkolämpötilassa (esitetty taulukossa 2 s. 28) on tiedossa, voidaan Purmon teknisestä esitteestä tarkistaa pattereiden tehoja (Purmo, 2018, s. 17-18). Esiteessä pattereiden tehot esitetään lämpötiloilla 60/30/20 °C. Pattereiden uutta paluulämpötilaa ei tiedetä, huonelämpötila on 21 °C, joten uusi luovutusteho ja paluulämpötila tulee laskea.

Alustavien laskelmien ja pattereiden fyysisten kokojen perusteella valikoitui huoneiden uusiksi pattereiksi seuraavat:

- Huone 106: C22-400-1200, eksponentti 1,3182.
- Huone 107: C22-400-1200, eksponentti 1,3182.
- Huone 108: C22-450-1400, eksponentti 1,3226.
- Huone 109/110: C33-450-1600, eksponentti 1,3313.

Huoneissa 106 ja 107 ei kasvateta pattereiden korkeutta, jolloin asennuskustannukset ovat pienemmät. Huoneissa 108 ja 109/110 korkeutta joudutaan kasvattamaan, jotta haluttu teho saavutetaan.

Seuraavaksi lasketaan uusien pattereiden uudet luovutustehot menoveden lämpötilalla 60 °C, sisälämpötilalla 21 °C sekä vesivirtaamat. Tulokset on esitetty taulukossa 8. Pattereiden paluulämpötilat ovat noin 32 °C. Uusien pattereiden

luovutustehoilla voidaan laskelmien mukaan kattaa lämpöhäviöt  $-20,6\text{ °C}$  ulkolämpötilassa.

Taulukko 8. Uusien pattereiden mitoitus tiedot  $-20,6\text{ °C}$  ulkolämpötilassa.

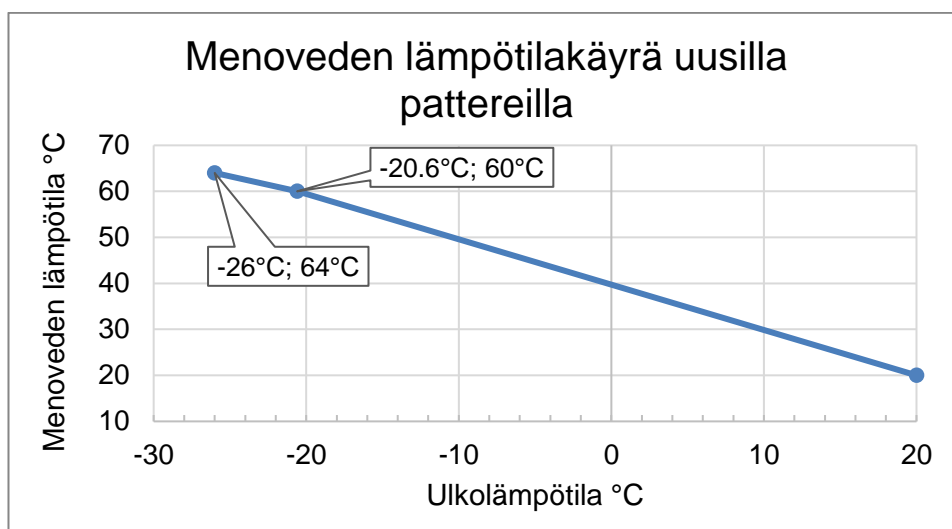
Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö <b><math>-20,6\text{ °C}</math></b>	1089 W	1089 W	1986 W	1982 W
Uusi patteri	C22-400-1200	C22-400-1200	C22-450-1400	C33-450-1600
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m\text{ [°C]}$	60	60	60	60
$t_p\text{ [°C]}$	32,3	32,3	32,6	31,6
$\Delta T\text{ [°C]}$	23,5	23,5	22,6	21,8
$q_m\text{ [kg/s]}$	0,0047	0,0047	0,0058	0,0084
$\emptyset$	<b>545 W</b>	<b>545 W</b>	<b>663 W</b>	<b>996 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>1089 W</b>	<b>1089 W</b>	<b>1989 W</b>	<b>1993 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0,0	0,0	0,2	0,6

Kun pattereiden virtaamat on tiedossa, lasketaan millä menoveden lämpötilalla ja taulukon 8 virtaamilla voidaan kattaa lämpöhäviöt mitoitusulkolämpötilassa  $-26\text{ °C}$ . Lämpöhäviöt  $-26\text{ °C}$  ulkolämpötilalle saadaan taulukosta 2 s. 28. Laskelmien mukaan menoveden lämpötilaksi saadaan  $64\text{ °C}$  (katso taulukko 9 s. 47). Patterit uusimalla voidaan menoveden lämpötilaa madaltaa huomattavasti alkuperäisestä.

Taulukko 9. Uusien pattereiden menoveden lämpötila -26 °C ulkolämpötilassa.

Huone	106	107	108	109/110
Lämpöhäviö -26 °C	1209 W	1209 W	2178 W	2191 W
Uusi patteri	C22-400- 1200	C22-400- 1200	C22-450- 1400	C33-450- 1600
Lukumäärä	2	2	3	2
$t_m$ [°C]	64	64	64	64
$t_p$ [°C]	33,2	33,2	33,4	32,3
$\Delta T$ [°C]	25,5	25,5	24,6	23,7
$q_m$ [kg/s]	0,0047	0,0047	0,0058	0,0084
$\emptyset$	<b>607 W</b>	<b>607 W</b>	<b>741 W</b>	<b>1113 W</b>
$\emptyset_{TOT}$	<b>1214 W</b>	<b>1214 W</b>	<b>2224 W</b>	<b>2227 W</b>
Tehoerotus % (Lämpöhäviö/ uusi teho)	0,4	0,4	2,1	1,6

Lämpötilakäyrä muodostuu kuvan 21 mukaiseksi. Menolämpötilaa saatiin matallettua ja yli 60 °C menoveden lämpötilat minimoitua, jonka johdosta sähkökattilan käyttö pienenee huomattavasti muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Alle 60°C menovedellä pystytään patterit uusimalla, kattamaan kaikki TRY2012 säädatan mukaiset ulkolämpötilat.



Kuva 21. Menoveden lämpötiläkäyrä uusilla pattereilla.

## 7 Esimerkkikiinteistön energiantarpeet ja MLP-mitointi

Pappilasta ei ollut hankesuunnitteluvaiheessa luotettavaa öljynkulutustietoja saatavilla johtuen aluelämpöjärjestelmästä. Aluelämpöjärjestelmä palvelee myös muita rakennuksia. Lämmitysenergiantarve on arvioitu energiasuunnittelijan toimesta hankesuunnitteluvaiheessa dynaamisella simulointiohjelmalla. Laskennassa käytettiin *EQUA Oy:n* kehittämää *IDA ICE*-laskentaohjelmaa. Hankesuunnitelman energiankulutustietoja käytetään tämän työn lähtötietoina kappaleessa 8. Tässä työssä käytetään lämmitysenergian kokonaistarpeena 195 MWh/vuosi, sisältäen tila, IV ja käyttöveden energiantarpeet.

Patterilämmitysjärjestelmän huipputehontarve on vanhojen suunnitelmien mukaan 25 kW ulkolämpötilassa  $-26\text{ °C}$ . Verkoston lämpötilatasot ovat  $80/50\text{ °C}$  ja mitoitusvirtaama 0,2 l/s.

LIV-verkoston huipputehontarve on vanhojen suunnitelmien ja vanhojen IV-koneajojen mukaan 36 kW ulkolämpötilassa  $-26\text{ °C}$ . LIV-verkoston lämpötilatasot ovat  $80/60\text{ °C}$  ja mitoitusvirtaama 0,44 l/s. IV-koneet käyvät kello-ohjauksella kappaleen 5 käyttöaikojen mukaan. Käyttöajalla yhteenlaskettu ilmamäärä on 0,9 m<sup>3</sup>/s, käyttöajan ulkopuolella 0,27 m<sup>3</sup>/s. Koneissa ei ole pakkaspuolitusta tai tarpeenmukaista ilmamääräohjausta.

Omistajaorganisaatiolta saatujen lähtötietojen ja nykyisten vesipisteiden virtaamien perusteella on lämpimän käyttöveden todelliseksi mitoitusvirtaamaksi arvioitu vanhoista suunnitelmista poiketen 0,21 l/s. 0,21 l/s vastaa suoraa tehontarvetta 47 kW. Lämpimän käyttöveden lämmittämiseen on arvioitu hankesuunnitteluvaiheessa kuluvan 8 MWh/vuosi. Varaajien ja LVK:n häviöiden osuudeksi on laskettu hankesuunnitelmassa 18 MWh/vuosi.

### 7.1 Maalämpöjärjestelmän ja energiakaivojen mitointi

Kohteeseen on hankesuunnitteluvaiheessa mitoitettu maalämpöjärjestelmä osatehomitoituksella. Lämpöpumpun avuksi asennetaan sähköinen lisälämmitys,

sähkökattila ja varaajiin sähkövastuksia. Maalämpöpumpulla, jonka lämmitys-teho on 40 kW voidaan hankesuunnitelman perusteella kattaa noin 96 % rakennuksen kokonaisenergiatarpeesta, loput tuotetaan sähköisellä lisälämmityksellä. Sähköllä tuotettava lisälämmöntarve on arvioitu hankesuunnitelmassa olevan 24 kW. Mitoituksessa on käytetty maalämpöpumpun SPF-arvona 3,4. SPF-arvon saavuttaminen edellyttää lämpöpumpun menoveden rajoittamista korkeintaan 60 °C:een.

Energiakaivot mitoitettiin hankesuunnittelussa omistajaorganisaation toiveesta 50 vuodelle koska rakennus on saneerattu lähes kokonaisuudessaan lähiaikoina. Energiakaivokentän mitoituksen perusteella tulee tontille porata 6 kappaletta, aktiivisyvydeltään 265 metristä kaivoa.

## **8 Kytkentäkaavion simulointi dynaamisella laskentaohjelmalla**

Tässä kappaleessa selvitetään Equa Oy:n Swecolle räätälöidyn maalämpöjärjestelmien kytkentäkaavioiden simulointiohjelman käyttömahdollisuuksia saneerauskohteissa. Tässä työssä käytetään ohjelman lisäosasta nimeä Plant, viitaten räätälöityyn lisäosaan. Plant hyödyntää tulevan IDA ICE 5.0 version ominaisuuksia, Beta-version avulla. Ohjelma on tätä työtä kirjoittaessa kehitysvaiheessa. Tässä työssä käytetään viimeisintä saatavilla olevaa versiota, Beta22, jota on päivitetty viimeksi maaliskuussa 2022. Version Beta22 suurin uusi ominaisuus on lähtötietojen (parametrien) koottu syöttöpaikka.

Plantilla voidaan simuloida maalämpöjärjestelmien kytkentäkaavioita dynaamisesti koko vuoden aikana. Simuloinnin perusteella voidaan tarkkailla esimerkiksi maalämpöpumpun ja sähkökattilan käyntiaikoja ja tuotantotehoja, maalämpöjärjestelmän kokonaishyötysuhdetta sekä vesivirtojen lämpötilatasoja. Kaikkia parametreja voidaan tarkkailla simuloitavan vuoden jokaisena tuntina.

Räätälöityyn simulointiohjelmaan ohjelmoidut kytkentäkaaviot perustuvat todellisiin, toteutettuihin hankkeisiin. Kaikki hankkeet olivat uudisrakennuksia. Ohjelmaan on ohjelmoitu neljän eri hankkeen kytkentäkaaviot, joiden ominaisuuksia

käyttäjä voi valita simuloinnissaan käytettäväksi. Käyttäjä voi esimerkiksi valita maalämmön rinnalle toiseksi energiamuodoksi, sähkön sijaan kaukolämmön. Käyttäjä voi myös valita maalämmön hyödyntämisen ainoastaan patteri- tai LIV-järjestelmässä. Jäähdytyksen hyödyntämisen voi myös valita käytettäväksi.

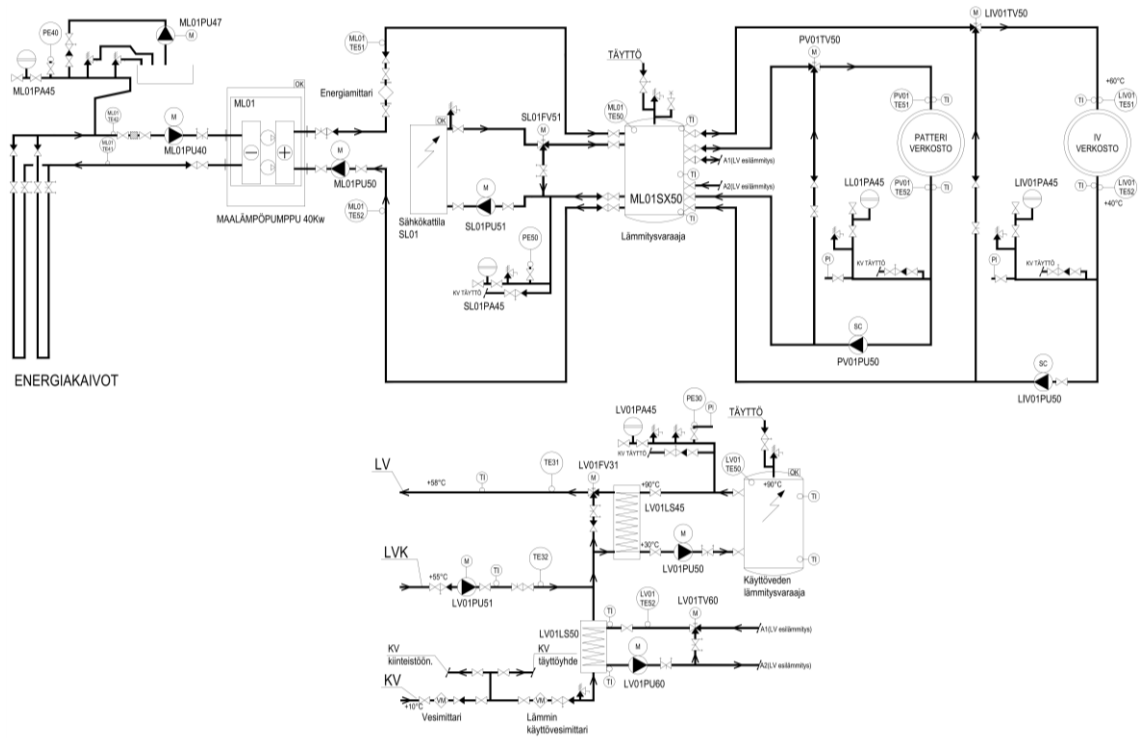
## 8.1 KytKentäkaavio

Kuva 22 s. 51 esittää maalämpöjärjestelmän kytKentäkaavio, jota tässä työssä simuloidaan. Maalämpöjärjestelmän putkikytkentöjä voidaan tehdä monella eri tavalla. Putkikytkentäperiaatteiden muuttaminen laskentaohjelmassa on työstä, ja se tulee tehdä ohjelmistokehittäjän toimesta. Järjestelmän kytKentäperiaatteeseen käyttäjä pystyy vaikuttamaan valitsemalla valmiiksi ohjelmoiduista kytkennöistä sopivan. Kappaleessa 8.3 käsitellään tarkemmin simulointiohjelman käyttöä ja parametrejä, joita käyttäjä voi muuttaa.

Kuvan 22 s. 51 vasemmassa reunassa energiakaivot, oikealle siirtyessä maalämpöpumppu (ML01). Maalämpöpumpulta lähtevä ja palaava putki on liitetty suoraan lämmitysjärjestelmän varaajaan (ML01SX50). Maalämpöpumpun rinnalla on sähkökattila (SL01), joka palvelee lämmitysjärjestelmän varaajaa. Sähkökattila saa käyntiluvan ainoastaan, jos ulkolämpötila on alle asetusarvon ja varaajan lämpötila ei saavuta asetuslämpötilaa, vaikka maalämpöpumppu on täydellä teholla. Lämmitysjärjestelmän varaajasta (ML01SX50) lähtee kolme putkiparia yhdet patteri-, yhdet IV-verkostolle (LIV) sekä yhdet käyttöveden esilämmitykselle (LV01LS50). Patteri ja LIV-verkostot säätävät verkostokohtaisia menovesien lämpötiloja 3-tieventtiileillä (PV01TV50 ja LIV01TV50), pitäen menoveden lämpötilan asetusarvossaan (PV01TE51 ja LIV01TE51). Patteri- ja LIV-verkostojen menovesien lämpötila-asetusarvot riippuvat ulkolämpötilasta ja menoveden säätökäyrästä.

Käyttövesi tuotetaan siirtimellä LV01LS45 suoraan käytön mukaan. Kylmä käyttövesi esilämmitetään lämmitysjärjestelmän vedellä siirtimessä LV01LS50. Esilämmityssiirtimessä kylmän veden lämpötila nousee. Lämmennyt vesi sekoittuu LVK:n veteen ja lämpenee entisestään. Käyttöveden lämmitysvaraaja pidetään

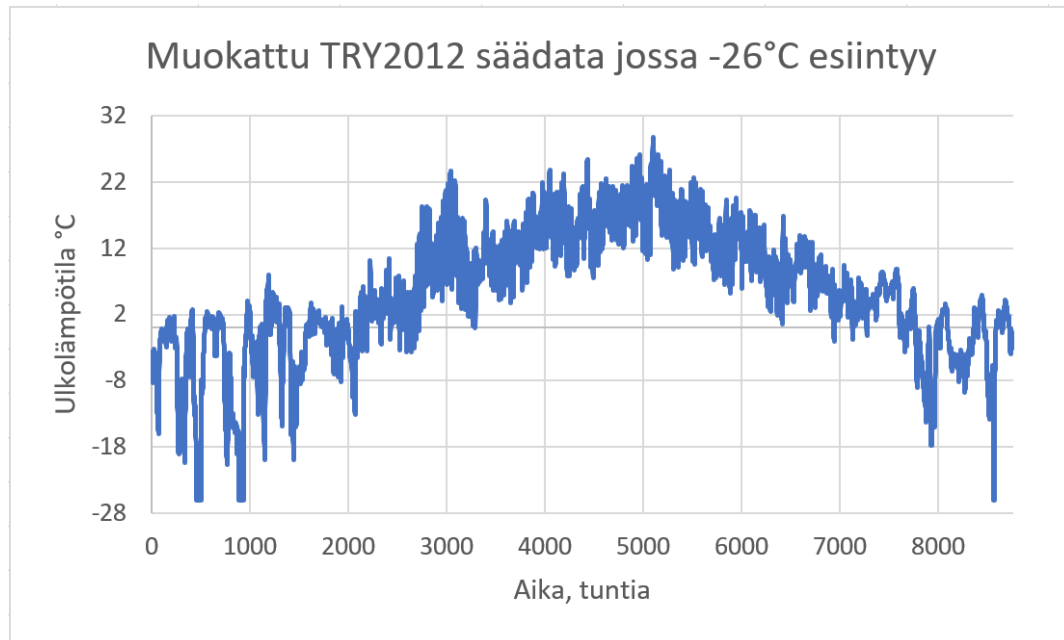
asetusarvossaan 90 °C sähkövastuksilla. 3-tieventtiilillä LV01FV31 sekoitetaan siirtimeltä LV01LS50 tulevaa kuumaa ja esilämmityksestä tulevaa lämmintä vettä pitäen LV-verkoston lähtevän veden asetussarvossaan 58 °C (TE31).



Kuva 22. Esimerkki kiinteistön simuloitava maalämmön kytkentäkaavio.

## 8.2 Simuloinnin säädädata

Dynaamisissa simuloinneissa, energiatarpeita arvioidessa käytetään yleensä TRY2012 säädädataa (Honkala, 2021, s. 35) (Ilmatieteenlaitos, 2021). Säädätässä kylmin lämpötila on -20,6 °C. Tällä hetkellä ainoa tapa huomioida mitoitussulkolämpötila dynaamisessa laskentaohjelmassa, on muokata säädädataa manuaalisesti (Honkala, 2021, s. 35-38). Tämän työn simulointia varten muokattiin säädädataa niin, että tammikuussa tunteina 457–505, helmikuussa tunteina 890–938 ja joulukuussa tunteina 8566–8573 ulkolämpötila on jatkuvasti -26 °C. Uusi säädädata muodostuu kuvan 23 s. 52 mukaiseksi, tuntiokohtaiset lämpötilat on tammikuusta joulukuuhun järjestetty aikajärjestykseen.



Kuva 23. Muokattu säädata dynaamista laskentaa varten.

### 8.3 Simulointiohjelman käyttö

Plantin etusivu esitetään kuvassa 24 s. 54. Etusivun ylimmässä osassa muutetaan pääkytkentää. Valkoiseihin soluihin täytetään viereisten selitteiden mukainen numero, riippuen siitä, minkälaista kytkentäkaaviota halutaan simuloida. Esimerkkikiinteistössä valittiin kytkennäksi numerot 3, 4, 4 ja 1, jotka tarkoittavat:

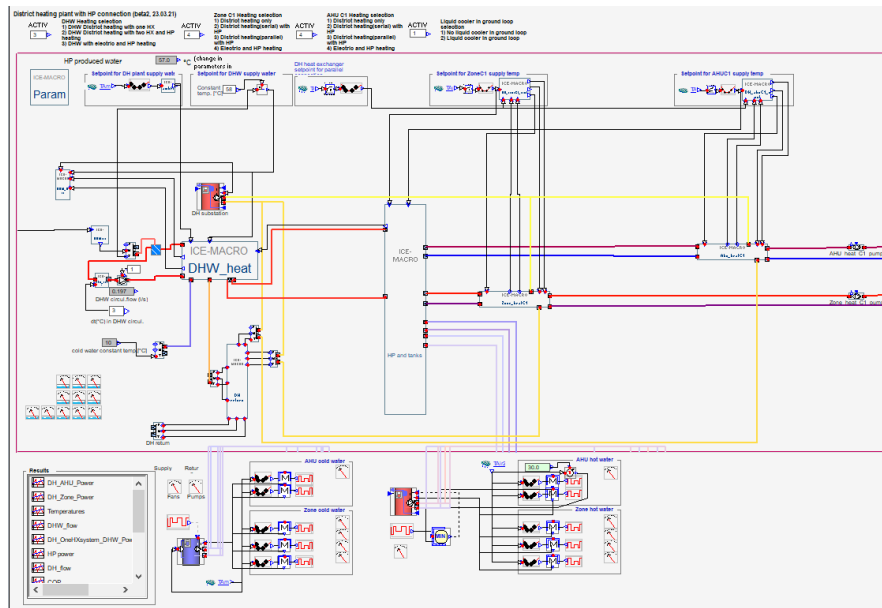
- Käyttövesi tuotetaan sähköllä ja maalämmöllä.
- Tilalämmitys tuotetaan sähköllä ja maalämmöllä.
- IV-lämmitys tuotetaan sähköllä ja maalämmöllä.
- Ei jäähdytystä.

Muut lähtötiedot syötetään painamalla *Param*-painiketta etusivun vasemmassa ylänurkassa. Painikkeen alta avautuu lähtötietojen syöttösivu. Syöttösivulle täytetään muun muassa järjestelmien mitoitustehöt, energiakaivojen tiedot, maalämpöpumpun ja sähkökattilan tehot. *Param*-sivulta voidaan myös määrittää varaajien kokoja sekä muuttaa lämmönsiirtimien mitoitus tietoja. Pappilan simulointia varten syötettiin *Param*-sivulle seuraavat tiedot:

- Maalämpöpumpun lämmitysteho 40 kW, käytetään ohjelmasta valmiiksi löytyvää Thermia MegaM maalämpöpumppua.
- Sähkökattilan maksimiteho, 24 kW ja tuotettavan veden maksimilämpötila 80 °C.
- Patterijärjestelmän mitoitusteho 25 kW.
- LIV mitoitusteho 36 kW.
- LV mitoitusteho 47 kW.
- Lämmitysjärjestelmien varaajakoko 1 m<sup>3</sup>.
- Lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytettävän varaajan koko 0,3 m<sup>3</sup>.
- Lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan sähkövastusten maksimiteho 14,8 kW, asetusarvo 90 °C.
- Energiakaivot; 6 kpl, aktiivisyvydeltään 265 m, aineena vesietanoli, jonka jäätymispiste on -18 °C.
- IV-koneiden käyntiajat ja rakennuksen käyttöajat: arkisin kello 8–21 ja viikonloppuisin kello 8–18

Param-painikkeen vieressä oikealla, on eri järjestelmien menovesikäyrien asetusarvojen parametrisyöttö. Ensimmäiseksi tarkasteltavaksi vaihtoehdoksi valittiin kappaleessa 6.3 esitetty vaihtoehto, jonka menoveden lämpötilat ovat kuvan 14 s. 33 mukaan, 80 °C -26 °C ulkolämpötilassa. Patteriverkoston käyrästä syötetään kohtaan *Setpoint for ZoneC1 supply temp* ja LIV-verkoston sama lämpötilakäyrä kohtaan *Setpoint for AHUC1 supply temp*.

Kuvan 24 s. 54 vasemmassa alanurkassa näkyvät mittarit, joista voidaan seurata muun muassa simuloinnin lämpötiloja, virtaamia sekä laitteiden tuottamia lämmitystehoja ja laitteiden käyttämiä sähkö tehoja. Kuvassa keskemällä alhaalla on esitetty jäähdytys- sekä lämmitysvaraajia, joita ei tässä ohjelmistoversiossa ole käytössä.



Kuva 24. Kytentäkaavion simulointiohjelman etusivun näkymä.

#### 8.4 Energiamallin muokkaus simulointia varten

Koska Plant on IDA ICE-ohjelman osa, vaatii Plant toimiakseen rakennuksen energiamallin. Energiamallin kautta saa Plant huonekohtaiset energiankulutus-tiedot, jonka perusteella MLP-laitteita säädetään. Kuva 25 s. 56 esittää IDA ICE-ohjelman etusivua. *Central systems*-valikossa painamalla *Plant*, avautuu kuvan 24 mukainen näkymä.

Kappaleessa 7 mainitaan, että Pappilan energiankulutus on mallinnettu dynaamisella laskentaohjelmalla. Vaikka Pappilan laskentamalli voitaisiin liittää osaksi kytkentäkaavion simulointia, ei tästä saada merkittävää hyötyä. Mallin liittämisen laskentaan moninkertaistaa yksittäisen simuloinnin laskenta-ajan. Tässä työssä käytetään rakennuksen energiamallina yksinkertaistettua laatikkomallia, jolloin yksittäinen simulointi kestää noin tunnin. Koska laatikkomalli on neliöiltään suurempi kuin Pappila, tulee mallin energiakulutus suhteuttaa niin, että kulutukset vastaavat Pappilaa.

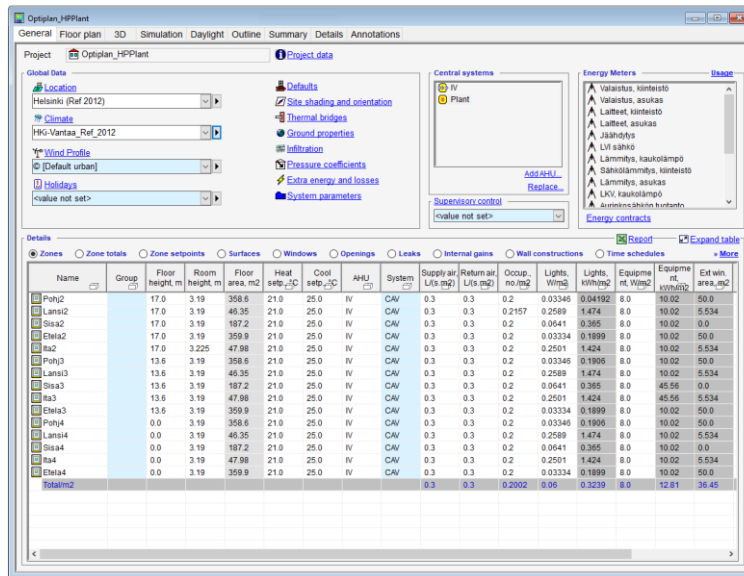
Lämpimän käyttöveden kulutustiedot sekä häviöt täytetään kuvan 25 s. 56 kohdasta *Extra energy and losses*. Lämpimän käyttöveden vuosittaisen kokonaiskulutuksen voi ohjelmaan syöttää suoraan. LKV häviöt tulee määritellä neliökohtaisesti, joten energiamalliin syötettiin  $0,7 \text{ W/m}^2$ , jolla lopputulos vastaa Pappilaa.

Ilmanvaihtojärjestelmän lämmityspattereiden lämpötilatasot täytetään edellisen kappaleen mukaan Plantista. Ilmamäärät tulee täyttää huonekohtaisesti. Malliin täytettiin huonekohtaisesti l/s/lattia- $\text{m}^2$  arvot, jolloin kokonaisilmamäärä vastaa Pappilaa. Ilmanvaihtokoneen käyntiajat täytetään kuvan 25 s. 56 kohdasta *Central systems* ja *IV*. IV-koneille syötetään LIV-järjestelmän maksimilämpötila, tässä tapauksessa  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Energiamalliin huoneisiin tulee lisätä lämmityspatterit. Pattereille tulee täyttää mitoitusulkolämpötilahetken vesien lämpötilatasot, patterin eksponentti, huonelämpötila sekä patterista haluttava teho. Pattereiden tiedot täytettiin kappaleen 6.3 mukaan - menovesi  $80$ , paluuvesi  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pattereiden tehot tulee suhteuttaa energiamalliin sopiviksi niin, että kokonaisteho vastaa Pappilan tehoa. Koska pattereiden lämmönluovutusteho riippuu patterin fyysisestä koosta, laskettiin Pappilalle patteri- $\text{m}^2$ /lattia- $\text{m}^2$  arvo, jonka perusteella energiamallin pattereiden fyysiset koot mallinnettiin huoneisiin. Pattereiden tehot voi energiamallissa ilmoittaa muodossa  $\text{W/lattia-}\text{m}^2$ . Energiamallin pattereiden tehot suhteutettiin huonekohtaisesti lattianeliöiden perusteella vastaamaan Pappilan pattereiden mitoitus-tehoa. Kappaleen 8.2 mukaan muokattu säädatatiedosto liitetään osaksi simulointia kuvan 25 s. 56 kohdassa *Climate*.

Energiatarpeen skaalaus vaati useita simulointikertoja. Energiatarpeiden suhteuttamisen turvallisimmaksi tavaksi osoittautui korkeintaan yhden tai kahden parametrin muuttaminen kerrallaan. Pitämällä muuttujat minimissä pystyttiin tulkitsemaan simulointituloksia ja yksittäisten muutosten vaikutusta kokonaisuuteen. Mallin energiatarpeet esitetään kuvan 25 *Summary*-välilehden alla. Suurin yksittäinen parametri, joka vaikutti energiatarpeeseen, oli  $q_{50}$ -luku. Sopivaksi  $q_{50}$ -luvuksi osoittautui, usean simulointikokeilun perusteella,  $6 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ . Tällä

energiamallin kulutus vastaa Pappilan kulutusta.  $q_{50}$ -lukua muutetaan kuvan 25 kohdasta *Infiltration*. Ohjelma simuloi samalla kytkentäkaavion, mutta kytkentäkaavion simulointituloksiin ei tässä vaiheessa kiinnitetty erityisesti huomiota, tärkeimpänä oli saada mallin energiankulutus vastaamaan Pappilaa.



Kuva 25. IDA-ICE etusivun näkymä.

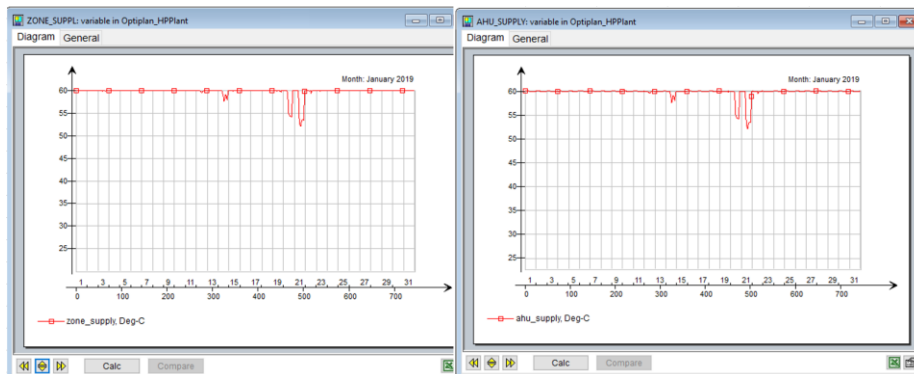
## 8.5 Simulointi ja tulokset

Energiamallin kulustietojen vastatessa simuloitavaa rakennusta, voidaan simulointi käynnistää kytkentäkaavion tarkastelua varten. Simulointituloksia voidaan tarkkailla kuvan 24 s. 54 vasemmassa alareunassa näkyvistä mittareista. Klikkaamalla kytkentäkaavion laiteta tai putkea voi simuloinnin viimeisen tunnin tuloksia tarkistella komponenttikohtaisesti. Simuloinnin yhteenvedot sekä lisämittarit esitetään kuvan 25 *Details*-välilehden alla.

Tarkemman tarkastelun perusteella huomattiin, että patteri ja LIV-verkoston menovedet eivät nouse yli 60 °C, vaikka syötettyjen lähtötietojen perusteella pitäisi. Kuva 26 s. 57 esittää patteri- ja LIV-verkoston menovesien lämpötilat tammikuussa. Muokatun säädäntä perusteella, on ulkolämpötila tunteina 457–

505 jatkuvasti  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin järjestelmille tulisi syöttää  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  menovettä. Kuvaajista nähdään, että menovesien lämpötilat putoavat hetkellisesti jopa alle  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , muuten lämpötila on lähes jatkuvasti  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa.

Menovesien alhaista lämpötilaa selvitetiin seuraamalla graafista ohjelmakoodia macrojen sisältä (kytkentäkaavion neliöt kuvassa 24 s. 54). Syyksi selvisi sähkökattilan 3-tieventtiin (kuva 22 s. 51, SL01FV51) ohjausviesti, joka rajoittaa lämmitysvaraajalle menevän veden  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vaikka lämmitysjärjestelmät pyytäisivät korkeampaa lämpötilaa ja sähkökattila tuottaa kuumempaa vettä. Manuaalisesti ohjausviestiä ei voi muuttaa, koska ohjausviesti on sidoksissa muihin parametreihin. Manuaalisella ylikirjoituksella vaarannetaan koko ohjausautomaatiikan toiminta.



Kuva 26. Lämmitysjärjestelmien menovesien lämpötilat tammikuussa. Vasemmalla patterilämmitys- ja oikealla IV-lämmitysverkosto.

## 8.6 Parametrien muutoksen vaikutus simulointituloksiin.

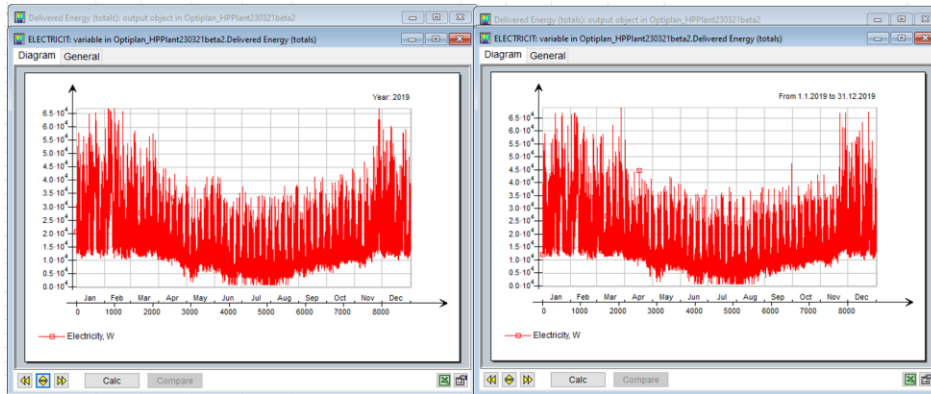
Pappilan lämmitysjärjestelmien korkeiden lämpötilatasojen takia ei Plantia voida hyödyntää Pappilan kytkentäkaavion simuloinnissa eri lämpötilatasoilla. Ohjelman viimeisimmän version toimintoja ja tulosten luotettavuutta haluttiin kuitenkin testata. Planttiin syötettiin järjestelmien menovesikäyräksi kahden pisteen käyrä, jossa  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötilassa menovesi on  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötilassa  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , muut lähtötiedot kappaleen 8.3 mukaan. Järjestelmä simuloitiin, vertailun lähtötasoa varten. Seuraavissa kappaleissa muutetaan eri parametreja yksi kerrallaan ja verrataan muutosten vaikutusta käytettyyn sähköenergian

määrään sekä muihin tuloksiin. Simulointitulosten kuvaajat esitetty liitteessä 2, kappalekohtaisesti on tärkeimmät vertailtavat tulokset.

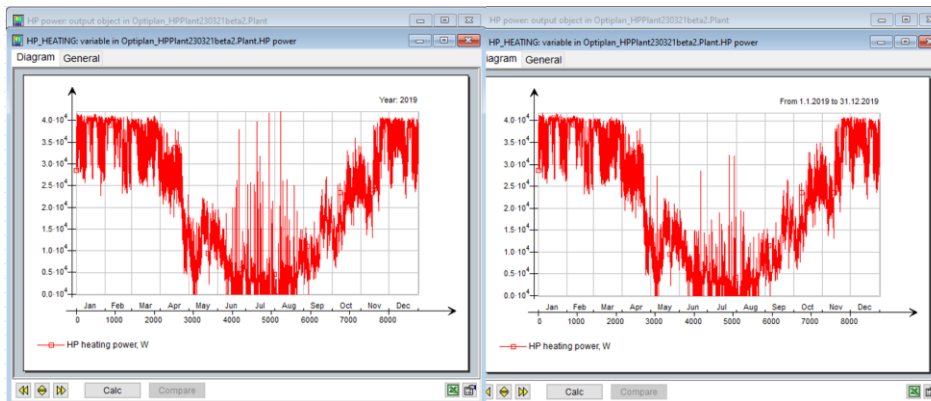
### 8.6.1 Lämmitysvaraajan tilavuuden muutos.

Ensimmäiseksi tarkasteltavaksi muuttujaksi valittiin lämmitysjärjestelmien varaajan tilavuus (kuva 22 s. 51 ML01SX50). Varaajakoko muutetaan kuvan 24 s. 54 *Param*-valikosta. Varaajan kokoa muuttaessa huomattiin, että Planttiin on asetettu kaikille varaajatilavuuksille mitoitus-tehoon sidonnaiset maksimi- ja minimi-tilavuudet. Pappilan mitoitus-tehoilla, ei pysty kasvattamaan varaajan tilavuutta yli 1 m<sup>3</sup>, eikä pienentämään alle 0,36 m<sup>3</sup>. Varaajan tilavuudeksi muutettiin 0,6 m<sup>3</sup>, muut lähtötiedot kappaleen 8.3 mukaan. Hankesuunnitteluvaiheessa Pappilaan mitoitettiin 1,5 m<sup>3</sup> lämmitysvaraaja, joka pidetään mitoitusulkolämpötilassa 75 °C lämpötilassa. Plantin tehosi-donnaiset rajoitukset ovat Pappilan koku-lokan kiinteistölle liian pienet.

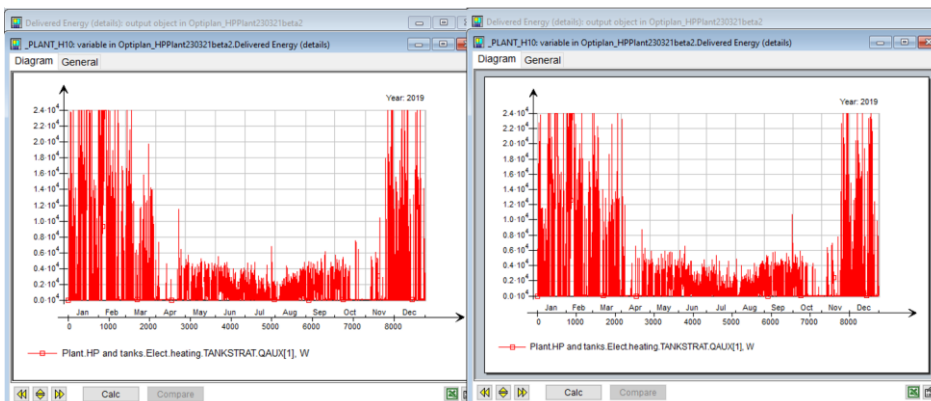
Lämmitysvaraajan tilavuuden pienentäminen lisäsi sähkön kokonaisenergia-määrään vain 0,6 %. Kuvasta 27 s. 59 nähdään, että pienemmällä varaajalla varustetussa järjestelmässä on enemmän korkeita sähkötehopiikkejä. Tämän selittää pienemmän varaajan nopeampi lämpötilavaihtelu, jonka takia sähkökat-tila ja maalämpöpumppu käyvät suuremmalla teholla useammin. Huipputehoa ei voida pienentää, kuvasta 27 nähdään että molempien vaihtoehtojen korkeim-mat tehopiikit ovat 65 kW. Lämpöpumpun lämmitysenergiantuotto pienenee, varsinkin kesäaikana (kuva 28 s. 59). Lämpöpumpun lämmitysenergian pienentyminen, johtuu luultavasti varaajan lämpötilanvaihteluista. Sähkökattila reagoi lämpöpumppua nopeammin lämpötilanvaihteluun, jolloin maalämpöpumpun energiaisuus jää pienemmäksi. Kuvasta 29 s. 59 nähdään, että sähkökattila käy myös kesällä, vaikka maalämpöpumppu pystyisi kattamaan varaajan tarpeet. Sähkökattilan käynnistysraja-arvoja ei pysty ohjelmasta muuttamaan. Ku-vaajien perusteella vaikuttaa siltä, että kattila käynnistyy aina, kun varaajan läm-pötila alittaa asetusarvon, vaikka MLP riittäisi kattamaan tarpeen.



Kuva 27. Maalämpöpöjärjestelmän kokonaissähköteho tuntikohtaisesti. Vasemmalla lähtötaso 1 m<sup>3</sup> varaajalla, oikealla 0,6 m<sup>3</sup> varaajalla.



Kuva 28. Lämpöpumpun tuottama lämmitysenergia. Vasemmalla lähtötaso 1 m<sup>3</sup> varaajalla, oikealla 0,6 m<sup>3</sup> varaajalla.



Kuva 29. Sähkökattilan sähkötehot. Vasemmalla lähtötaso 1 m<sup>3</sup> varaajalla, oikealla 0,6 m<sup>3</sup> varaajalla.

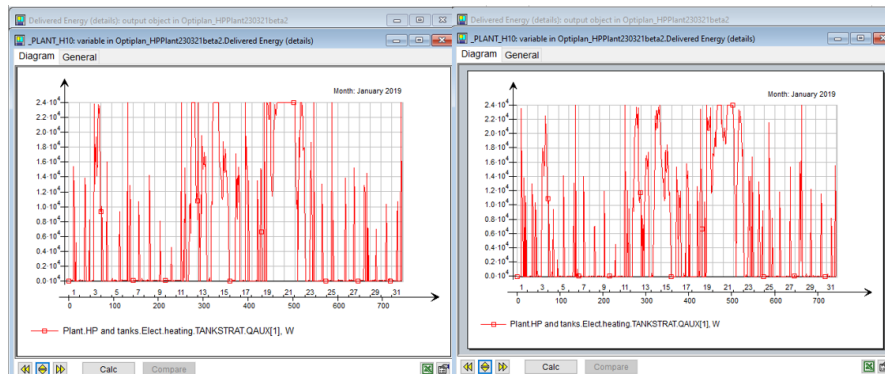
## 8.6.2 Sähkökattilan tuotantolämpötilan rajoitus

Seuraavaksi tarkasteluun otettiin sähkökattila (kuva 22 s. 51 SL01). Sähkökattilan tuotantolämpötilaa rajoitettiin 68 °C ja varaajakoko muutettiin takaisin 1 m<sup>3</sup>. Samalla huomattiin, että sähkökattilan teho on samoin, kuten varaajien tilavuudet, sidonnainen mitoitusuiputehoon. Esimerkkikiinteistön lähtötiedoilla, ohjelman hyväksymä sähkökattilan pienin teho on 22 kW ja suurin 66 kW. Hanke-suunnitteluvaiheessa mitoitettiin Pappilaan kokonais-lisälämmitystehoksi (sähkökattila + vastukset LV-varaajassa, varaajaleikkaukset huomioiden) 24 kW. Plantin lämmitystehosidonnaiset raja-arvot, varsinkin minimiarvo, ovat Pappilan kokoluokan kiinteistölle liian tiukat.

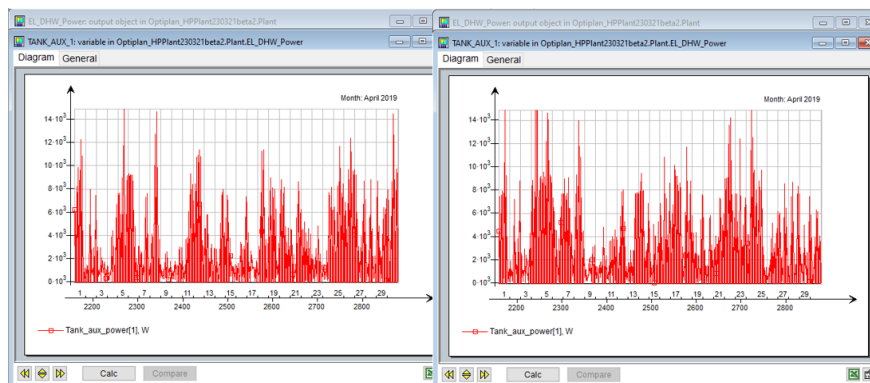
Sähkökattilan tuotantolämpötilan rajoitus pienensi sähkön kokonaisenergiämäärään noin 0,3 %. Simulointitulokset ovat käytännössä identtisiä lähtötasoon verrattuna. Pieniä eroja nähdään kuvassa 30 s. 61, jossa sähkökattila käynnistyy useammin 68 °C asetusarvolla. Tiheämpi käynnistyminen selittyy varaajan lämpötilatasolla, joka on korkeimmillaan 8 °C lämpimämpi, kun lämmitysjärjestelmien menovedet. Varaaja jäähtyy nopeammin alle sähkökattilan käynnistymisrajaan, jonka takia kattila käynnistyy useammin. Varaajaan ajettava kokonaisenergiämäärä on kuitenkin lähes sama asetusarvolla 80 °C ja 68 °C. Siksi muutos ei juurikkaan näy kokonaissähkönkulutuksessa. Tämän lisäksi kattilan sähkönkulutukseen vaikuttaa kappaleessa 8.5 mainitut 3-tieventtiilin ohjausautomaatiikan rajoitteet - kattila lämmittää vain itsensä asetusarvoon, ei lämmitysvaraajaa.

Sähkökattilan asetusarvon muutos näkyy käyttöveden lämmitysvaraajan sähkövastusten käynnistymiskerroissa. Käynnistymiskerrat tihenevät, koska esilämmityssiirtimelle (kuva 22 s. 51 LV01LS50) tulevan veden lämpötila laskee samaan, kuin varaaja. Lämpimän käyttöveden 3-tieventtiilille ja siirtimelle tulevan veden lämpötila laskee, jolloin varaajasta joudutaan käyttämään enemmän kuumaa vettä. Muutos on kuitenkin niin pieni, ettei tätä voi havaita koko vuoden kattavasta kuvaajasta (esitetty liitteessä 2). Kuvassa 31 esitetään käyttövesivaraajan

tuntikohtaiset sähkötehot ja vastusten käynnistymiskerrat huhtikuussa. Kuukausitasolla nähdään pieni ero käynnistymiskerroissa.



Kuva 30. Sähkökattilan tuntikohtaiset sähkötehot tammikuussa. Vasemmalla lähtötaso, jossa asetusarvo 90 °C, oikealla asetusarvo 68 °C.



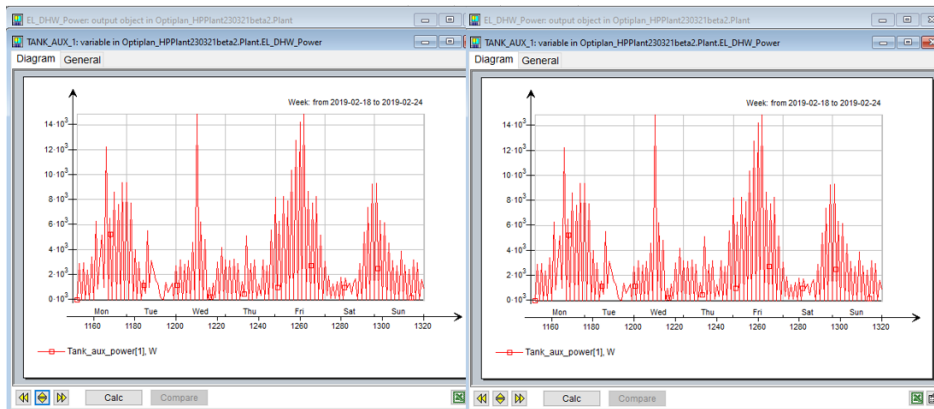
Kuva 31. Sähkökattilan asetusarvon vaikutus lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan sähkönkulutukseen. Vasemmalla lähtötaso, oikealla asetusarvo 68 °C.

### 8.6.3 Lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan tuotantolämpötilan rajoitus

Seuraavaksi tarkasteluun otettiin lämpimän käyttövesivaraajan tuotantolämpötilan asetusarvon muutos. Asetusarvoksi asetettiin 60 °C, 90 °C sijaan. Sähkökattilan tuotantolämpötila on 68 °C edellisen kappaleen mukaiseen.

Lämpimän käyttövesivaraajan tuotantolämpötilan asetusarvon muutos ei vaikuttanut sähkön kokonaisenergiamäärään verratessa kappaleen 8.6.2 simulointiin.

Muutos ei simulointitulosten perusteella juurikaan vaikuttanut mihinkään parametriin. Kuva 32 esittää edellisen kappaleen (8.6.2) ja tämän kappaleen varaajien sähkönkulutukset yhden viikon aikana. Tulokset ovat identtiset. Tämä selittyy varaajan sähkövastusten teholla. Vastukset ovat riittävän tehokkaita kattamaan lämpimän käyttöveden tuotannon myös matalammalla lämpötilalla. Käyttövesivaraajan vastusten teho on myös Plantissa sidonnainen mitoitus-tehoo. Pienin ohjelman sallima vastusten teho esimerkkikiinteistön mitoitus-teholla on 13,5 kW, simuloinneissa käytettiin 14,8 kW.



Kuva 32. Lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajan sähkönkulutus. Vasemmalla asetusarvo 90 °C oikealla 68 °C.

## 8.7 Simuloinnin yhteenveto

Simulointitulosten muutokset ovat loogisia ja parametrien muutoksella on vaikutusta laitteiden toimintaan. Plant vaikuttaa simulointien perusteella toimivan suunnitellusti ja parametrien syöttösivu toimii niin kuin pitää.

Parametrien muutoksella ei tämän työn simulointitulosten perusteella ole juurikaan vaikutusta tuloksiin. Tämän selittää energiamallina käytetty laatikkomalli. Laatikkomallin energiankulutus vastaa Pappilaa, mutta syötetyt mitoitus-tehot eivät riitä laatikkomallille. MLP-laitteet ovat, joko liian alimitoitettuja mallille tai malli ylimitoitettu MLP-laitteille. Simulointien perusteella voidaan todeta, että energiamallin tulee vastata simuloitavaa kiinteistöä. Laatikkomallin suhteutus

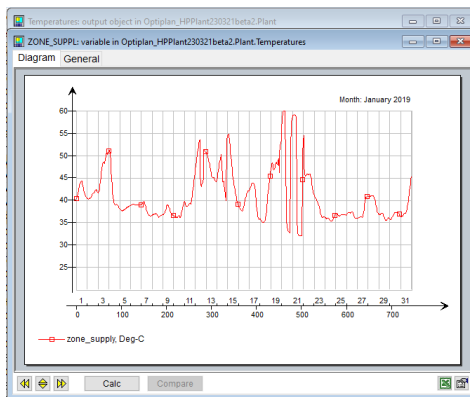
vastaamaan kulutukseltaan esimerkkikiinteistöä ei ole riittävä tapa tehdä tarkastelua. Huonekohtaiset sisälämpötilat vaihtelevat kylmimpinä ajankohtina liikaa, joka vaikuttaa pattereiden luovutustehoon, patteriverkoston paluulämpötilaan sekä ilmanvaihdon poistolämpötilaan. Alhaiset paluu- ja poistolämpötilat jäädyttävät varaajia suunniteltua enemmän. Kun varaajia jäähdytetään suunniteltua enemmän, joutuu maalämpöpumppu ja sähkökattila työskentelemään suunniteltua enemmän, tämä näkyy COP-arvossa sekä suuressa sähkönkulutuksessa. Simuloitujen järjestelmien sähkönkulutus on kohtuuttoman korkea vastatakseen todellisuutta. Liitteen 2 kokonaissähkönkulutuskuvaajista nähdään, että tuntikohtaisen sähkötehon keskiarvo on noin 25–30 kW. COP-kuvaajan mukaan keskimääräinen, tuntikohtainen COP on noin 3–3,5. Laitteet toimivat lämmityskaudella suurilla teholla eikä tämä riitä kattamaan laatikkomallin energiatarpeita. Tämä voidaan havaita kuvasta 33 s. 64 ja liitteestä 2 tammikuun patterilämmitysjärjestelmän menoveden kuvaajista. MLP-laitteet eivät pysty pitämään varaajaa tarpeeksi lämpimänä ja menoveden lämpötilat putoavat pahimmillaan alle 35 °C, vaikka pyyntö on 60 °C.

Palantin nykyinen versio ei suoraan sovellu saneerauskohteiden tarkasteluun. Saneerauskohteiden tarkastelua rajoittaa laitteiden parametrien maksimi- ja minimirajat sekä menoveden lämpötilan rajoitteet. Saneerauskohteissa on rajoitteita; suurimpana usein käytettävä sähköteho. Sähkötehon rajoitteiden takia halutaan optimoida laitteiden kokoja ja tehoja. Tämä ei nykyisessä versiossa onnistu riittävän laajasti, ainakaan Pappilan kokoluokan kiinteistössä. Pappilaan ei esimerkiksi voida simuloida yli 1 m<sup>3</sup> lämmitysvaraajaa, alle 22 kW sähkökattilaa, muuta kuin 0,3 m<sup>3</sup> lämpimän käyttöveden lämmitysvaraajaa tai asentaa käyttövesivaraajaan alle 13 kW vastuksia.

Sähkökattilan käynnistymisrajoja tulisi pystyä muuttamaan. Simulointituloksista on tulkittavissa, että kattila reagoi MLP nopeammin varaajan lämpötilamuutoksiin, jonka takia lämpöpumpun tuottama energiaosuus jää suunniteltua pienemmäksi. Parametrisyötöistä puuttuu varaajan asetusarvon määrittäminen. Nyt sähkökattilan tuotantoteho vaikuttaa *Param*-sivulla viittaavan lämmitysvaraajan haluttuun lämpötilaan, vaikka asetusarvo vaikuttaa pelkästään kattilan lämpötilaan.

Sähkökattilan ja MLP:n porrastuksen ohjausautomaatiikka ei simulointitulosten perusteella vaikuta toimivan optimaalisesti. Sähkökattila käynnistyy heti varaajan lämpötilan pudotessa, vaikka kattilan tulisi odottaa ja seurata MLP:n toimintaa ja käynnistyä vasta, kun MLP käy 100 % teholla eikä varaajan lämpötila nouse.

Simulointituloksista on haastavaa seurata varaajien lämpötiloja. Varaajat on mallinnettu useaan eri osaan, jotta lämpötilakerrostuma voitaisi mallintaa. Varaajien lämpötilatasojen seuranta helpottaisi kuvaajien selkeä nimeäminen, esimerkiksi "lämmitysvaraaja ylin osa", tai kahden/kolmen ylimmän osan keskilämpötilan koonti yhteen kuvaajaan.



Kuva 33. Patterijärjestelmän menoveden lämpötila tammikuussa, lähtötason laitemitoituksilla.

## 9 Johtopäätökset ja tulosten analysointi

Työn tutkimuskysymyksiä ja tuloksia vertailtaessa voidaan todeta, että tutkimuskysymyksiin saatiin vastaukset. Pattereiden lämpötilatasojen optimointiin löydettiin tarkastelutapa. Vanhoja pattereita voidaan huolellisella optimoinnilla hyödyntää tehokkaasti maalämpöjärjestelmässä. Työllä saatiin myös luotua lisäarvoa esimerkikiinteistön omistajaorganisaatiolle tulevaa maalämpöhanketta ajatellen. Simulointitulokset eivät olleet odotetun mukaisia, mutta tulosten perusteella saatiin kallisarvoista, miten laskentatyökalun seuraavaan versioon tulisi kehittää, jotta se soveltuisi paremmin saneerauskohteille.

### *Yhteenveto pattereiden optimoinnista*

Esimerkkikiinteistöön tehtiin ensin lämpöhäviölaskelma. Laskelmissa vertailtiin vaipan ilmanpitävyyttä eli  $q_{50}$ -luvun vaikutusta lämpöhäviöihin. Tulos perusteella selvisi, että vaipan ilmanpitävyydellä on suuri merkitys lämpöhäviöihin. Kokeusperäisesti todettakoon, että monella suunnittelijalla, joka tekee saneerauskohteiden lämpöhäviölaskelmia, ei ole käsitystä luvun suuresta vaikutuksesta. Parhaimmassa tapauksessa suunnittelija valitsee *YM*:än ohjeesta sopivalta vaikuttavan arvon kyseenalaistamatta valintaa. Pahimmassa tapauksessa lukuun ei kiinnitetä ollenkaan huomiota lämpöhäviöitä laskettaessa ja käytetään laskentaohjelman vakioarvoa, joka voi olla mikä tahansa 1 ja 20 välillä. Liian pienen  $q_{50}$ -luvun valinnalla alimitoitetaan koko lämmitysjärjestelmä. Alalla tehdään harvoin vaipan ilmanpitävyyssmittauksia saneerauskohteille. Tämän työn tulosten perusteella voidaan todeta, että varsinkin lämmitysmuotoa vaihdettaessa kannattaisi mittaus tehdä, jotta patteritehot saadaan mitoitettua oikein. Lämmitysmuodon saneeraus on suuri investointi, josta vaipan ilmapitävyyden mittaus olisi murto-osa sen mahdollisesti tuomasta säästöpotentiaalista.

Lämpöhäviölaskelmat tehtiin usealle ulkolämpötilalle, jotta pattereiden luovutus-tehoja voitaisiin vertailla lämpöhäviöihin muissakin tilanteissa, kun mitoitustilanteessa  $-26\text{ °C}$ . Patterit optimoitiin lämpöhäviölaskelmien perusteella. Lämpöhäviölaskelmat ovat tärkeitä, jotta varmistutaan pattereiden todellisesta tehontarpeesta.

Pappilan pattereiden uusia lämpötilatasoja tarkasteltiin kahdella eri laskentatavalla; yksinkertaisesti ja optimoimalla. Laskennan lähtökohtina oli vanhojen pattereiden hyödyntäminen, osan uusiminen tai kaikkien uusiminen. Tärkeintä oli selvittää, mihin ulkolämpötilaan  $60\text{ °C}$  menovesi kattaa lämpöhäviöt. Kun patterit saatiin optimoitua  $60\text{ °C}$  menovedelle, selvitettiin mikä menoveden lämpötilan tulee olla, jotta patterin luovutusteho riittää pitämään huoneen lämpimänä myös  $-26\text{ °C}$  ulkolämpötilassa. Tämän perusteella rakennettiin Excel-työkalu.

Kun lähtökohtana oli vanhojen pattereiden säästäminen, saatiin tulokseksi, että tarkemmalla tarkastelutavalla katetaan 60 °C menovedellä 90 % testisään ulkolämpötiloista aina -6 °C saakka. Yksinkertaisella tarkastelutavalla sama tulos oli noin 40 % ja +8 °C. Sähkökattilan käyttö pienenee optimoiduilla lämpötilatasoilla huomattavasti. Mitoitusulkolämpötilassa menoveden lämpötila ei juurikaan muuttunut vanhoilla pattereilla.

Kun yhden tarkasteltavan huoneen patterit uusitaan, nähdään tuloksista, että järjestelmä pystyy kattamaan 60 °C menovedellä lämpöhäviöt -9 °C ulkolämpötilaan saakka. Testisäädatassa -9 °C vastaa 94 % tuntikohtaista peittoa. Tässä vaihtoehdossa pystyttiin myös madaltamaan menoveden korkeinta lämpötilaa alkuperäisestä.

Kaikkien pattereiden uusimisvaihtoehdon suurin rajoittava tekijä oli uusille pattereille käytössä oleva fyysinen tila. Pattereiden korkeutta ei kannata kasvattaa turhaan, koska asennuskustannukset kasvavat. Pituuttakaan ei voi loputtomasti kasvattaa. Patterit saatiin kuitenkin mitoitettua niin, että 60 °C menovedellä katetaan lämpöhäviöt -20,6 °C ulkolämpötilassa. Mitoitus vastaa 100 % testisäädatan tunneista. Sähköistä lisälämmitystä, eli sähkökattilaa ja sähkövastuksia tarvitaan näin ollen, vain alle -20,6 °C ulkolämpötiloissa.

Yhteenvetona pattereiden optimoinnista voidaan todeta, että huolellisesti tehdyllä optimoinnilla voidaan vanhoja pattereita hyödyntää maalämpöjärjestelmässä. Uusista menovesien lämpötilakäyristä nähdään suoraan huolellisen suunnittelun tuoma lisäarvo. Optimoidulla lämpötilatasoilla katetaan maalämmöllä suurempi energiamäärä, kun yksinkertaisesti tarkastellun järjestelmän lämpötilatasoilla. Laitteiden tekniset käyttöiät kannattaa huomioida pattereiden saneerausvaihtoehtoja harkittaessa. Pappilan pattereissa on käyttöikä runsaasti jäljellä. Mikäli lämmitysjärjestelmän teknistä käyttöikä on vähemmän jäljellä kuin uuden maalämpöjärjestelmä teoreettinen käyttöikä, kannattaa patterijärjestelmän uusimista harkita. Tällöin koko järjestelmä voidaan suunnitella maalämmölle optimaaliseksi. Pappilan pattereiden tuotetiedot olivat helposti

saatavilla. Tämä ei aina ole yhtä helppoa vanhojen pattereiden osalta. Valmistajan tuotetiedot pattereista tarvitaan, mikäli pattereita halutaan tarkasti optimoida. Tuotetiedot tarvitaan viimeistään, kun järjestelmää suunnitellaan suunnitteluohjelmilla. Esimerkkikiinteistön lämmitysjärjestelmän putket ovat myös väljiä, joten virtaamia voitiin nostaa 30 %. Putkistoiden virtaamat tulee aina varmistaa, sillä kaikissa kiinteistöissä ei virtaamia voi nostaa yhtä paljon.

#### *Yhteenveto simuloinnista ja simulointiohjelmasta*

Tässä työssä tutkittiin simulointiohjelman viimeisimmän version soveltuvuutta saneerauskohteille. Simulointitulosten perusteella ohjelma toimii toivotulla tavalla. Parametrien muutokset vaikuttavat oikealla tavalla laitteisiin ja tuloksiin. Saneerauskohteiden simulointiin nykyinen versio ei täysin sovellu, saneerauskohteiden korkeiden lämmitysjärjestelmien menovesilämpötilojen takia. Nykyisellä versiolla ei pystytä simuloimaan yli 60 °C menovettä. Menoveden rajoitteiden takia esimerkkikiinteistön uusia menoveden lämpötiloja ei voitu simuloida. Ohjelmiston jatkokehityksen kannalta korkeampien lämpötilojen saavuttaminen ei pitäisi olla ongelma. Yli 60 °C menoveden rajoittava tekijä selvisi. Sähkökattilan 3-tieventtiilin ohjausautomaatiikka rajoittaa kattilasta lämmitysvaraajaan ajettavan veden lämpötilaa. Vaikka sähkökattilan veden tuotantolämpötilan asetusarvon voi nostaa yli 60 °C, ei venttiili salli varaajalle ajettavaksi yli 60 °C vettä. Asetusarvoa ei voi manuaalisesti päälle-kirjoittaa, koska arvo on sidonnainen muihin arvoihin ja päällekirjoituksella vaarannetaan koko ohjausautomaatiikan toiminta.

Järjestelmää haluttiin kuitenkin testata ohjelmistokehityksen kannalta, vaikka esimerkkikiinteistön lämpötiloja ei voitu simuloida. Viimeisimmän version uusi parametrien syöttösivu toimii suunnitellusti ja on helppokäyttöinen. Parametreja muuttaessa huomattiin, että monelle laitteelle on ohjelmallisesti asetettu pienin- ja suurin sallittu koko tai teho, jotka ovat sidoksissa syötettyihin järjestelmien kokonaistehoihin. Saneerauskohteissa rajoittavana tekijänä on usein sähköteho. Parametrien raja-arvot eivät ole riittävän laajoja saneerauskohteille. Laitteiden

sähkötehoja ja varaajakokoja tulisi pystyä muuttamaan laajemmin, jotta optimaaliset laitekoot ja tehot saataisiin selvitettyä.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että tässä työssä tehdyllä energiamallin suhteutuksella ei saatu todenmukaisia tuloksia maalämpöjärjestelmän osalta. Energiamallin tulee vastata simuloitavaa kiinteistöä paremmin. Energiamalli rajoittaa nopealla aikataululla tehtävien maalämpökytkentöjen simulointia, koska mallin muokkaaminen on työlästä ja tarkemman mallin liittäminen osaksi simulointia kasvattaa laskenta-aikaa.

Alla on esitetty tämän työn tulosten perusteella ohjelmiston jatkokehitysideoita:

- Yli 60 °C menoveden saavuttaminen lämmitysverkostoille.
- Parametrien tehosidonnaisten raja-arvojen kasvatus.
- Lämmitysvaraajan asetusarvon tai asetusarvoalueen määrittäminen, varaajan lämpötilaksi voisi valita esimerkiksi lämpötilakäyrä +5 °C.
- Simulointi ilman energiamallia, parametrinsyöttösivulle voisi liittää tiedoston, joka sisältää tuntikohteiset energiantarpeet. Vaihtoehtoisesti luotaisiin valmiita pelkistettyjä energiamalleja, joista käyttäjä voi valita sopivan kooksen ja muokata sopivaksi.
- Käyttöveden putkikytkennän muuttaminen, nykyisessä versiossa käyttövesi tuotetaan käytännössä pelkällä sähköllä ja tarpeen mukaan siirtimellä.
- Sähkökattilan käynnistyksen rajoitus tietyn ulkolämpötilan yläpuolella.
- Sähkökattilan käynnistyminen vasta kun MLP käy 100 % teholla.
- Varaajien lämpötilatasojen seuraamisen helpottaminen tuloksista.
- Varaajien käyttöajan ulkopuoleisen latauksen hyödyntäminen niin että lämmityskaudella lämpötila voitaisi nostaa asetusarvon yläpuolelle.
- Varaajien lämpötilavaihtelun raja-arvojen määrittäminen, joka vähentäisi MLP:n ja sähkökattilan käynnistymisvälejä.

Planttia ovat olleet kehittämässä Swecolta pääsääntöisesti energiasuunnittelijat. Tämän työn kautta saatiin LVI-suunnittelun sekä saneerausten näkökulmasta tutkittua Planttia ja selvitettyä jatkokehitysmahdollisuuksia. Uuden näkökulman

ansiosta pystyttiin tunnistamaan ohjelman kehitysaiheet ja käyttörajoitteet saaneerauskohteiden simuloiteja varten. Työn tulosten perusteella pystytään ohjelmaa kehittämään monipuolisemmaksi.

Simulointitulosten ja ohjelman käytön perusteella voidaan todeta, että käyttäjän on tunnettava hyvin IDA ICE:n ja Plantin toimintaperiaatteet. Ohjelma on laaja ja huomioi rakennuksen energiamallin ja kytkentäkaavion kokonaisvaltaisesti. Käyttäjän on osattava tulkita Plantin tulosten lisäksi energiamallin tuloksia, jotta energiatarve vastaisi simuloitavaa rakennusta. Tässä työssä käytettiin energiamallina niin sanottua laatikkomallia, jotta simuloinnin laskenta-aika saatiin minimoitua. Laatikkomallia käyttämällä pystyttiin työn aikataulun puitteissa tekemään useampi simulointi eri lähtötiedoilla. Simulointien tuloksia analysoimalla löydettiin ohjelmalle kehitysaiheita. Energiatarpeen skaalaus laatikkomallilla pitäisi ohjelmistokehittäjän mukaan onnistua; tässä on myös Swecolla tehdyissä testisimuloinneissa onnistuttu, neliöiltään isompia uudisrakennuksia tarkasteltaessa. Tämän työn tulosten perusteella on kuitenkin tulkittavissa, että energiamallin tulisi vastata lämmitettäviltä neliöiltään paremmin simuloitavaa kiinteistöä. Lämmitettävien neliöiden skaalaus vaikuttaa tulosten ja Swecolla aikaisemmin tehtyjen testisimulointien perusteella olevan sitäkin tärkeämpää, mitä pienempää kiinteistöä simuloidaan, jotta Plantin tulokset saadaan vastaamaan simuloitavaa kiinteistöä.

## Lähteet

- Energiateollisuus ry. (22. 10 2021). *K1/2021. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet*. Haettu 20. 02 2022 osoitteesta [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/rakennusten\\_kaukolammitys\\_maaraykset\\_ja\\_ohjeet.\\_julkaisu\\_k1\\_2021.html](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/rakennusten_kaukolammitys_maaraykset_ja_ohjeet._julkaisu_k1_2021.html)
- Harju, P. (2010). *Lämmitystekniikan oppikirja* (4. Painos p.). Kouvola: Penan Tieto-Opus Ky. Haettu 14. 03 2022
- Helen. (10. 12 2021). *Miten maalämpö toimii?* Haettu 13. 03 2022 osoitteesta <https://www.helen.fi/taloyhtiot/lammitys/artikkeleita-l%c3%a4mmityksest%c3%a4/miten-maalampo-toimii>
- Helsingin kaupungin rakennusvalvonta. (01 2021). (Talotekniikkayksikkö, Toim.) Haettu 22. 02 2022 osoitteesta [hel.fi/rava](https://www.hel.fi/rava): <https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/Maalampo.pdf>
- Honkala, S. (25. 04 2021). *Dipolomityö, Rakennusten Energijärjestelmien simulointipohjainen mitoitusmenetelmä*. Haettu 03. 03 2022 osoitteesta Ei julkisesti saatavilla
- Ilmatieteenlaitos. (2021). *Ulkoilman lämpötilan pysyvyysarvo TRY2012*. Haettu 02. 03 2022 osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energiälaskennan-testivuodet-nyky>
- Kaappola, E. (17. 09 2021). *Metropolia YAMK T000DS52 3002 Energian tuotanto kierrätys ja varastointi lämpöpumpuilla, luentomateriaali*. Helsinki. Haettu 21. 02 2021 osoitteesta Metropolia YAMK: Ei julkisesti saatavilla
- Kaappola, E.;Hirvelä, A.;Jokela, M.;& Kianta, J. (2015). *Kylmätekniikan perusteet* (4. painos p.). Helsinki: Opetushallitus. Haettu 24. 10 2021
- Nibe. (2022). *Nibe ammattilaiset, kytkentämallit ja -kaaviot, kytkentäperiaate NIBE F1345/F1355*. Haettu 23. 02 2022 osoitteesta <https://ammattilaiset.nibe.fi/ammattilaiset/kytkentamallit-ja-kaaviot/nibe-f1345/kytkentamallit-ja-kaaviot/>
- Oikeusministeriö. (2017). *1048/2017, Laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun (E-luvun) määrittäminen energiatodistuksessa, liite 1*.

- Haettu 04. 04 2022 osoitteesta Finlex:  
<https://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/6822.pdf>
- Oilon. (2021). *Kiinteistöpolttimet 15-550kW, tuote-esite*. Haettu 13. 03 2022 osoitteesta <https://oilon.com/wp-content/uploads/2021/07/Kiinteistopolttimet.pdf>
- Purmo. (2007). *Purmo esitteet, tehnotalokentataulukko, Compact, C 2007*. Haettu 02. 03 2022 osoitteesta <https://www.purmo.com/fi-fi/tyokalut/esitteet>
- Purmo. (07 2018). *Purmo, Tekninen esite*. Haettu 15. 03 2022 osoitteesta [https://www.purmo.com/public/prod/bcd2c0f2-6156-46c6-99cd-ddcde7354507/11515/8e64f9e9b0210a44798cb3581d6cf8c1/fi-fi-files-purmo\\_technicalbrochure\\_fi\\_0718\\_web.pdf](https://www.purmo.com/public/prod/bcd2c0f2-6156-46c6-99cd-ddcde7354507/11515/8e64f9e9b0210a44798cb3581d6cf8c1/fi-fi-files-purmo_technicalbrochure_fi_0718_web.pdf)
- Rakennustieto RTS. (11 2002). *LVI 12-10343, Vesikiertoinen patterilämmitys*. Haettu 03. 02 2022 osoitteesta [https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2012-10343?external\\_system=Juha&page=1](https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2012-10343?external_system=Juha&page=1)
- Rakennustieto RTS. (10 2005). *LVI 11-10394, Kevytöljylämmitys*. Haettu 23. 02 2022 osoitteesta <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2011-10394>
- Rakennustieto RTS. (06 2018). *LVI 11-10624, Maalämpöpumput*. Haettu 22. 02 2022 osoitteesta <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/LVI%2011-10624>
- Seppänen, O. (2001). *Rakennusten lämmitys (2. päivitetty versio p.)*. Espoo: Suomen LVI-liitto ry. Haettu 14. 03 2022
- SULPU. (2021). *Suomen lämpöpumppuyhdistys SULP ry*. Haettu 22. 02 2022 osoitteesta <https://www.sulpu.fi/lampopumput/maalampopumput/tomallensenera>
- (04. 04 2013). *maalämpöjärjestelmä on mitoitettava huolellisesti*. (K. Manner, Toim.) Haettu 22. 02 2022 osoitteesta <https://www.tomallensenera.fi/blogi/maalampojarjestelma-on-mitoitettava-huolellisesti>
- Vihti. (2009). *Kiinteistön omistajan arkisto, ei julkisesti saatavilla*. Haettu 03. 12 2021
- Ympäristöministeriö. (30. 03 2011). *D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma*. Haettu 20. 02 2022 osoitteesta [https://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012\\_Suomi.pdf](https://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf)

Ympäristöministeriö. (28. 08 2013). *Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa.* (J. J. Toivo, Toim.) Haettu 22. 02 2022 osoitteesta <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40953>

Ympäristöministeriö. (27. 12 2017a). *1010/2017, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta.* Haettu 20. 02 2022 osoitteesta <https://www.ym.fi/download/noname/%7BFD99E48D-F28B-452E-8175-29EA77ABD4CA%7D/133872>

Ympäristöministeriö. (20. 12 2017b). *Ympäristöministeriön ohje, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.* Haettu 20. 02 2022 osoitteesta <https://www.ym.fi/download/noname/%7B4332AA81-75E1-4CA0-B208-B0ACB60A267F%7D/133692>

## Liite 1. Lämpöhäviölaskelman tulokset

Laskelmat perustuvat Ympäristöministeriön energiatehokkuusoppaaseen, numerot esim. 10.4 viittaavat ohjeen kaavoihin.  
<https://www.ym.fi/download/noname/%7B4332AA81-75E1-4CA0-B208-B0ACB60A267F%7D/133692>

Rakenne	U-arvo	Lämpötilat
Ulko-seinä (US)	0.2055 W/m <sup>2</sup> K	$T_{ulko\lämpötila}$ -26 °C
Alapohja (AP)	0.1775 W/m <sup>2</sup> K	$T_{sisä\lämpötila}$ 21 °C
Yläpohja (YP)	0.1079 W/m <sup>2</sup> K	$\Delta T$ 47 °C
Lämpimien tilojen välipohja (VP1)	2.367 W/m <sup>2</sup> K	$T_{maa}$ 3.4 °C, YM ohje taulukko 3.4
Ullakkotilan välipohja (VP2)	0.2 W/m <sup>2</sup> K	$T_{alapohja}$ 1.4 °C, YM ohje 10.2.4
Ikkunat	2.1 W/m <sup>2</sup> K	
Ulko-ovet	1.4 W/m <sup>2</sup> K	
Kylmäsilta nurkka	0.06 W/mK	<b>IV</b>
Kylmäsilta ikkunakarmi	0.04 W/mK	$T_{tuloilma}$ 20 °C
Kylmäsilta ulko-ovenkarmi	0.04 W/mK	
		<b>Vuotoilma</b>
		$q_{50}$ 20 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
		kerroin X 24 YM ohje 3.8

Huone 108				
<b>Huoneen mitat</b>				
korkeus [m]	levyys [m]	syvyys [m]		
3	8.3	6.3		
<b>Ikkunat, YM ohje 10.4</b>				
Korkeus [m]	Leveys [m]	Pinta-ala /pituus [m <sup>2</sup> ] tai [m]	U-arvo/kond. W/m <sup>2</sup> K tai W/mk	Lämpöhäviö [W]
1.8	1.2	2.16	2.1	213
1.8	1.2	2.16	2.1	213
1.8	1.2	2.16	2.1	213
<b>Ikkunakarmi (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
1.802	1.202	6.008	0.04	11
1.802	1.202	6.008	0.04	11
1.802	1.202	6.008	0.04	11
<b>Ulkoseinät, YM ohje 10.4</b>				
3	8.3	18.42	0.2055	178
<b>Alapohja, YM ohje 10.4</b>				
8.3	6.3	52.29	0.1775	182
<b>Yläpohja, kylmä ollakko (YPn U-arvo), YM ohje 10.4</b>				
8.3	6.3	52.29	0.2	492
<b>Vuotoilma, YM ohje 3.8 ja 10.6</b>				
q <sub>50</sub>	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s		
20	24.9	0.00576		327
<b>Ilmanvaihto, YM ohje 10.7</b>				
Tulo l/s	m <sup>3</sup> /s	Tsis, puh [°C]		
270	0.27	20		326
<b>TOT</b>				<b>2178</b> W
				42 W/m <sup>2</sup>

Huone 109/110				
<b>Huoneen mitat</b>				
korkeus [m]	levyys [m]	syvyys [m]		
3	5.3	10.5		
<b>Ikkunat, YM ohje 10.4</b>				
Korkeus [m]	Leveys [m]	Pinta-ala /pituus [m <sup>2</sup> ] tai [m]	U-arvo/kond. W/m <sup>2</sup> K tai W/mk	Lämpöhäviö [W]
1.8	1.2	2.16	2.1	213
1.8	1.2	2.16	2.1	213
<b>Ikkunakarmi (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
1.802	1.202	6.008	0.04	11
1.802	1.202	6.008	0.04	11
<b>Ulko-ovi, YM ohje 10.4</b>				
2.2	1.2	2.64	1.4	174
<b>Ovenkarmi, YM ohje 10.5</b>				
2.202	1.202	6.808	0.04	13
<b>Ulkoseinät, YM ohje 10.4</b>				
3	5.3	13.74	0.2055	133
3	5.3	11.1	0.2055	107
<b>Alapohja, YM ohje 10.4</b>				
5.3	10.5	55.65	0.1775	194
<b>Yläpohja, kylmä ollakko (YPn U-arvo), YM ohje 10.4</b>				
5.3	10.5	55.65	0.2	523
<b>Vuotoilma, YM ohje 3.8 ja 10.6</b>				
q <sub>50</sub>	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s		
20	31.8	0.00736		418
<b>Ilmanvaihto, YM ohje 10.7</b>				
Tulo l/s	m <sup>3</sup> /s	Tsis, puh [°C]		
150	0.15	20		181
<b>TOT</b>				<b>2191</b> W
				39 W/m <sup>2</sup>

<b>Huone 107</b>				
<b>Huoneen mitat</b>				
korkeus [m]	leveys [m]	syvyys [m]		
3	4.45	5		
<b>Ikkunat, YM ohje 10.4</b>				
Korkeus [m]	Leveys [m]	Pinta-ala /pituus [m <sup>2</sup> ] tai [m]	U-arvo/kond. W/m <sup>2</sup> K tai W/mk	Lämpöhäviö [W]
1.8	1.2	2.16	2.1	213
1.8	1.2	2.16	2.1	213
<b>Ikkunakarmi (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
1.802	1.202	6.008	0.04	11
1.802	1.202	6.008	0.04	11
<b>Ulkoseinät, YM ohje 10.4</b>				
3	4.45	9.03	0.2055	87
3	5	12.84	0.2055	124
<b>Nurkka (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
3			0.06	8
<b>Alapohja, YM ohje 10.4</b>				
4.45	5	22.25	0.1775	77
<b>Yläpohja (lämpimään tilaan), YM ohje 10.4</b>				
4.45	5	22.25	2.367	0
<b>Vuotoilma, YM ohje 3.8 ja 10.6</b>				
q50	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s		
20	28.35	0.00656		372
<b>Ilmanvaihto, YM ohje 10.7</b>				
Tulo l/s	m <sup>3</sup> /s	Tsis, puh [°C]		
75	0.075	20		91
<b>TOT</b>				<b>1209</b> W
				54 W/m <sup>2</sup>

<b>Huone 106</b>				
<b>Huoneen mitat</b>				
korkeus [m]	leveys [m]	syvyys [m]		
3	4.45	5		
<b>Ikkunat, YM ohje 10.4</b>				
Korkeus [m]	Leveys [m]	Pinta-ala /pituus [m <sup>2</sup> ] tai [m]	U-arvo/kond. W/m <sup>2</sup> K tai W/mk	Lämpöhäviö [W]
1.8	1.2	2.16	2.1	213
1.8	1.2	2.16	2.1	213
<b>Ikkunakarmi (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
1.802	1.202	6.008	0.04	11
1.802	1.202	6.008	0.04	11
<b>Ulkoseinät, YM ohje 10.4</b>				
3	4.45	9.03	0.2055	87
3	5	12.84	0.2055	124
<b>Nurkka (kylmäsilta), YM ohje 10.5</b>				
3			0.06	8
<b>Alapohja, YM ohje 10.4</b>				
4.45	5	22.25	0.1775	77
<b>Yläpohja (lämpimään tilaan), YM ohje 10.4</b>				
4.45	5	22.25	2.367	0
<b>Vuotoilma, YM ohje 3.8 ja 10.6</b>				
q50	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s		
20	28.35	0.00656		372
<b>Ilmanvaihto, YM ohje 10.7</b>				
Tulo l/s	m <sup>3</sup> /s	Tsis, puh [°C]		
75	0.075	20		91
<b>TOT</b>				<b>1209</b> W
				54 W/m <sup>2</sup>

Koonti Q50=20	
Lämpöhäviöt eri ulkolämpötiloissa	
Huone	-26°C -24°C -22°C -20,6°C -18°C -16°C -14°C -12°C -10°C -8°C -6°C -4°C -2°C 0°C 2°C 4°C 6°C 8°C 10°C 12°C 14°C 16°C 18°C 20°C
107	1209W 1165W 1120W 1089W 1032W 987W 943W 899W 855W 810W 766W 722W 677W 633W 589W 544W 500W 456W 412W 367W 323W 279W 234W 190W
106	1209W 1165W 1120W 1089W 1032W 987W 943W 899W 855W 810W 766W 722W 677W 633W 589W 544W 500W 456W 412W 367W 323W 279W 234W 190W
108	2178W 2107W 2036W 1986W 1894W 1822W 1751W 1680W 1609W 1538W 1467W 1396W 1325W 1254W 1183W 1112W 1041W 970W 899W 828W 757W 686W 614W 543W
109/110	2191W 2114W 2036W 1982W 1882W 1804W 1727W 1650W 1573W 1495W 1418W 1341W 1263W 1186W 1109W 1032W 954W 877W 800W 722W 645W 568W 491W 413W

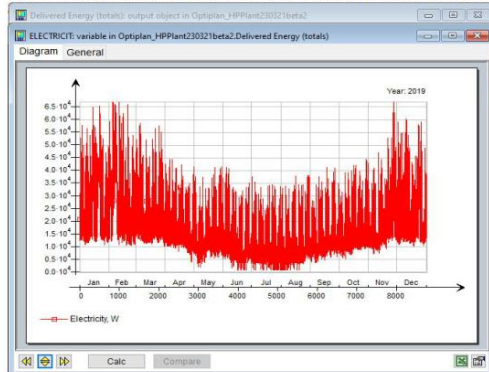
Koonti Q50=14	
Lämpöhäviöt eri ulkolämpötiloissa	
Huone	-26°C -24°C -22°C -20,6°C -18°C -16°C -14°C -12°C -10°C -8°C -6°C -4°C -2°C 0°C 2°C 4°C 6°C 8°C 10°C 12°C 14°C 16°C 18°C 20°C
107	1097W 1058W 1018W 990W 939W 900W 860W 820W 781W 741W 702W 662W 623W 583W 544W 504W 465W 425W 385W 346W 306W 267W 227W 188W
106	1097W 1058W 1018W 990W 939W 900W 860W 820W 781W 741W 702W 662W 623W 583W 544W 504W 465W 425W 385W 346W 306W 267W 227W 188W
108	2080W 2013W 1946W 1899W 1812W 1745W 1678W 1611W 1545W 1478W 1411W 1344W 1277W 1210W 1143W 1076W 1010W 943W 876W 809W 742W 675W 608W 541W
109/110	2066W 1994W 1922W 1871W 1778W 1706W 1634W 1562W 1490W 1418W 1346W 1274W 1202W 1130W 1058W 986W 914W 842W 770W 698W 627W 555W 483W 411W

Koonti Q50=10	
Lämpöhäviöt eri ulkolämpötiloissa	
Huone	-26°C -24°C -22°C -20,6°C -18°C -16°C -14°C -12°C -10°C -8°C -6°C -4°C -2°C 0°C 2°C 4°C 6°C 8°C 10°C 12°C 14°C 16°C 18°C 20°C
107	1023W 986W 950W 925W 877W 841W 805W 768W 732W 695W 659W 623W 586W 550W 514W 477W 441W 404W 368W 332W 295W 259W 223W 186W
106	1023W 986W 950W 925W 877W 841W 805W 768W 732W 695W 659W 623W 586W 550W 514W 477W 441W 404W 368W 332W 295W 259W 223W 186W
108	2014W 1950W 1886W 1841W 1758W 1694W 1630W 1566W 1501W 1437W 1373W 1309W 1245W 1181W 1117W 1053W 989W 925W 860W 796W 732W 668W 604W 540W
109/110	1982W 1914W 1845W 1797W 1708W 1640W 1572W 1503W 1435W 1366W 1298W 1230W 1161W 1093W 1024W 956W 888W 819W 751W 682W 614W 546W 477W 409W

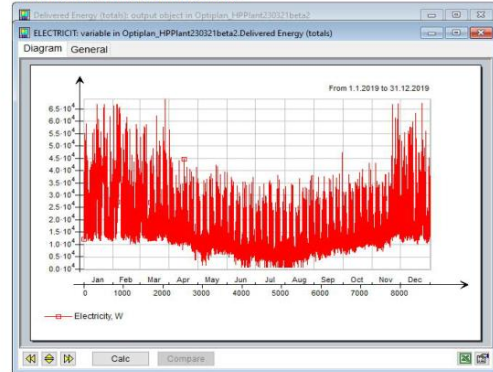
Koonti Q50=8	
Lämpöhäviöt eri ulkolämpötiloissa	
Huone	-26°C -24°C -22°C -20,6°C -18°C -16°C -14°C -12°C -10°C -8°C -6°C -4°C -2°C 0°C 2°C 4°C 6°C 8°C 10°C 12°C 14°C 16°C 18°C 20°C
107	986W 951W 916W 892W 846W 812W 777W 742W 707W 672W 638W 603W 568W 533W 498W 464W 429W 394W 359W 325W 290W 255W 220W 185W
106	986W 951W 916W 892W 846W 812W 777W 742W 707W 672W 638W 603W 568W 533W 498W 464W 429W 394W 359W 325W 290W 255W 220W 185W
108	1982W 1919W 1856W 1812W 1731W 1668W 1605W 1543W 1480W 1417W 1354W 1292W 1229W 1166W 1104W 1041W 978W 915W 853W 790W 727W 665W 602W 539W
109/110	1940W 1874W 1807W 1760W 1674W 1607W 1541W 1474W 1407W 1341W 1274W 1207W 1141W 1074W 1008W 941W 874W 808W 741W 674W 608W 541W 475W 408W

## Liite 2. Simulointitulokset

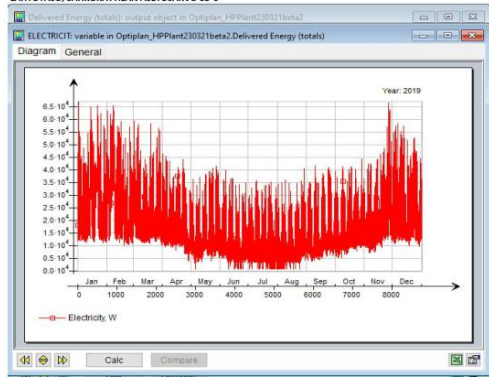
MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN KÄYTTÄMÄ SÄHKÖENERGIAMÄÄRÄ, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, VARAAJA 1m<sup>3</sup>, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 80°C, KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSVARAAJAN ASETUSARVO 90°C



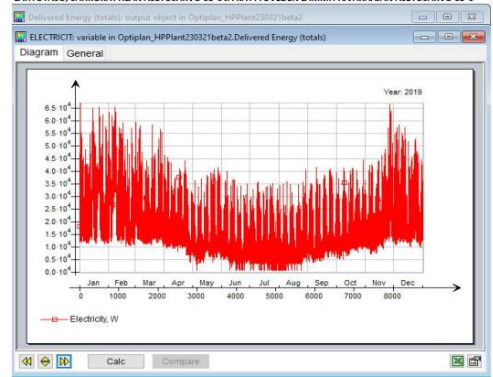
MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN KÄYTTÄMÄ SÄHKÖENERGIAMÄÄRÄ, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASOSTA MUUTETTU LÄMMITYSVARAAJA 0.6m<sup>3</sup>



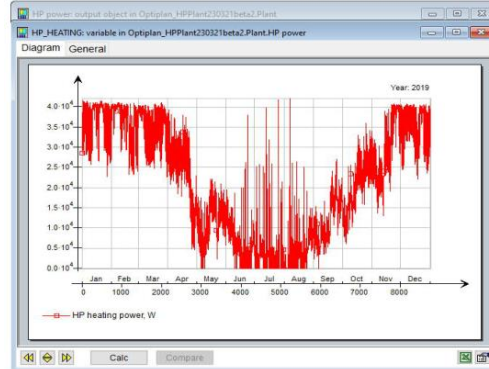
MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN KÄYTTÄMÄ SÄHKÖENERGIAMÄÄRÄ, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 68°C



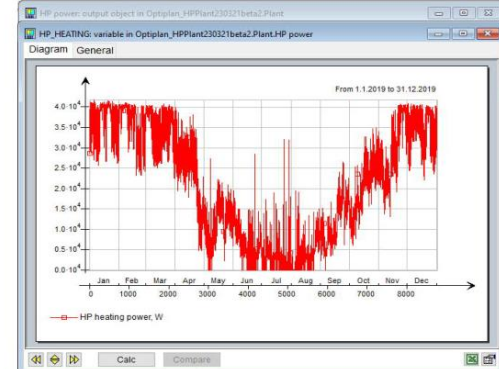
MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN KÄYTTÄMÄ SÄHKÖENERGIAMÄÄRÄ, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 68°C JA KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSVARAAJAN ASETUSARVO 68°C



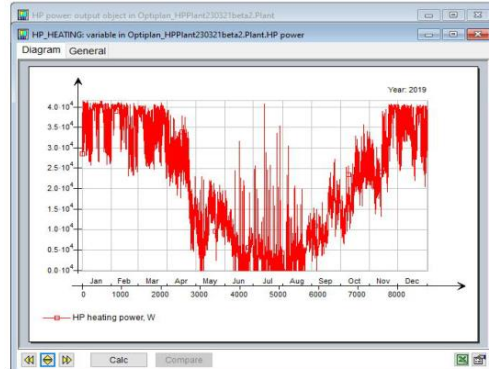
LÄMPÖPUMPUN LÄMMITYSTEHOJEN TUOTTO, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, VARAAJA 1m<sup>3</sup>, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 80°C, KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSVARAAJAN ASETUSARVO 90°C



LÄMPÖPUMPUN LÄMMITYSTEHOJEN TUOTTO, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASOSTA MUUTETTU LÄMMITYSVARAAJA 0.6m<sup>3</sup>



LÄMPÖPUMPUN LÄMMITYSTEHOJEN TUOTTO, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 68°C



LÄMPÖPUMPUN LÄMMITYSTEHOJEN TUOTTO, KOKO VUOSI  
LÄHTÖTASO, SÄHKÖKATTILAN ASETUSARVO 68°C JA KÄYTTÖVEDEN LÄMMITYSVARAAJAN ASETUSARVO 68°C

