

Timo Sarin

ILMANVAIHTOKONEEN MITOITUSOHJELMAN KEHITYS

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

2017

ILMANVAIHTOKONEEN MITOITUSOHJELMAN KEHITYS

Sarin, Timo
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
Joulukuu 2017
Ohjaaja: Heinonen, Jarkko
Tekninen ohjaaja: Sandberg, Esa, Tmi Esa Sandberg
Sivumäärä: 128
Liitteitä: 0

Asiasanat: ilmanvaihto, ilmanvaihtolaitteet, mitoitus, laskentamallit

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää tekninen perusta ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelmaa varten Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen teknisten suoritusarvojen avulla. Tarkoituksena oli kehittää ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelmaa varten esivalintatyökalu ja mitoitusyökalu, joista mitoitusyökalu oli tarkoitus kehittää muidenkin työn toimeksiantajan valmistamien ilmanvaihtokoneiden mitoittamiseen.

Työn toimeksiantajana toimivalla Vallox Oy:llä oli syntynyt mitoitusohjelman kehittämisen tarve, koska ilmanvaihtokoneen valinta, teknisten suoritusarvojen ja ilmanvaihdon energiankulutuksen selvittäminen tulisi olla vaivatonta. Mitoitusohjelman kehittämisen tarve oli myös osittain syntynyt siitä, että usealla kilpailevalla ilmanvaihtokonevalmistajalla on vastaavan tapainen mitoitusohjelma ja mitoitusohjelma voidaankin katsoa kilpailukykyä parantavaksi tekijäksi.

Ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman kehitystyötä varten oli käytettävissä Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen teknisten suoritusarvojen mittaustulokset. Mitoitusohjelman tekninen perusta kehitettiin mittaustuloksiin perustuen kirjallisuudesta saatavien laskentakaavojen ja kehitettävien mallinnusten avulla, joista mallinnusten avulla saatiin yleistettyä ilmanvaihtokoneen teknisiä suoritusarvoja. Tekninen perusta kehitettiin kirjallisuudesta saatavaan teoriaan perustuen.

Työn tuloksena kehitettiin teknisen perustan sisältäviä Excel-laskentataulukoita työn toimeksiantajan valmistamien ilmanvaihtokoneiden esivalintaa, sekä teknisten suoritusarvojen ja ilmanvaihdon energiankulutuksen laskentaa varten. Laskentatyökaluihin sisällytettiin kattavasti laskennan teknistä perustaa ja laskentatulosten määritelmät määritettiin. Työssä kehitetyt laskentatyökalut tulevat olemaan muunneltavissa työn toimeksiantajan valmistamille ilmanvaihtokoneille laskentatyökalusta riippuen vaihtelevin muokkaustarpein. Kehitystyön aikana ilmeni tarpeellisten ilmanvaihtokonekohtaisten mittaustulosten tarve, joita ei ollut tämän kehitystyön aikana saatavilla. Tarpeellisten mittausten suorittamisesta tehtiin työn toimeksiantajalle suositus, koska nämä tarpeelliseksi katsotut mittaukset edesauttavat kehitettyjen laskentatyökalujen muunneltavuutta. Lisäksi kehitystyön aikana syntyi mitoitusohjelman jatkokehitysideoita, joista tehtiin työn toimeksiantajalle suositus.

DEVELOPMENT OF VENTILATION UNIT DIMENSIONING SOFTWARE

Sarin, Timo

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Construction and Municipal Engineering

December 2017

Supervisor: Heinonen, Jarkko

Technical supervisor: Sandberg, Esa, individual proprietorship Esa Sandberg

Number of pages: 128

Appendices: 0

Keywords: ventilation, ventilation equipment, dimensioning, calculation models

The purpose of this thesis was to develop a technical background for a ventilation unit dimensioning software by using Vallox 096 MC ventilation unit's technical performance characteristics. The purpose was to develop a preselection tool and a dimensioning tool for the ventilation unit dimensioning software, where the dimensioning tool was purposed to develop editable making the dimensioning tool to be suitable for the work's client every ventilation unit.

Work's client Vallox Ltd. had come about need for the ventilation unit dimensioning software, because selecting a ventilation unit and finding out both a ventilation unit's technical performance characteristics and ventilation energy consumption should be easy. Need for the ventilation unit dimensioning software had also partly come about, because several competing ventilation unit manufacturers has a corresponding dimensioning software and the dimensioning software can be considered as competitiveness strengthen factor.

As source information for the development of the ventilation unit dimensioning software there were the Vallox 096 MC ventilation unit's measurement data from technical performance characteristics. The technical background of the dimensioning software was developed based on the measurement data both by using knowledge and formulas from literature and by developing calculation models, where the calculation models made possible to generalize the ventilation unit's technical performance characteristics. Theory for the development work were found out from literature.

As a result, were developed the technical background including Excel-worksheets for the preselection of a ventilation unit and both calculating technical performance characteristics and ventilation energy consumption. The calculation tools were included with extensive calculation's technical background and the definitions of the calculation results were defined. Within the work developed calculation tools will be transformable to suit work's client every ventilation unit with varying editing needs. During the development work were appeared useful measurement needs, whom weren't available during this development work. Carrying out the useful measurements were suggested to the work's client, because these useful considered measurements will assist transformability of the developed calculation tools. Also during the development were come about further development ideas and those were suggested to the work's client.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
1.1	Kehitystyön tausta.....	5
1.2	Kehitystyön tavoitteet	7
1.2.1	Ilmanvaihtokoneen esivalintatyökalu	9
1.2.2	Ilmanvaihtokoneen mitoitustyökalu	10
1.3	Kehitysmenetelmät	13
2	OLEMASSA OLEVAT MITOITUSOHJELMAT	15
2.1	Swegon ProCASA-energianlaskentaohjelma	15
2.2	Enervent Energy Optimizer-mitotusohjelma	17
2.3	Iloxair-laskentaohjelma.....	19
3	MITOITUSOHJELMAN ESIVALINTATYÖKALUN KEHITYS	23
3.1	Ilmanvaihtokoneen esivalinnan mitoitettava ilmavirta.....	24
3.2	Ilmanvaihtokoneen esivalinta	30
3.3	Ilmanvaihtokoneen valinnan merkitys	35
4	MITOITUSOHJELMAN MITOITUSTYÖKALUN KEHITYS	43
4.1	Puhaltimien sähkötehtäjäntarve ja sähköenergiankulutus	43
4.1.1	Ilmanvaihtokoneen aiheuttama painehäviö	44
4.1.2	Puhaltimien kokonaishyötysuhde	54
4.1.3	Puhaltimien sähkötehtäjäntarve.....	62
4.1.4	Puhaltimien sähköenergiankulutus	66
4.2	Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus.....	67
4.2.1	Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde	68
4.2.2	Ilmanvaihdon vuotuinen lämpöenergiankulutus	80
4.3	Ilmanvaihtokoneesta aiheutuva äänitaso.....	88
4.3.1	Ilmanvaihtokoneeseen aiheutuva äänitaso.....	90
4.3.2	Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuva äänitaso ...	106
5	KEHITYSTYÖN TULOS	119
6	KEHITYSTYÖN ARVIOINTI	121
6.1	Ilmanvaihtokoneen esivalintatyökalu	122
6.2	Puhaltimien sähkötehtäjäntarve ja sähköenergiankulutus	122
6.3	Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus.....	124
6.4	Ilmanvaihtokoneesta aiheutuva äänitaso.....	125
	LÄHTEET	127

1 JOHDANTO

1.1 Kehitystyön tausta

Asuinrakennuksiin tarkoitettujen ilmanvaihtokoneiden valmistajia on Suomessa useita. Kilpailukykyisenä pysyäkseen laitevalmistajien on kyettävä erottumaan kilpailijoistaan. Kilpailu asiakkaista on lähes poikkeuksetta kovaa liiketoiminnasta riippumatta ja pysyäkseen kilpailukykyisenä tinkimättä tuotteiden laadusta, tulee kilpailukykyä ylläpitää jollakin muulla tavalla.

Ilmanvaihtokoneen teknisten suoritusarvojen selvittäminen ei ole aina nopeaa, eikä helppoa. Perinteisesti teknisiä suoritusarvoja on ollut mahdollista selvittää vain valmistajan julkaisemista teknisistä esitteistä, joita on nykyisin saatavilla myös valmistajien Internet-sivustoilla.

Nykyisin on ilmanvaihtokoneen valmistajia, jotka ovat helpottaneet teknisten suoritusarvojen selvittämistä julkaisemalla koneilleen mitoitusohjelman. Tämä helpottaa muun muassa suunnittelijoiden työtä ja kuluttajien suorittamia vertailuja.

Ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelma voi olla Internet-selainpohjainen tai tietokoneelle ladattava ohjelma. Mitoitusohjelman avulla voidaan muun muassa selvittää kohteeseen valmistajalta saatavilla olevan soveltuvan ilmanvaihtokoneen sekä valitun koneen tekniset suoritusarvot ja tiedot.

Valintaa tehdessä ilmanvaihtokoneiden teknisten suoritusarvojen selvittäminen ja suorituskykyä vertailevien laskelmien suorittaminen on yleensä aikaa vievää. Mitoitusohjelman avulla laskelmat voidaan suorittaa ilman, että aikaa kuluu laskelmien suorittamiseen, jolloin voidaan keskittyä koneiden vertailuun. Lisäksi valitun koneen tekniset suoritusarvot saadaan ilman, että tarvitsee etsiä niitä teknisestä esitteestä.

Työn toimeksiantajana toimii Vallox Oy, joka on tunnettu, yli 40 vuotta Suomessa ilmanvaihtolaitteita valmistanut yritys (Vallox Oy:n [www-sivut](http://www.vallox.fi) 2017).

Vallox Oy valmistaa asuinrakennuksiin tarkoitettuja ilmanvaihtokoneita, joilla tarkoitetaan konetta, jonka maksimi-ilmavirta ei ylitä arvoa 250 m³/h tai koneen ilmavirta voi olla 250...1000 m³/h, jos valmistaja on ilmoittanut koneen olevan yksinomaan tarkoitettu asuinrakennusten ilmanvaihtoon (Komission asetus (EU) N:o 1253/2014, 2 artiklan kohta 2).

Työn toimeksiantajalle oli syntynyt tarve kehittää valmistamilleen asuinrakennuksiin tarkoitettuihin ilmanvaihtokoneilleen mitoitusohjelma. Syntynyt kehitystarve johtuu mitoitusohjelman hyödyistä, joita ovat muun muassa työn toimeksiantajan valmistamien koneiden teknisten suoritusarvojen selvittäminen mitoitusohjelman avulla ja se, että usealla samaa liiketoimintaa harjoittavalla yrityksellä on heidän koneillensa olemassa mitoitusohjelma.

Helppokäyttöinen ja vaivattomasti saatavilla oleva mitoitusohjelma helpottaa ja nopeuttaa ilmanvaihtokoneiden teknisten suoritusarvojen selvittämistä. Asiakkaalle voi olla hyvinkin tärkeää, että yrityksen valmistamien koneiden tekniset suoritusarvot ovat helposti selvitettävissä. Asiakas saattaa esimerkiksi ohittaa valmistajan koneiden tarkemman tarkastelun, jos niiden tekniset suoritusarvot eivät ole helposti selvitettävissä. Helppokäyttöisen ja vapaasti Internetissä käytettävissä olevan mitoitusohjelman tarjoaminen todennäköisesti edesauttaa yrityksen kilpailukykyä asuinrakennuksiin tarkoitettujen ilmanvaihtokoneiden liiketoiminta-alueella.

Kiristyvien energiatehokkuusvaatimusten vuoksi huomiota kiinnitetään entistä enemmän energiatehokkuuteen, joka onkin hyvä asia, koska suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tehtävillä ratkaisuilla voidaan huomattavasti vaikuttaa rakennuksen elinkaaren aikaisiin ympäristövaikutuksiin ja kustannuksiin. Rakennusten ja rakentamisen energiankulutus aiheuttaa yli kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä, joten rakennuksiin liittyvillä päätöksillä on merkitystä. (Valtion ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2017.)

Ilmastonmuutoksen aiheuttamien haittojen hillitsemiseksi on toivottavaa, että teknisten laitteiden ominaisuuksista myös energiatehokkuutta verrattaisiin vertailukelpoisin

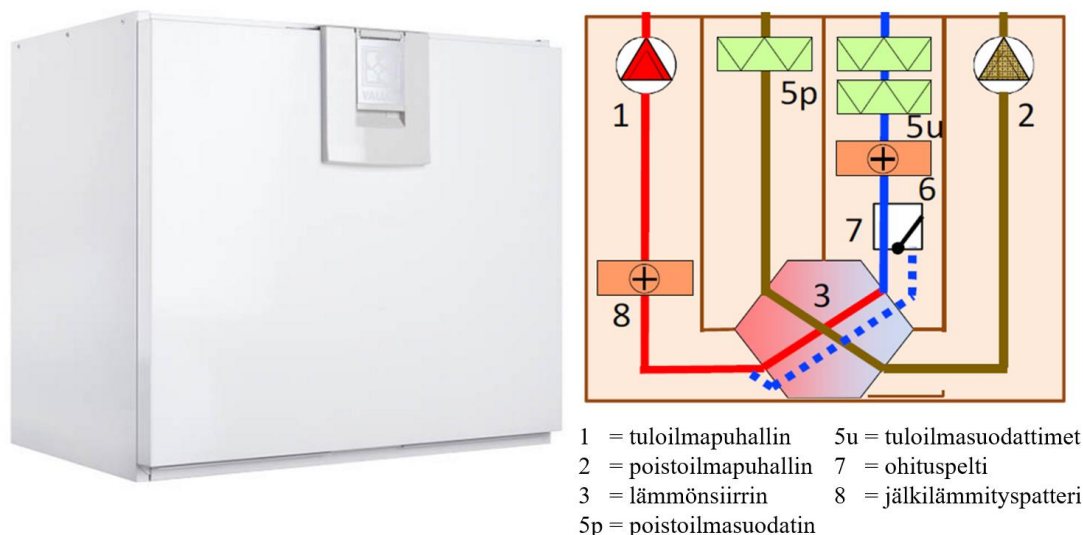
suoritusarvoin, jotta laitevalinnoilla voitaisiin edistää ilmastonmuutoksen hillintää. Ilmanvaihto onkin merkittävä energiankuluttaja asuinrakennuksissa, koska sen osuus energiankulutuksesta voi olla yli 40 % (Sandberg 2014, osa 1, 319).

Laitteita verratessa on tiedettävä, mitä arvoja kannattaa verrata ja tästä syystä samojen arvojen vertaileminen on perusteltua. On myös huomattava, että ilmanvaihtokoneiden energiatehokkuutta mitataan eri maissa eri tavoin ja tämän vuoksi eri maissa ilmoitetut energiatehokkuutta kuvaavat tunnusluvut eivät ole vertailukelpoisia. (Vallox Oy:n www-sivut 2017.)

Kurnitskin mukaan (Kurnitski 2007, 423) uusissa pientaloissa suoritettujen ilmanvaihdon mittaukset osoittivat, että ilmanvaihdossa tingitään, sillä vain 57 %:ssa tutkituista taloissa oli riittävän kokoiset, määräysten mukaiset ilmanvaihtokoneet ja -kanavistot. Näissäkin taloissa vain alle puolessa ilmanvaihtoa käytettiin asianmukaisesti. Ilmanvaihtomelu erityisesti makuuhuoneissa tuntui olevan koneellisen ilmanvaihdon suurin ongelma, joka ohjaa käyttämään ilmanvaihtokonetta pienemmällä nopeudella. Tutkitujen talojen ilmanvaihtojärjestelmien tarkastelu osoitti kaksi peruspuutetta, joista toisena puutteena oli alimittaisen ilmanvaihtokoneen valitseminen, ilmeisesti ymmärtämättä, että asunnon peruskäyttötilanteen mitoitusilmavirta voi olla vain noin puolet ilmanvaihtokoneen maksimi-ilmavirrasta, koska suuremmalla ilmavirralla ei välttämättä pystytä saavuttamaan riittävää äänenvaimennusta.

1.2 Kehitystyön tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on kehittää tekninen perusta ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelmaa varten, jota voidaan hyödyntää työn toimeksiantajan valmistamista ilmanvaihtokoneista minkä tahansa mitoittamiseen. Mitoituksen on tarkoitus tuottaa ilmanvaihtokoneen tekniset suoritusarvot ja ilmanvaihdon energiankulutus. Tekninen perusta kehitetään Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen teknisillä suoritusarvoilla (Kuva 1).



Kuva 1. Ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman teknisen perustan kehitykseen käytettävä Vallox 096 MC -ilmanvaihtokone (Vallox Oy:n www-sivut 2017; Sandberg 2014, osa 1, 157).

Kuvassa 1 oikealla on esitetty Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen rakenne, joka koostuu sekä tulo- että poistupuolesta. Kuvasta 1 poiketen työssä käytettävän koneen tulo- puolella ei ole etulämmityspatteria (6). Tulopuoli koostuu ilman virtaussuunnassa ennen lämmöntalteenoton lämmönsiirrintä (3) olevista tuloilmasuodattimista (5u) ja ohituspellistä (7) sekä lämmönsiirtimen jälkeen olevasta tuloilmapuhaltimesta (1) ja jälkilämmityspatterista (8). Poistupuoli koostuu ilman virtaussuunnassa ennen lämmöntalteenoton lämmönsiirrintä olevasta poistoilmasuodattimesta (5p) ja lämmönsiirtimen jälkeen olevasta poistoilmapuhaltimesta (2).

Työn tavoitteena on laatia laskentataulukoiia, joihin syötetään lähtötiedoiksi yksinkertaiset laskenta-arvot ja ilmanvaihtokoneen teknisten suoritusarvojen mittaustulokset. Laskentataulukoiden on tarkoitus tuottaa tulokset näiden lähtötietojen perusteella.

Teknisen perustan sisältävät Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen laskentamallit on tarkoitus kehittää Excel-laskentataulukoihin. Laskentataulukot on tarkoitus laatia siten, että ne ovat muokkaukelpoisia työn toimeksiantajan valmistamista ilmanvaihtokoneista jokaiselle.

Tässä työssä kehitettävän teknisen perustan perusteella työn toimeksiantajan palkkaaman ohjelmistoyrityksen on tarkoitus ohjelmoida Internet-selainpohjainen kaikille vapaasti käytettäväksi tarkoitettu ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelma.

Ohjelmistoyrityksen on tarkoitus ohjelmoida mitoitusohjelmalle käyttöliittymä, joka tulee koostumaan ilmanvaihtokoneen esivalinta- ja mitoitus työkalusta.

1.2.1 Ilmanvaihtokoneen esivalintatyökalu

Mitoitusohjelman ensimmäisen osion on tarkoitus toimia ilmanvaihtokoneen esivalintatyökaluna, jonka avulla voidaan suorittaa koneen esivalinta syöttämällä yksinkertaiset lähtöarvot esivalintatyökaluun. Vaihtoehtoisesti voidaan ohittaa koneen esivalinta ja valita haluttu kone mitoitusohjelman mitoitusosiossa, koska mitoitusohjelman käyttäjä voi mahdollisesti tietää valmiiksi konevalintansa.

Esivalintatyökalua varten tavoitteena on laatia Excel-laskentataulukko, jonka avulla ehdotetaan ilmanvaihtokonetta. Esivalintaa varten on kehitettävä tekninen perusta koneelta tarvittavalle ilmavirrälle. Lisäksi tavoitteena on kehittää työn toimeksiantajan valmistamista koneista jokaiselle esivalintakriteeri, jonka perusteella esivalintatyökalun on tarkoitus määritellä esivalittava kone lähtötiedoista riippuen.

Esivalintatyökalun on tarkoitus ehdottaa ilmanvaihtokonetta, kun esivalintatyökalun käyttäjä on syöttänyt käyttöliittymään asunnon asuinpinta-alan, huonekorkeuden, saunan olemassaolon ja toiveen koneen aiheuttamasta äänitasosta. Kuvassa 2 on esitetty luonnos ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman esivalintatyökalusta.

VALLOX
HOME of FRESH AIR


Ilmanvaihtokonevalitsin Mitoitustyökalu Etsi tuotteita...

VALITSIN

KOTISI ASUINNELIÖT: 100 m² HUONEKORKEUS: 3.5 m

SAUNA: Ei Kyllä: 8 m²

Sopivat laitteet




VALLOX 096 MC Lataa (PDF)

Suosittelu

Energia luokka	A+
SEC-luokka	A
Lämmönalteenotto hyötysuhde	80 %
Tyyppi	Hiljainen
Hinta ovh	2800€

Katso tarkemmat tuotetiedot >



VALLOX 096 MC Lataa (PDF)

Minimivaatimukset täyttävä

Energia luokka	A+
SEC-luokka	A
Lämmönalteenotto hyötysuhde	80 %
Tyyppi	Basic
Hinta ovh	1900€

Katso tarkemmat tuotetiedot >

Kuva 2. Luonnos esivalintatyökalun käyttöliittymästä.

1.2.2 Ilmanvaihtokoneen mitoitusyökalu

Mitoitusohjelman toisen osion on tarkoitus toimia mitoitusyökaluna, joka mitoittaa antaen tekniset suoritusarvot joko esivalitusta tai käyttäjän valitsemasta ilmanvaihtokoneesta. Mitoitukseen tarvitaan koneelta tarvittavat tulo- ja poistoilmapuolten ilman tilavuusvirrat ja tarvittavat kanavapaineet sekä laskennassa käytettävä Suomen ilmastovyöhyke ja tuloilman sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo.

Halutessaan käyttäjä voi syöttää mitoitusyökaluun ilmanvaihtokoneen käytöstä ”koto-ona” -käyttötilanteen lisäksi keskimääräiset vuorokautiset ”poissa” ja ”tehostus” -käyttötilanteiden käyttöajat ja niiden mitoitus tiedot, jolloin laskennassa on tarkoitus ottaa eri käyttötilanteiden vaikutus huomioon.

Kuvassa 3 on esitetty luonnos ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman mitoitusyökalusta. Mitoitusyökalua varten on tarkoitus kehittää Excel-laskentataulukot ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähkötehotarpeen ja -energiankulutuksen, ilmanvaihdon lämpöenergian sekä ilmanvaihtokoneesta aiheutuvan äänitason laskentaa varten.

Puhaltimien sähkötehotarpeen ja -energiankulutuksen laskentataulukko on tarkoitus laatia siten, että saadaan laskettua tulo- ja poistoilmapuhaltimen sähköverkosta ottama sähköteho ja niiden avulla laskettu vuotuinen sähköenergiankulutus. Sähköenergiankulutuksen laskenta on tarkoitus toteuttaa siten, että se ottaa ilmanvaihtokoneen eri käyttötilanteiden ja niiden vuorokautisten käyttöaikojen vaikutuksen huomioon. Laskentataulukon on tarkoitus laskea myös ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho.

Ilmanvaihdon lämpöenergian laskentataulukko on tarkoitus laatia siten, että laskentataulukon avulla saadaan laskettua vuotuinen ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus ja lämpöenergiankulutukseen vaikuttavat ilmanvaihtokoneen tekniset suoritusarvot. Vuotuisen lämpöenergiankulutuksen osalta laskentataulukko on tarkoitus toteuttaa siten, että laskennassa otetaan koneen eri käyttötilanteiden ja niiden vuorokautisten käyttöaikojen vaikutus huomioon.

Ilmanvaihtokoneen toiminnasta aiheutuvan äänitason laskentataulukko on tarkoitus laatia siten, että laskentataulukon avulla saadaan laskettua koneesta liitäntäkanaviin ja ympäristöön aiheutuva äänen tehotaso. Lisäksi laskentataulukon on tarkoitus laskea koneen toiminnasta sen asennusympäristöön aiheutuva äänen painetaso, joka ilmoitetaan tietyssä asennusympäristössä.

Etsi tuotteita...

Ilmanvaihdonkonevalitsin

Mitoitustyökalu

ANNA MITOITUSARVOT

KOTONA POISSA TEHOSTUS

Tuloilma		Poistoilma		Tuloilma		Poistoilma		Tuloilma		Poistoilma	
Ilmavirta	l/s	Ilmavirta	l/s	Ilmavirta	l/s	Ilmavirta	l/s	Ilmavirta	l/s	Ilmavirta	l/s
Kanavapaine	Pa	Kanavapaine	Pa	Kanavapaine	Pa	Kanavapaine	Pa	Kanavapaine	Pa	Kanavapaine	Pa
Käyttöaika	tuntia/vrk	Käyttöaika	tuntia/vrk								

Paikkakunta ▼ Tulon ilman lämpötilä min °C

Stailman laskennallinen lämpötila 21°C

Ilmanvaihdon tarpeen mitoitus

Seuraava laite >>



VALLOX 096 MC

SEC luokka

A+

SEC kylmä / keskiarvo / lämmin ilmasto

-66.6 -30.9 -7.9 / kWh/a.m2

Maksimi ilmavirta

286 m3/h

Poimi vertailuun +

Katso tarkemmat tuotiedot >

Puhaltimien energiankulutus

Tuloilma	35 W
Poistoilma	29 W
SPI	0.36 W / (m3/h)
SFP	1.28 kW / (m3/s)
Vuotuinen sähkökulutus	561 kWh

Lämmitysenergian nettokulutus

Etuvastus	35 W
Jälkilämmitys 17 °C	67 kWh 75W huippukuorma
Tulon lämpeneminen tilassa 21 °C	1263 kWh
Korvausilman lämpeneminen tilassa 21 °C	239 kWh
Kulutettu kokonaisenergia ilman lämmittämiseen 21°C	1967 kWh
Ilmanvaihdon lämmitystarve ilman LTO:ta	7824 kWh

Energiankulutuksen vuosihyötysuhde	75 %
Korvausilman lämpeneminen 17 °C	239 kWh
Energia joka on kulutettu ilman lämmittämiseen 17 °C	465 kWh
LV -koneen energiankulutuksen vuosihyötysuhde (17 °C)	94 %
Lämmönvaihtimen lämpötilahyötysuhde	81 %
Ilmanvaihdon lämpötilahyötysuhde	81 %

Äänitiedot

Taajuuskaista (Hz)	63, Lz	125, LW	250, LW	500, LW	1k, LW	2k, LW	4k, LW	8k, LW	Lwa
Tuloilmakanavaan	71	67	63	56	53	49	46	37	60
Poistoilmakanavaan	71	67	63	56	53	49	46	37	60
Keittiöohituskanavaan	71	67	63	56	53	49	46	37	60
Ympäristöön	71	67	63	56	53	49	46	37	60
Ympäristöön -4dB absorptiolla								Lpa, dB(A)	36

Koneen asennus keittiökaappien väliin vähentää ääntä 2 dB | Äänet (dB)

Poimi vertailuun +

Lataa (PDF)

Kuva 3. Luonnos mitoitustyökalun käyttöliittymästä.

Mitoitustyökalun kehityksen tavoitteena on se, että vuotuisessa ilmanvaihdon sähkö- ja lämpöenergiankulutuksessa voidaan ottaa ilmanvaihtokoneen eri käyttötilanteiden vaikutus huomioon, jos mitoitusyökalun käyttäjä syöttää myös poissa- ja tehostustilanteiden mitoitus tiedot ja niiden keskimääräiset vuorokautiset käyttöajat. Eri käyttötilanteiden arvojen syöttäminen mahdollistaa ilmanvaihdon energiankulutuksen tarkemman laskennan.

Mitoitusosion teknisestä perustasta on tarkoitus kehittää sellainen, että sen avulla saadaan laskentatuloksia, joita voidaan verrata muiden valmistajien mitoitusohjelmista saataviin laskentatuloksiin. Tämä on tärkeää, jotta tämän kehitystyön tuloksen perusteella laskentaa suorittavan mitoitusohjelman käyttäjä voi vertailla mitoitusohjelman tuloksia muista mitoitusohjelmista saataviin tuloksiin ja mahdollisesti tehdä vertailuun perustuvia päätöksiä.

Kehitystyössä laadittavien laskentataulukoiden laskentatarkkuuden tavoitteena on se, että mitoitusohjelman tuottamat ilmanvaihtokoneen laskentatulokset ovat mahdollisimman yhtäpitävät verrattuna siihen, että katsottaisiin koneen teknisistä esitteistä saatavilla olevat tekniset suoritusarvot laskentaa varten ja suoritettaisiin laskutoimitukset näiden avulla.

1.3 Kehitysmenetelmät

Ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman kehitys perustuu laboratoriomittausten lukuarvoihin, jotka olivat tässä työssä saatavilla Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen osalta. Laskentamallit kehitetään Excel-laskentataulukoihin, joita työn toimeksiantajan on tarvittaessa tarkoitus muokata ilmanvaihtokonekohtaisesti.

Työssä käytettävät laboratoriomittaustulokset ovat VTT Oy:n mittaamia. Mittaustulokset olivat esitetty virtaus- ja lämpöteknisten sekä ääniteknisten suoritusarvojen osalta eriteltyinä raporteina (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen virtaus-, lämpö- ja ääniteknisten suoritusarvojen mittausraportit 2013).

Mittaustuloksia hyödynnetään kehitystyössä kahdella tavalla, joista toinen perustuu niiden hyödyntämiseen julkaistujen laskentaoppaiden ja tunnettujen kaavojen lähtöarvoina ja näiden avulla kehitetään laskentamalli halutulle lopputulokselle.

Laskennan suorittamiseksi on myös kehitettävä mittaustuloksiin perustuvia yleistäviä laskentamalleja, jotka kuvaavat mitoitusohjelmaan syötetyt laskentaparametrit mitauksissa mitatuksi arvoksi tai niiden laskentaa varten tarvittavaksi arvoksi.

Yleistävä laskentamalli voidaan luoda, kun kehitetään mitatulle suurelle portaaton trendi. Portaaton trendi mahdollistaa sen, että laskentamalli kuvaa myös kaikki mahdolliset pisteet äärettömän pienellä porrastuksella mittaustulosten väliltäkin.

Tunnettuja kaavoja käytäville laskentamalleille kehitetään laskentarunko, jonka avulla laskentamalli suorittaa laskennan. Yleistäville laskentamalleille kehitetään laskentamallin runko ja tarvittavat mittaustuloksiin perustuvat kuvaajat, joista laskentaa suorittava laskentamalli saadaan.

Lisäksi kuhunkin laskentamalliin on kehitettävä ehtoja, jotka perustuvat tekniseen perustaan ja ilmanvaihtokoneen toimintaan. Ehdot mahdollistavat laskentamallien toimivuuden, kun laskennan aikaiset laskentaparametrit tai laskennan lähtötiedot muuttuvat. Ehdot on tarkoitus kehittää kuhunkin tilanteeseen soveltuvaksi Excel-laskentataulukon ominaisuuksia hyödyntäen.

2 OLEMASSA OLEVAT MITOITUSOHJELMAT

Asuinrakennusten ilmanvaihtokäyttöön tarkoitettujen ilmanvaihtokoneiden valmistajien tarjoamia mitoitusohjelmia on Internetissä vapaasti saatavilla usealla eri valmistajalla. Valmistajasta riippuen mitoitusohjelma voi olla joko Internet-selainpohjainen tai Internetistä tietokoneelle ladattava ohjelma. Mitoitusohjelman toteutukselle ei ole yhtä ja ainoaa oikeaa toteutustapaa ja niiden antamien tuloksien esitystapa ja laajuus vaihtelevat.

Ilmanvaihtokoneiden ominaisuuksia vertailtaessa on tärkeää, että verrataan samoja arvoja. Tämän vuoksi olemassa olevien mitoitusohjelmien tarkastelu on tärkeää, jotta voidaan kehittää työn toimeksiantajan valmistamat ilmanvaihtokoneet mitoittavan mitoitusohjelman tekninen perusta, jonka tuottamat laskentatulokset kuvaavat samalla tavalla koneen suorituskykyä ja ovat näin vertailukelpoisia olemassa olevien mitoitusohjelmien tuottamien laskentatuloksien kanssa.

2.1 Swegon ProCASA-energialaskentaohjelma

Työn yhtenä verrokkimitoitusohjelmana oli Swegon ILTO Oy:n julkaisema ProCASA-energialaskentaohjelma Swegon CASA asuntoilmanvaihtokoneille. Ohjelma on Internet-selainpohjainen vapaasti käytettävissä oleva ammattilaisten käyttöön suunniteltu energialaskuri. Laskentaohjelmaa varten kohteesta lähtötietoina tarvitaan asunnon ilmavirrat ja kanaviston painehäviöt. (Ilmanvaihtokäsikirja 2017, 20.)

Laskenta voidaan suorittaa Suomen eteläisen säävyöhykkeen ilmasto-olosuhteiden arvoilla sekä usean eri maan ja maanosan ilmasto-olosuhteiden arvoilla.

Yrityksen Internet-sivustoilla on linkki, joka avaa ProCASA-energialaskentaohjelman käyttöliittymän aktiivisena olevaan Internet-selaimen välilehteen. Ensimmäiseksi on valittava ilmanvaihtokone, josta tekniset suoritusarvot selvitetään ohjelman avulla. Tämän jälkeen on syötettävä valitun koneen laskentaa varten tarvittavat lähtötiedot.

Huomattavana on valita alue, jonka energialaskentaan vaikuttavilla tiedoilla ohjelma suorittaa laskennan. Tämä tulee huomioida, jotta ohjelma suorittaa energialaskennan halutuissa ilmasto-olosuhteissa.

Valitun ilmanvaihtokoneen laskentaa varten tarvitsee käyttöliittymässä valita laskentaan vaikuttava alue, koneelta tarvittava ilman tilavuusvirta sekä kanavapaine tulo- ja poistoilmapuolella, mahdollinen koneen poistoilman lämmöntalteenoton ohittava keittiökuvun ilman tilavuusvirta ja sen keskimääräinen käyttöaika vuorokaudessa sekä tuloilman sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo (Kuva 4).

Valitse alue: FIN - Helsinki

Valitse konemalli: W3 Smart

Kytönteho: 740W / 1240W

Projekti: []

Asiakas: []

Suunnittelija: []

Osoite: []

Ilmanvaihtojärjestelmän lähtötiedot: I/s

Tuloilma: 50 l/s

Poistoilma: 50 l/s

Kanavapaine: 80 Pa

Keittiökuvun ilmavirta: 0 l/s

Käyttöaika vuorokaudessa: 0 h/d

Sisäilman lämpötila laskennassa 21°C

Tuloilman minimilämpötila (+10 C..+21 C): 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21

Ekosuunnitteluvaihtoehdot:

SEC luokka	B
SEC kyymä / keskiarvo / lämmin ilmasto	-66.6 -30.9 -7.9 / kWh/a.m2
Maksimi ilmavirta:	286 m3/h
Äänitaso:	41 dB(A)

Valitse ja tulosta sivuja: Tee laskenta muulle kuin asuinrakennukselle (NRVU), Lisää Suomen määräykset, Energialaskelmat ja mitat

Puhaltimien energiankulutus EN13141-7

Tuloilma	35 W
Poistoilma	29 W
SPI	0.36 W / (m ³ /h)
SFP	1.28 kW / (m ³ /s)
Puhaltimien vuotuinen sähkönkulutus	561 kWh

Lämmitysenergian nettokulutus mitattu EN 13141-7 mukaan

Etuvastus	398 kWh	
Jäikilämmitys 17 °C	68 kWh	75W huippukuorma
Tuloilman lämpeneminen tilassa 21 °C	1262 kWh	
Korvausilman lämpeneminen 21 °C	239 kWh	
Kulutettu kokonaisenergia ilman lämmittämiseen 17 °C	1967 kWh	
Ilmanvaihdon lämmitystarve ilman LTO:ta	7824 kWh	
Energiankulutuksen vuosihyötysuhde	75 %	

Korvausilman lämpeneminen 17 °C: 211 kWh

Energia joka on kulutettu ilman lämmittämiseen 17 °C: 466 kWh

IV -koneen energiankulutuksen vuosihyötysuhde (17 °C): 94 %

Lämmönvaihtimen lämpötilahyötysuhde: 81 %

Ilmanvaihtokoneen lämpötilahyötysuhde: 81 %

Äänitiedot

Taajuuskaista (Hz)	65, Lw	125, Lw	250, Lw	500, Lw	1k, Lw	2k, Lw	4k, Lw	8k, Lw	L _{pa}
Äänet:	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB(A)
tuloilmakanavaan	71	67	63	56	53	49	46	37	60
poistoilmakanavaan	54	62	55	41	32	30	22	9	50
keittiöohituskanavaan	57	60	57	47	43	40	35	23	52
ympäristöön	58	50	45	33	27	26	18	11	40

ympäristöön -4dB absorptiolla: L_{pa} dB(A) 36

Koneen asennus keittiökaappien väliin vähentää ääntä 2 dB

Kuva 4. ProCASA-energialaskentaohjelman käyttöliittymä (Swegon ILTO Oy:n www-sivut 2017).

Laskentaohjelman Internet-selainpohjainen käyttöliittymä päivittyy automaattisesti, kun laskentaan vaikuttavat lähtötiedot on syötetty tai niitä on muutettu. Laskennan tulokset nähdään suoraan käyttöliittymässä ja tulostettavissa olevasta dokumentaatiosta niiden lähtöarvojen mukaan laskettuna, jotka ovat syötettynä käyttöliittymään.

Laskentaohjelma antaa laskennan tulokseksi muun muassa puhaltimien sähköverkosta ottaman tehon, ilmanvaihtokoneen ominaissähkötehon, ilmanvaihdon lämpöenergiakulutustiedot sekä koneen toiminnasta liitäntäkanaviin ja ympäristöön aiheutuvan äänitason.

Laskentaohjelman avulla voidaan dokumentoida laskennan tulokset. Dokumentaatio voidaan yksilöidä syöttämällä projektin tiedot laskentaohjelmaan. Tulosteeseen tulostuu laskennan tulokset ja ilmanvaihtokoneen tekniset tiedot.

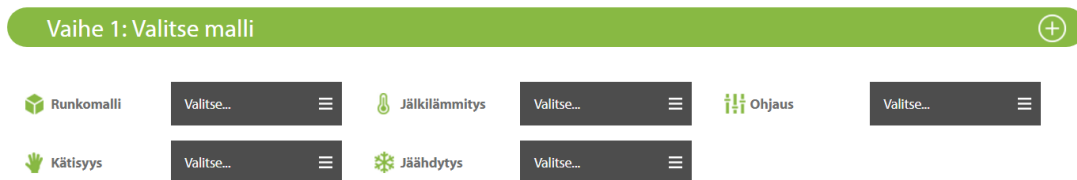
2.2 Enervent Energy Optimizer-mitointiohjelma

Yhtenä verrokkimitointiohjelmana oli Enervent Oy:n julkaisema Energy Optimizer-mitointiohjelma, jonka avulla voidaan mitoittaa mikä tahansa Enerventin valmistama ilmanvaihtokone. Mitointiohjelma on vapaasti kaikkien käytettävissä oleva ja Internet-selainpohjainen. Mitointiohjelman avulla laskenta voidaan suorittaa Suomen kolmen eri säävyöhykkeen ilmasto-olosuhteiden lisäksi usean eri maan ja maanosan ilmasto-olosuhteiden arvoilla.

Mitointiohjelmasta tulosteena saatavilla olevassa dokumentaatiossa sanotaan mitointiohjelman käyttötarkoituksesta se, että Energy Optimizer on yleinen perustasoinen työkalu, joka on saatavilla informaatiotarkoituksessa Enerventin asiakkaille. Energy Optimizer on tarkoitettu Enerventin valmistamien ilmastointikoneiden ominaisuuksien ammattimaiseen mallintamiseen ympäristössä, jonka käyttäjä määrittelee. (Enervent Oy:n www-sivut 2017.)

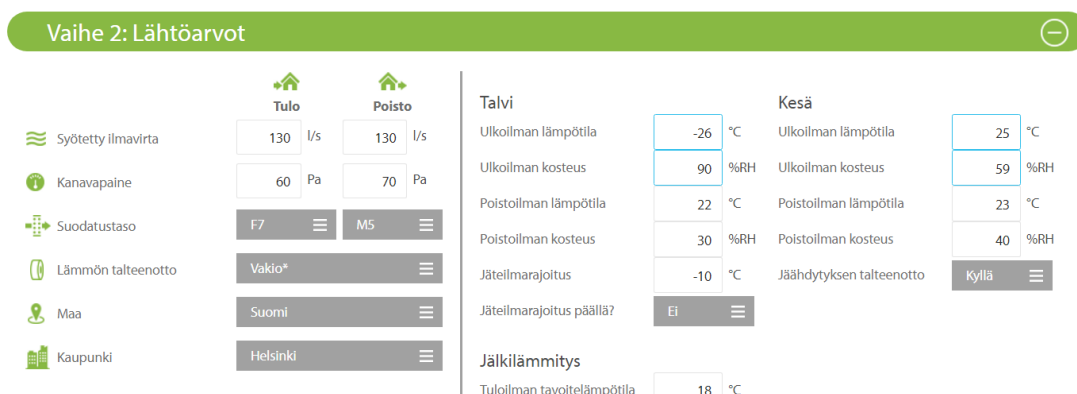
Yrityksen Internet-sivustoilla on ”ILMANVAIHTOKONEET” -alaseto-ohjelma, jonka kautta löytyy linkki Energy Optimizer-mitointiohjelmaan. Mitointiohjelman toiminta on jaettu kolmeen vaiheeseen, joiden tuloksena saadaan selville valitusta ilmanvaihtokoneesta tekniset suoritusarvot ja tiedot.

Ensimmäisessä vaiheessa valitaan mitoitettavan ilmanvaihtokoneen malli (Kuva 5). Valittavana on konemalli ja mahdollisesti sen kätisyys, tuloilman lämmitys- ja jäähdytystapa sekä ilmanvaihtokoneen ohjaustapa.



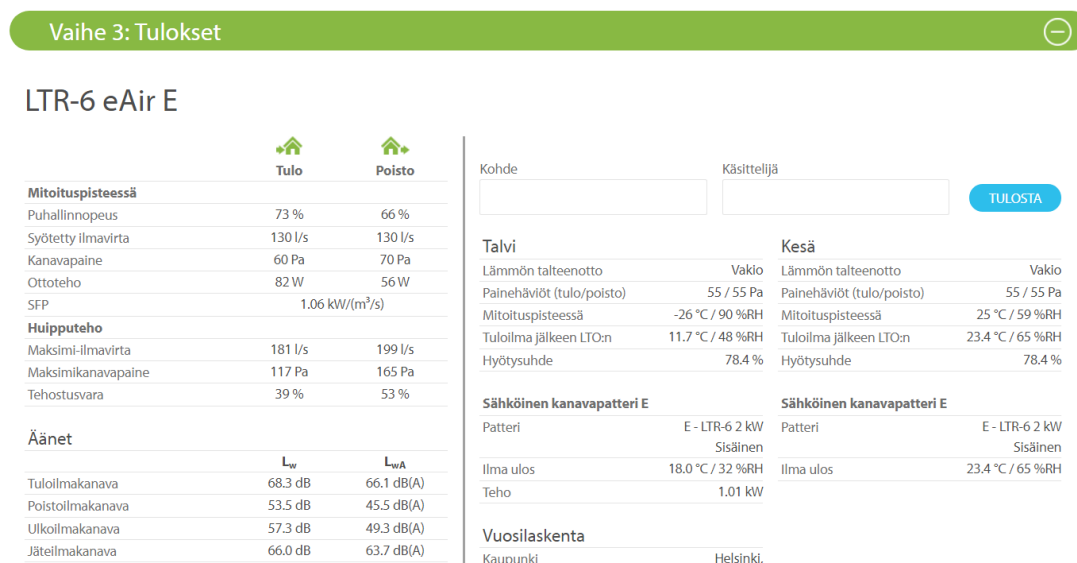
Kuva 5. Ilmanvaihtokoneen valinta Energy Optimizer-mitoitusohjelmassa (Enervent Oy:n www-sivut 2017).

Mitoitusohjelma suorittaa valitulle ilmanvaihtokoneelle laskennan toisessa vaiheessa syötettävien lähtötietojen perusteella (Kuva 6).



Kuva 6. Lähtöarvojen syöttäminen Energy Optimizer-mitoitusohjelmaan (Enervent Oy:n www-sivut 2017).

Kolmannessa vaiheessa mitoitusohjelmasta nähdään laskennan tulokset. Tuloksina saadaan muun muassa puhaltimien suoritusarvot, energiateknisiä suoritusarvoja sekä ilmanvaihtokoneen äänitekniset suoritusarvot (Kuva 7).



Kuva 7. Energy Optimizer-mitoitusohjelman antamat tulokset (Enervent Oy:n www-sivut 2017).

Laskentatulokset päivittyvät automaattisesti, kun laskentaan vaikuttavat lähtötiedot on syötetty tai niitä on muutettu. Laskennan tulokset nähdään suoraan kolmannen vaiheen tuloksissa ja tulostettavissa olevasta dokumentaatiosta niiden lähtöarvojen mukaan laskettuna, jotka ovat syötettynä mitoitusohjelmaan.

Mitoitusohjelman avulla voidaan dokumentoida laskennan tulokset. Dokumentaatio voidaan myös yksilöidä syöttämällä projektin tiedot mitoitusohjelmaan. Tulosteeseen tulostuu laskennan tulokset ja ilmanvaihtokoneen tekniset tiedot.

Huomattavana on ilmanvaihtokoneesta saatavien äänitietojen osalta se, että mitoitusohjelman kolmas vaihe antaa äänitasojen osalta äänen kokonaisäänitehotasot Internet-selaimen mitoitusohjelmassa, mutta mitoitusohjelmasta tulostettavasta dokumentaatiosta saadaan äänen tehotasot taajuuskaistakohtaisesti (Kuva 8).

Äänet (Lw)

	Taajuudet [Hz]								dB	dB(A)
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
Tuloilmakanava	59	60	59	61	62	61	53	45	68.3	66.1
Poistoilmakanava	50	46	46	44	39	37	29	19	53.5	45.5
Ulkoilmakanava	54	49	50	49	42	40	32	20	57.3	49.3
Jäteilmakanava	56	57	57	59	60	58	50	41	66.0	63.7

Kuva 8. Energy Optimizer-mitoitusohjelman tulostettavissa olevasta dokumentaatiosta saatavilla olevat äänitiedot (Enervent Oy:n www-sivut 2017).

2.3 Iloxair-laskentaohjelma

FläktGroupiin kuuluva Iloxair Oy tarjoaa vapaasti käytettäväksi tarkoitettun laskentaohjelman, jonka avulla voi selvittää Iloxairin valmistamilla ilmanvaihtokoneilla saavutettavan ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen ja SFP-luvun (Iloxair Oy:n www-sivut 2017). Laskentaohjelman avulla saadaan selvitettyä myös Iloxairin valmistamien koneiden äänitekniset tiedot ja tekniset tiedot.

Laskentaohjelma on yrityksen Internet-sivustoilta tietokoneelle ladattavissa oleva Excel-laskentataulukko, jonka avulla suoritettava laskenta perustuu ilmoitettuihin asiakirjoihin laskentaohjelman lataussivustolla. Laskentaohjelman energialaskenta voidaan suorittaa Suomen kolmen eri säävyöhykkeen ilmasto-olosuhteissa. Laskentaohjelmassa on neljä osaa, joista nähdään ja joihin syötetään tietoja.

Laskentaohjelman käyttäminen aloitetaan syöttämällä ”TIEDOT JA MITOITUSARVOT” -sarakkeeseen laskettavaksi valittava ilmanvaihtokone, laskennan suorittamiseen käytettävä sijainti, poisto- ja tuloilman lämpötila, koneelta tarvittava ilmavirta ja kanavapaine sekä tulo- että poistoilmapuolella (Kuva 9). Tähän sarakkeeseen syötetään myös kohteen yksilöivät tiedot dokumentointia varten.

TIEDOT JA MITOITUSARVOT

Anna kohdetiedot:		Tuloilmavirta	44 dm ³ /s
Nimi		Tulopuolen paine(max300Pa)	90 Pa
Kohde		Ilmavirtasuhte (tulo/poisto)	0,96
Puhelin		Valitse ilmanvaihtokone ja lisävaruste:	ILOX 89 Optima
Tekijä		Aseta sijainti:	I (II) Helsinki-Vantaa TRY2012
Anna mitoitusarvot:		Lämpötilat- lämmityskausi:	
Huoneiston pinta-ala	97 m ²	Tuloilman lämpötila	18 °C
Huoneiston keskikorkeus	2,67 m	Poistoilman lämpötila	22 °C
Huoneiston ilmatilavuus	259 m ³		
Poistoilmavirta	46 dm ³ /s		
Poistopuolen paine(max300Pa)	100 Pa		

Kuva 9. Iloxair-laskentaohjelman ”TIEDOT JA MITOITUSARVOT” -sarake (Iloxair-laskentaohjelma 2014).

Laskentaohjelman ”OHJELMA-INFO” -sarakkeesta nähdään ilmanvaihtokoneen palvelemaan tilan ilmatilavuuden perusteella laskettu Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 määräysten ja ohjeiden ohjeistama minimivaatimus mitoitusilmavirran osalta sekä ehdotus poissaolo- ja tehostustilanteiden ilmavirralle (Kuva 10).

OHJELMA-INFO

RakMk D2- mukaiset 0,5 krt
ilmavirrat asuinhuoneistossa

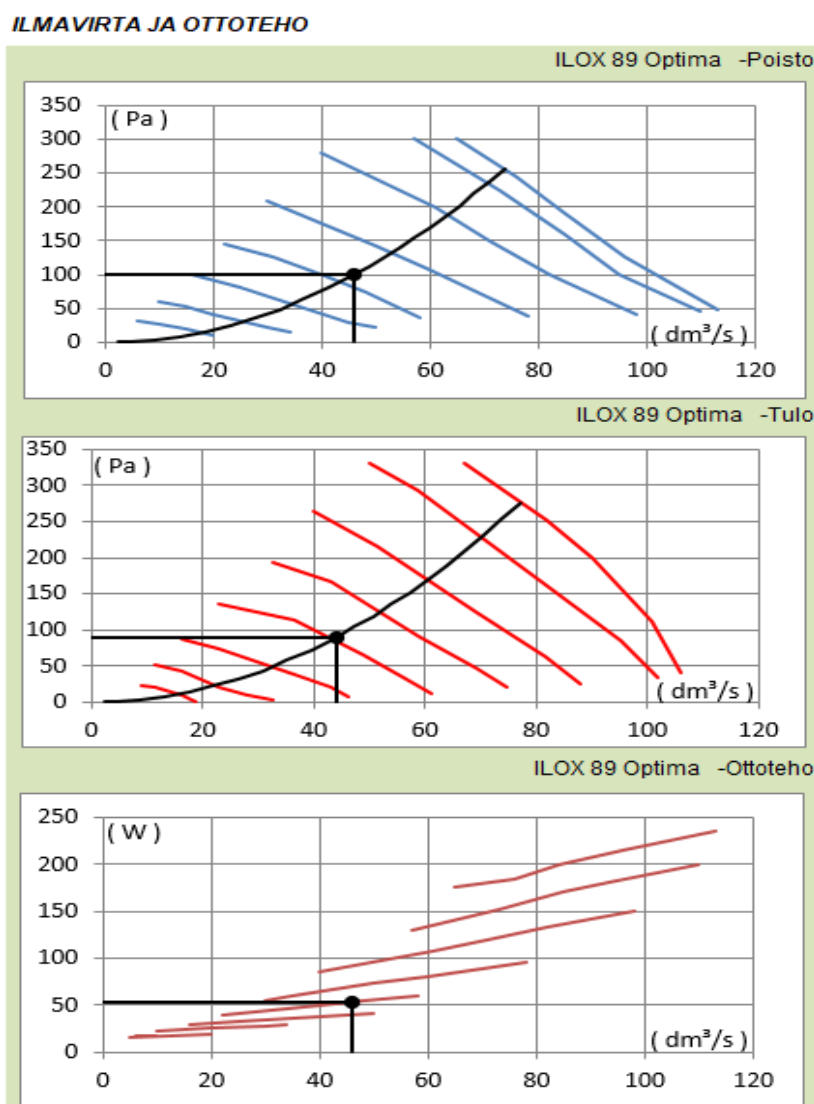
	Poistoilma	Tuloilma
Poissaolo	18 l/s	17 l/s
Perus	36 l/s	34 l/s
Tehostus	47 l/s	45 l/s

iloxair
A Fläkt Woods Company

HUOM! Laskelmassa ei huomoida huonekohtaisia ilmavirtoja

Kuva 10. Iloxair-laskentaohjelman ”OHJELMA-INFO” -sarake (Iloxair-laskentaohjelma 2014).

Syötettyjen lähtötietojen perusteella ”ILMAVIRTA JA OTTOTEHO” -sarakeesta nähdään laskettavana olevan ilmanvaihtokoneen poisto- ja tuloilmapuhaltimen toimintapiste tuottokäyrästöllä ja niiden sähköverkosta ottama sähköteho (Kuva 11). Kuvan 11 tuottokäyrästä pystyakseli kuvaa kanaviston painehäviöihin käytettävissä olevaa painetta (Pa) ja vaaka-akseli puhaltimen tuottamaa ilmavirtaa (dm^3/s).



Kuva 11. Iloxair-laskentaohjelman ”ILMAVIRTA JA OTTOTEHO” -sarake (Iloxair-laskentaohjelma 2014).

Laskentaohjelman avulla saadaan laskentaan valitusta ilmanvaihtokoneesta tulokseksi ”LASKELMA” -sarakkeen mukainen tulos. Tämä sarake voidaan tulostaa laskentaohjelman toiminnoilla A4-kokoiselle arkille. Tästä sarakeesta nähdään syötetyt projekti-tiedot, koneen tekniset tiedot sekä koneen energia- ja äänitekniset tiedot (Kuva 12).

ILOXAIR - ILMANVAIHDON VUOSIHYÖTYSUHDE JA SFP-LUVUN LASKELMA 1.72

Tulostettu 20.8.2017

Nimi: 0
Kohde: 0
Puhelin: 0
Tekijä: 0

Tuotetiedot:

ILOX 89 Optima
Kanavalähdöt ø 4 x 160 mm
Leveys 598 mm
Korkeus 512 mm
Syvyys 570 mm
Paino 59 kg
Puhaltimen nimellisteho 119 W
Lämmönsiirrin Vastavirta
Jälkilämmitys 1000 W
Sijoitus: Asennus lämpimään tilaan
Sähkötiedot: 230V 50Hz, max 1240W; 5,4 A

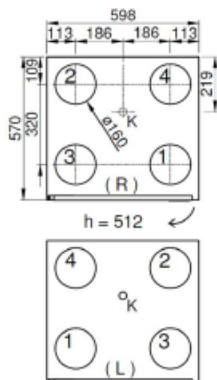
Ilox-koodi (R-malli) 50 533 700
LVI-koodi (R-malli) 79 24 034

Ilox-koodi (L-malli) 50 533 800
LVI-koodi (L-malli) 79 240 35

Suodatusluokka: Tulo F7+G3, Poisto G3
Huurtumissuoja: Termo-Ice
Kesäohitus: Automaattinen

1 = Ulkoilma
2 = Tuloilma
3 = Poistoilma
4 = Jäteilma

K = Kondenssi-
yhde koneen
alaplinalla

**Energia:**

Sijainti: I (II) Helsinki-Vantaa TRY2012
Ulkoilman mitoituslämpötila -26 °C
Poistoilman lämpötila 22 °C
Tuloilman lämpötila 18 °C
Jäätymiseneston toimintalämpötila -2,8 °C
Lämmitysraja 12 °C

Ilmanvaihtokoneen vuosihyötysuhde 74,6 %

Ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve (ilman LTO:ta) 6986 kWh/a
Poistoilmasta talteenotettu energia 5214 kWh/a
Ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve LTO huomioiden 1771 kWh/a
Jälkilämmitystarve 284 kWh/a
Lämpökertoimen 1 kWh sähköä tuottaa 11,3 kWh lämpöä

Mitoituspisteessä -26 °C , tuloilmahyötysuhde 79 %
Mitoituspisteessä -26 °C , jälkilämmityksen tehontarve 322 W

Puhallintiedot:

	Poisto	Tulo
Ilmavirta	46 dm ³ /s	44 dm ³ /s
Kanavapaine	100 Pa	90 Pa
Ohjaujännite	6,3 V	6 V
Ilmavirtasuhde (tulo/poisto)		0,96
Ottoteho (ei sis.sähkövastusta)		53 W
SFP		1,16 kW/ (m ³ /s)

Maksimi-arvot mitoituspisteestä laskettuna

	Poisto	Tulo
Ilmavirta	73 dm ³ /s	77 dm ³ /s
Kanavapaine	256 Pa	275 Pa
Tehostusvara	60 %	>65 %

Ääni:

	Poisto	Tulo
L _{W83}	64	75
L _{W125}	64	70
L _{W250}	53	64
L _{W500}	49	58
L _{W1000}	38	55
L _{W2000}	32	49
L _{W4000}	23	42
L _{W8000}	####	35
LWA dB(A) kanavassa	52	61

Äänenpainetaso vaipan läpi huoneeseen, jossa 10m² äänenabsorptio, LpA dB(A) 37

iloxair
A Flakt Woods Company

Laskennassa on sovellettu seuraavia asiakirjoja ja standardeja: EN 308:1997, RakMk D2, Takauksikenttä 2012, SFP-kortti I VI D-10349, Ympäristöministeriön muistio

www.iloxair.fi

Kuva 12. Iloxair-laskentaohjelman ”LASKELMA” -sarake (Iloxair-laskentaohjelma 2014).

3 MITOITUSOHJELMAN ESIVALINTATYÖKALUN KEHITYS

Esivalintatyökalun tarkoitus on mahdollistaa ilmanvaihtokoneen esivalinta mitoitus-työkalua varten. Esivalintatyökalua varten oli kehitettävä tekninen perusta tarvittavalle asunnon peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirrälle, joka täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 2012 määräysten ja ohjeiden (myöhemmin D2) ohjeistaman ulkoilmavirtavaatimuksen. Lisäksi esivalintatyökaluun kehitettiin työn toimeksiantajan valmistamille koneille sallitut peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirrat, joiden perusteella esivalintatyökalun on tarkoitus ehdottaa konetta.

Esivalintatyökalun käyttäjän on syötettävä asunnon asuinpinta-ala ja huonekorkeus, joiden perusteella esivalintatyökalu laskee D2-ohjeistukset täyttävän peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirran. Lisäksi esivalintatyökaluun määritellään, että onko asunnossa sauna ja toivotaanko ilmanvaihtokoneen olevan matalaäänitasoinen.

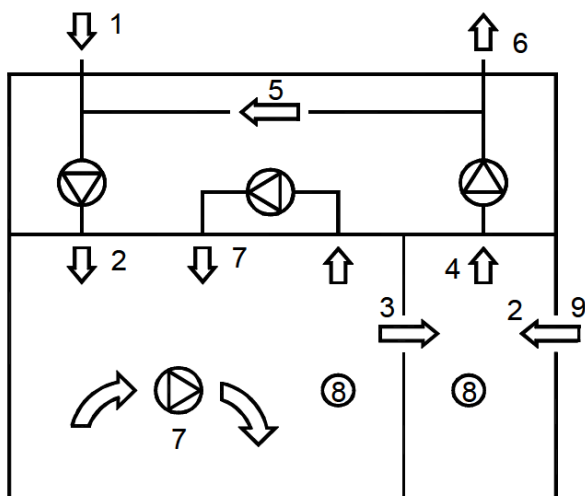
Käyttäjän syöttämien lähtötietojen perusteella esivalintatyökalun on tarkoitus ehdottaa ilmanvaihtokonetta, jonka laskettu peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirta on matalaäänitasoisena maksimissaan noin puolet koneen maksimi-ilmavirrasta. D2-ohjeiden mukaista toivottaessa esivalintatyökalu ehdottaa konetta, joka täyttää D2-ohjeistukset suorituskyvyn suhteen jättäen varmuusvaran. Esivalinta on tarkoitus suorittaa yllä mainituin perustein, koska näin voidaan saavuttaa esivalitulla koneella hyvä energiatehokkuus. Koneen mitoittamista riittävän suureksi puoltaa myös se, että alimitoitetulla koneella ei välttämättä pystytä saavuttamaan riittävää äänenvaimennusta (Kurnitski 2007, 423).

Esivalintatyökalun kehityksessä Excel-laskentataulukon kaavoihin oli laadittava ehtolausekkeita. Ehtolauseke tarvitaan, kun laskenta-arvon laskentaan liittyy vähintään yksi ehto. Esitettävien kaavojen selkeyden vuoksi ehtolausekkeita ei ole sisällytetty kaavojen yhteyteen.

3.1 Ilmanvaihtokoneen esivalinnan mitoittava ilmavirta

Työn toimeksiantaja Vallox Oy valmistaa ilmanvaihtokoneita, jotka ovat tarkoitettu asuinrakennusten ilmanvaihtokäyttöön. Tästä syystä oli perusteltua kehittää esivalintatyökalun tekninen perusta asuinrakennusten ilmanvaihtoa koskeviin vaatimuksiin perustuen.

D2 ohjeistaa ilmavirtavaatimuksen ulkoilmavirralle. Ulkoilma on ilmaa, joka otetaan ilmanvaihtoa varten ulkoa (Sandberg 2014, osa 1, 396). D2 esittää ilmavirtojen nimitykset, joista numeroilla 1 ja 9 esitetyt ovat ulkoilmaa (Kuva 13). Ulkoilman määrittelyn perusteella pääteltiin, että D2 ohjeistaa ulkoilmavirtavaatimuksen ilmalle, joka kuljetetaan asuinrakennusten tapauksessa suurimmaksi osaksi hallitusti ilmanvaihtokoneen kautta käsiteltynä ja osittain korvausilmana rakennuksen rakenteiden ilmavuotojen kautta käsittelemättömänä.



Kuva 13. Ilmavirtojen nimitykset (Suomen RakMK D2 2012, 4).

Tavanomaisissa rakennuksissa tulo- ja poistoilmavirrat pyritään suunnittelemaan yhtä suuriksi. Yhtenä poikkeuksena ilmavirtatasapainoon ovat asuinrakennukset ja -huoneistot, joissa pyritään lievään sisäilman alipaineiseen tilanteeseen siten, että kokonaispoistoilmavirta on noin 5...10 % tuloilmavirtaa suurempi rakennuksen ilmatiiviydestä riippuen. Lievällä alipaineisuudella varmistetaan, ettei sisäilman kosteus pääse tunkeutumaan höyrönsulun läpi rakenteisiin ja siten pääse aiheuttamaan rakenteisiin vesihöyryn tiivistymistä. (Sandberg 2014, osa 1, 97.)

Nykyaikaisessa hyvin ilmanpitävässä pientalossa sisäilman lievä alipaineisuus (1...3 Pa) saavutetaan, kun kokonaispoistoilmavirta on noin 5...10 % tuloilmavirtaa suurempi (Antson, Kukkonen, Nyman & Saari 2014, 10). Sisäilman alipaineisuuden on oltava niin pieni, ettei se ime epäpuhtauksia sisäilmaan rakenteiden kautta ja tähän vaikuttava tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen suuruus riippuu rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvusta (Antson ym. 2014, 11). Mitä ilmanpitävämpi on vaippa, sitä vähemmän poistoilmavirran tarvitsee olla tuloilmavirtaa suurempi lievän alipaineisuuden saavuttamiseksi.

Asuinrakennuksissa energiatehokkuuden parantumisen yhteydessä parantunut vaipan ilmanpitävyys on tuonut uusia ongelmia esimerkiksi tulisijan sytyttämisessä ja ovien avaamisessa, joten ilmanvaihdolla aiheutettava sisäilman alipaineisuus ei tulisi olla liian suuri (Antson ym. 2014, 5). Asunnon tulo- ja poistoilmavirtojen suhdetta ratkaistaessa on siis otettava vaipan ilmanpitävyys huomioon ja tarvittaessa ilmavirtojen epätasapainoa on säädettävä asunnon käytön aikana, jotta ongelmilta vältyttäisiin. Haasteita sopivan sisäilman alipaineisuuden suhteen aiheuttaa se, että mitä ilmanpitävämpi vaippa on, niin sitä herkemmin sisäilman paine-ero ulkoilmaan nähden muuttuu tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen funktiona (Antson ym. 2014, 11). Lisäksi ilmavirtojen mittauksessa on epätarkkuutta, joten tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen todentaminen haluttuun tasoon aiheuttaa todennäköisesti haasteita.

Esivalintatyökalun määrittelemä peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirta perustuu D2 liitteen 1 taulukon 1 määrittelemään ilmanvaihtokertoimeen. Ilmanvaihtokertoimella tarkoitetaan tunnin kuluessa huonetilaan tai tilasta virrannutta ulkoilmavirtaa huonetilan ilmatilavuutta kohti (kaava 1) (Suomen RakMK D2 2012, 3).

$$n = \frac{q_v}{V} \quad (1)$$

n = ilmanvaihtokerroin, 1/h

q_v = ulkoilmavirta, m³/h

V = huonetilan ilmatilavuus, m³

Vuotena 2007 annetussa rakentamismääräyskokoelman osassa D5 (Suomen RakMK D5 2007, 4) huoneen ilmatilavuus on määritelty sen sisäpintojen rajaamana tilavuutena ja milloin huoneessa on alakatto, jossa aukkojen osuus on alle puolet, katsotaan huoneen yläpinnan rajoittuvan alakaton alapintaan.

Työn toimeksiantajan valmistamien ilmanvaihtokoneiden avulla poistoilmavirran tehostusta voidaan ohjata asuntokohtaisesti tarpeen mukaan, esimerkiksi keittiön liesikuvusta siten, että joko liesikuvun läppä on auki, jolloin poistoilmavirran osalta tehostus tapahtuu keittiössä lainausperiaatteella tai siten, että liesikuvun läppä on kiinni, jolloin poistoilmavirran osalta tehostus tapahtuu yleisesti asunnossa. Tehostuksen aikana tuloilmavirrat tehostuvat samaan tapaan, kuten poistoilmavirrat liesikuvun läpän ollessa kiinni. (Vallox Capto PTC EC -säädinkuvun ohje 2017, 2.)

Tässä tapauksessa D2 liitteen 1 taulukon 1 mukaan asuntojen ilmanvaihto mitoitetaan yleensä poistoilmavirtojen perusteella siten, että

- asuntojen ilmanvaihtokerroin on vähintään 0,5 1/h ja ulkoilmavirtojen riittävyys varmistetaan vähintään ohjearvojen mukaisiksi
- pienten asuntojen poistoilmavirrat mitoitetaan yleensä ohjearvoja pienemmiksi siten, että ilmanvaihtokerroin on enintään 0,7 1/h
- suurten asuntojen poistoilmavirrat mitoitetaan yleensä ohjearvoja suuremmiksi, jotta tilakohtainen ulkoilmavirta olisi ohjearvon mukainen ja ilmanvaihtokerroin olisi vähintään 0,5 1/h.

Yllä mainittujen ehtojen lisäksi on otettava huomioon se, että D2 liitteen 1 taulukon 1 mukaan saunassa tapahtuvaa ilmanvaihtoa ei oteta huomioon asunnon ilmanvaihtokerrointa laskettaessa, jos saunan ulkoilmavirta on yhtä suuri kuin poistoilmavirta. Yleensä saunan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto mitoitetaan D2 liitteen 1 taulukon 1 ohjearvojen mukaan, jolloin saunan tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret. Jos asunnossa on sauna, esivalintatyökalu ottaa D2 liitteen 1 taulukossa 1 ohjeistetun $2 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2$ ja vähintään $6 \text{ dm}^3\text{/s}$ ulkoilmavirran lisäyksen huomioon ilmanvaihtokerroin avulla laskettuun peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirtaan.

Suomen asuinkerrostaloissa kerroskorkeus on vähintään 3000 mm (Suomen RakMK G1 2005, 7). Välipohjan paksuus on yleensä noin 300 mm. Asuinkerrostaloissa talotekniikka piilotetaan usein alakatolla, jonka korkeus on tekniikan vaatimasta huonekohtaisesta tilasta riippuen yleensä 200...400 mm. Huonekorkeus vähimmäiskerroskorkeudella on tällöin noin 2,3...2,5 m alakatollisissa huoneissa sekä 2,7 m niiden huoneiden osalta, joissa ei tarvita alakattoa tekniikan piilottamiseksi.

Asuinkerrostaloihin rakennetaan myös pieniä asuntoja, joissa on tyypillisesti yksi asuinhuone keittiöllä ja kylpyhuone sekä näiden pienten asuntojen asuinpinta-ala voi olla alle 30 m². D2 liitteen 1 taulukon 1 poistoilmavirtojen perusteella mitoitettuna asunnon peruskäyttötilanteen ulkoilmavirraksi saadaan, kun käytettävissä on ilmanvaihtokone, jolla ilmavirtojen tehostusta voidaan ohjata asuntokohtaisesti

$$q_v = 8 \text{ dm}^3/\text{s} (\text{keittiö}) + 10 \text{ dm}^3/\text{s} (\text{kylpyhuone}) = 18 \text{ dm}^3/\text{s}$$

Yksikkö dm³/s on johdettava muotoon m³/h

$$\frac{18 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}} = 0,018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 64,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Oletetaan pienen asunnon asuinpinta-alaksi 25 m² ja keskimääräiseksi huonekorkeudeksi 2,5 m, jolloin asunnon ilmatilavuudeksi saadaan

$$V = 25 \text{ m}^2 * 2,5 \text{ m} = 62,5 \text{ m}^3$$

Ulkoilmavirta on 18 dm³/s, koska asunnon huonetiloista poistetaan ilmaa 18 dm³/s, joka tulee asunnon huonetiloihin pääasiallisesti tuloilmavirtana (ulkoilma) ja osin rakenteiden kautta korvausilmavirtana (ulkoilma) kuvan 13 mukaisesti.

Asunnon ilmanvaihtokertoimeksi saadaan lasketuilla arvoilla

$$n = \frac{q_v}{V} = \frac{64,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{62,5 \text{ m}^3} = 1,04 \text{ 1/h}$$

Yllä esitetystä esimerkistä nähdään, että asuinkerrostaloihin rakennettavien pienten asuntojen ilmanvaihtokerroin kasvaa D2 ohjeistamia poistoilmavirtoja käyttämällä suuremmaksi, kuin ohjeistettu ilmanvaihtokertoimen enimmäisarvo. Mitoitettaessa esimerkin mukainen 25 m² suuruisen asunnon ulkoilmavirta ohjeistetun ilmanvaihtokertoimen enimmäisarvon avulla, saadaan ulkoilmavirraksi

$$n = \frac{q_v}{V} \Rightarrow q_v = n * V = 0,7 \frac{1}{h} * 62,5 \text{ m}^3 = 43,8 \text{ m}^3/h$$

Johdetaan yksikkö m³/h muotoon dm³/s

$$\frac{43,8 \frac{\text{m}^3}{h}}{3600 \frac{s}{h}} = 0,012 \frac{\text{m}^3}{s} * 1000 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3} = 12 \text{ dm}^3/s$$

Yllä laskettu ulkoilmavirta 12 dm³/s tulisi jakaa esimerkin mukaisen pienen asunnon keittiön ja kylpyhuoneen poistoilmalaitteille. Yhtenä ratkaisuna voidaan määritellä keittiön poistoilmavirraksi 5 dm³/s ja kylpyhuoneen 7 dm³/s, jotta saadaan kylpyhuoneessa syntyviä epäpuhtauksia poistettua tyydyttävästi myös silloin, kun asunnon ilmanvaihtoa ei tehosteta.

Nykyinen D2 ohjeistama tapa määritellä pienten asuntojen ulkoilmavirtojen suuruus saattaa olla riittämätön, koska asunnon koosta riippumatta pienessäkin asunnossa on yleensä vähintään keittiö ja kylpyhuone. Keittiössä ja erityisesti kylpyhuoneessa syntyy epäpuhtauksia ja kosteutta silloinkin, kun ilmanvaihtoa ei tyypillisesti tehosteta ja tästä johtuen on perusteltua asettaa esivalintatyökalun laskemalle peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirralla minimivaatimus.

Asunnon kokonaisulkoilmavirralla ei nykyisin (2017) ole asetettu minimivaatimusta. Tähän on mahdollisesti tulossa muutos vuoden 2017 ja 2018 vaihteessa, kun maankäyttö ja rakennuslain muutoksesta johtuen rakentamismääräyskokoelma tullaan uudistamaan (Kalliomäki 2017, 2).

D2 (2012) ilmanvaihtomäärien päivitys on parhaillaan (2017) työn alla ympäristöministeriön toimeksiannosta. Ilmanvaihtomäärien päivitystyö toteutetaan asiantuntijoille kohdennetuilla kyselyillä sekä 21.8.2017 ja 23.8.2017 järjestettyjen työpajojen tuloksien perusteella, joihin ovat osallistuneet FINVAC, SuLVI, VSF ja Sisäilmayhdistys. Hankkeen tulos on tarkoitus julkaista ympäristöministeriön ohjeena samaan aikaan, kuin vastaava asetus vuoden 2017 ja 2018 vaihteessa. (Suomen LVI-liitto SuLVI ry:n www-sivut 2017.)

21.8.2017 D2 (2012) ilmanvaihtomäärien päivittämiseksi pidetyssä työpajassa julkais-
tujen Kalliomäen ja Seppäsen esityksien perusteella asuntojen ulkoilmavirraksi on mi-
toitettava vähintään $18 \text{ dm}^3/\text{s}$ (Kalliomäki 2017, 5; Seppänen 2017, 1).

Aiempana esitetyn asuinkerrostalon pientä asuntoa koskevasta esimerkkilaskelmasta
tehtyjen päätelmien ja D2 (2012) ilmanvaihtomäärien päivitystyön ohella pidettyjen
työpajojen asiantuntijaesitysten perusteella voidaan todeta, että esivalintatyökalua var-
ten ulkoilmavirran minimiarvoksi voidaan tässä kehitystyössä määritellä $18 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Asunnon minimiulkoilmavirran ($18 \text{ dm}^3/\text{s}$), ilmanvaihtokertoimen ohjearvon ja sau-
nan ulkoilmavirran ohjearvon ($2 \text{ (dm}^3/\text{s)/m}^2$) perusteella voidaan määritellä esivalinta-
työkaluun ilmanvaihtokoneen mitoittava peruskäyttötilanteen ulkoilmavirta (Kaava 2)
kaavaa 1 hyödyntäen.

$$q_{v,esi} = \frac{n * V}{3,6} + A_{sauna} * q_{v,sauna} \quad (2)$$

$q_{v,esi}$ = ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirta,
 dm^3/s

n = ilmanvaihtokerroin, $1/\text{h}$

V = asunnon tilavuus, m^3

$3,6$ = kerroin yksikkömuunnokselle $\text{m}^3/\text{h} \Rightarrow \text{dm}^3/\text{s}$, $(\text{m}^3/\text{h})/(\text{dm}^3/\text{s})$

A_{sauna} = saunan lattiapinta-ala, m^2

$q_{v,sauna}$ = saunan mitoitusulkoilmavirta, $(\text{dm}^3/\text{s})/\text{m}^2$

Esivalintatyökalun toiminnan kannalta oli päätettävä ilmanvaihtokertoimenä käytettävä arvo, joka perustuu D2 liitteen 1 taulukon 1 ilmanvaihtokertoimen ohjeistukseen asunnon suuruudesta riippuvaisena. Esivalintatyökaluun määritellyn minimiulkoilmavirran $18 \text{ dm}^3/\text{s}$ vuoksi ilmanvaihtokertoimella $0,7 \text{ 1/h}$ ja esimerkiksi keskimääräisellä huonekorkeudella $2,5 \text{ m}$ asunnon suuruus voisi olla 37 m^2 , jotta ulkoilmavirta pysyy määritellyssä minimiarvossa ja vastaavasti ilmanvaihtokertoimella $0,5 \text{ 1/h}$ asunnon suuruus olisi 52 m^2 .

Lisäksi minimiulkoilmavirran suuruus ei vielä vaikuta ilmanvaihtokoneen esivalintaan, vaan lasketun ulkoilmavirran on oltava suurempi. Laskentaan vaikuttavien seikkojen vuoksi voidaan päätellä, että asunto ei ole pieni silloin, kun ulkoilmavirran suuruudella on merkitys koneen esivalintaan ja tämän vuoksi esivalintatyökalussa ei huomioitu ohjeistettua ilmanvaihtokertoimen enimmäisarvoa $0,7 \text{ 1/h}$ pienille asunnoille. Esivalintatyökalun ulkoilmavirran laskenta yksinkertaistettiin yllä mainituista syistä siten, että asunnon suuruudesta riippumatta laskennassa ilmanvaihtokertoimenä käytetään arvoa $0,5 \text{ 1/h}$.

3.2 Ilmanvaihtokoneen esivalinta

Ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirran määrittämisen jälkeen esivalintatyökalun on tiedettävä esivalittava kone. Esivalintatyökalu hyväksyy esivalittavaksi koneeksi sen, jonka maksimi-ilmavirta on hyväksyttävissä olevalla alueella, kuitenkin esivalitsematta sellaista konetta, jonka maksimi-ilmavirta on tarpeettoman suuri. Koneelta sallittavaan peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirtaan vaikuttaa se, että haluaako esivalintatyökalun käyttäjä valita matalaäänitasoisen koneen.

Vallox ilmoittaa ilmanvaihtokoneiden tekniset tiedot Internet-sivustoillaan saatavilla olevissa teknisissä esitteissä (Vallox Oy:n www-sivut 2017). Teknisissä esitteissä ilmoitetaan koneen maksimi-ilmavirrat tulo- ja poistupuolelle (dm^3/s) kanavistopainehäviöiden ollessa 100 Pa . Koneille esivalintatyökalun sallima peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirta päätettiin perustuvaksi mainittuun teknisestä esitteestä saatavaan maksimipoistoilmavirtaan, koska aikaisemman päätelmän perusteella D2:n mukaan asunnon mitoitusulkoilmavirta vastaa asunnon kokonaispoistoilmavirtaa.

Mikäli esivalintatyökalun käyttäjä haluaa matalaäänitasoisen ilmanvaihtokoneen, esivalintatyökalun määrittelemä koneen peruskäyttötilanteen mitoitussulkoilmavirta voi olla maksimissaan puolet koneen maksimipoistoilmavirrasta 100 Pa kanavistopainehäviöillä, koska suuremmalla koneelta vaadittavalla ilmavirralla ei välttämättä pystytä saavuttamaan riittävää äänenvaimennusta (Kurnitski 2007, 423).

Mikäli esivalintatyökalun käyttäjä haluaa D2-ohjeistukset täyttävän ilmanvaihtokoneen, esivalintatyökalu sallii koneen peruskäyttötilanteen mitoitussulkoilmavirran sellaiseksi, että koneella voidaan saavuttaa D2:n ohjeistama 30 %:n asunnon käyttöajan ilmanvaihdon tehostus.

Tämän työn tekninen perusta kehitettiin Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneelle, jonka maksimipoistoilmavirta on 95 dm³/s poistupuolen kanavistopainehäviöiden ollessa 100 Pa (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 8). Puolittamalla tämä ilmavirran arvo, saadaan esivalintatyökalun laskemalle koneen peruskäyttötilanteen mitoitussulkoilmavirralla maksimiarvo, jolla esivalintatyökalu voi ehdottaa konetta matalaäänitasoisena (Kaava 3).

$$q_{v,max,hilj} = \frac{q_{v,max,ilm}}{2} \quad (3)$$

$q_{v,max,hilj}$ = peruskäyttötilanteen maksimi mitoitussulkoilmavirta, jolla esivalintatyökalu ehdottaa matalaäänitasoista ilmanvaihtokonetta, dm³/s

$q_{v,max,ilm}$ = valmistajan ilmoittama ilmanvaihtokoneen maksimipoistoilmavirta poistupuolen kanavistopainehäviöiden ollessa 100 Pa, dm³/s

Matalaäänitasoisena Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen maksimi mitoitussulkoilmavirraksi määritettiin esivalintatyökalua varten

$$q_{v,max,hilj} = \frac{q_{ilm,max}}{2} = \frac{95 \frac{dm^3}{s}}{2} = 47,5 \text{ dm}^3/s$$

Matalaäänitasoisena esivalintatyökalu ei ehdota Vallox 096 MC -ilmanvaihtokonetta, jos esivalintatyökalun kaavan 2 avulla laskema ulkoilmavirta $q_{v,esi}$ on suurempi kuin

47,5 dm³/s, vaan esivalintatyökalu ehdottaa konetta, jonka maksimiulkoilmavirta $q_{v,max,hilj}$ on mahdollisimman pieni, mutta suurempi, kuin kaavan 2 avulla laskettu ulkoilmavirta $q_{v,esi}$.

Asuinrakennuksiin tarkoitettujen ilmanvaihtokoneiden poistoilmapuolen imu- ja painekanavistossa aiheutuva kokonaispainehäviö riippuu pitkälti asunnon geometriasta ja kanavistomitoituksesta. Asunnon geometriasta riippuen peruskäyttötilanteen ilmavirroilla poistoilmapuolen imu- ja painekanavistossa aiheutuvaksi kokonaispainehäviöksi suositellaan korkeintaan 50...100 Pa (SFP-opas 2009, 14).

Ilmanvaihtokonekohtaisen peruskäyttötilanteen maksimiulkoilmavirran määrittämiseksi oli selvitettävä konekohtainen ilmavirtojen tehostustilanteen kanavistopainehäviö. Painehäviön riippuvuus ilman tilavuusvirrasta saatiin määritettyä puhallinlakien avulla. Ilman tilavuusvirran muuttuessa, muuttuu kokonaispaine teoreettisesti puhallinlakien mukaan ilman tilavuusvirtojen suhteen neliöön (Kaava 4) (Sandberg 2014, osa 2, 156). Kaavassa 4 alaindeksi x kuvaa tilannetta muutoksen jälkeen ja o ennen muutosta.

$$p_{Fx} = \left(\frac{q_{vx}}{q_{vo}} \right)^2 * p_{Fo} \quad (4)$$

p_F = kokonaispaine, Pa

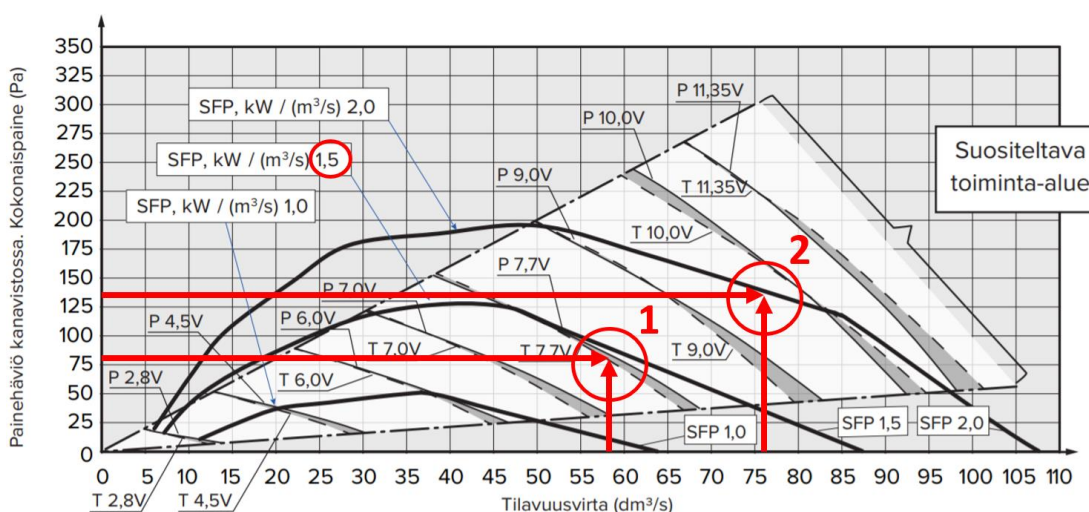
q_v = ilman tilavuusvirta, dm³/s

Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen osalta peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirralla ($q_{v,100\%}$) päätettiin poistoilmapuolen kanavistopainehäviöksi imu- ja painepuolella 80 Pa. Kaavan 4 avulla saadaan imu- ja painepuolen kanavistopainehäviöksi 30 %:n ilmanvaihdon tehostustilanteessa ($q_{v,130\%}$) asunnon liesikuvun tehostusläpän ollessa suljettuna

$$p_{F,130\%} = \left(\frac{q_{v,130\%}}{q_{v,100\%}} \right)^2 * p_{F,100\%} = \left(\frac{1,3}{1,0} \right)^2 * 80 \text{ Pa} = 135 \text{ Pa}$$

Tämän 30 %:n tehostustilanteen kanavistopainehäviön avulla selvitetiin teknisen esitteen virtausteknisestä kuvaajasta poistoilman tilavuusvirran arvo, jossa poistoilmapuolen imu- ja painepuolen kanavistopainehäviöihin on käytettävissä 135 Pa ottaen huomioon selvitetystä pisteestä vielä varmuusvara, jotta 30 %:n ilmanvaihdon tehostus on vielä todennäköisesti saavutettavissa (Kuva 14).

Tehostustilanteessa aiheutuvan kanavistopainehäviön mitoittava tilanne on voimassa siinä tilanteessa, jossa asunnon liesikuvun tehostusläppä on suljettuna, jolloin myös asunnon poistoilmapäätelaitteiden aiheuttama painehäviön suuruus noudattaa teoriassa kaavaa 4. Painehäviö kasvaa vain osittain kanavisto-osuudella, jos liesikuvun tehostusläppä on auki, koska liesikuvun painehäviö on tehostustilanteessa suhteellisen pieni sekä muiden poistoilmalaitteiden ilman tilavuusvirta muuttuu liesikuvulle esisäädetyin ilman tilavuusvirran mukaan lainausperiaatteella.



Kuva 14. Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirran määrittäminen esivalintatyökälua varten (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 8).

Kuvaan 14 merkityssä pisteessä 2 30 % tehostustilanteen poistoilmavirraksi valittiin painehäviöiden varmuusvaran vuoksi $76 \text{ dm}^3/\text{s}$ kanavistopainehäviöiden ollessa 135 Pa. Yllä esitettiin, että jos tehostustilanteen ulkoilmavirralla kanavistopainehäviöt ovat 135 Pa, niin peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirralla kanavistopainehäviöt ovat 80 Pa. Näin ollen voitiin laskea kaavaa 4 hyödyntäen Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirta esivalintatyökälua varten (kuvan 14 piste 1).

$$p_{Fx} = \left(\frac{q_{vx}}{q_{vo}}\right)^2 * p_{Fo} \Rightarrow q_{vx} = \sqrt{\frac{p_{Fx}}{p_{Fo}}} * q_{vo} = \sqrt{\frac{80 \text{ Pa}}{135 \text{ Pa}}} * 76 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} = 58,5 \text{ dm}^3/\text{s}$$

Yllä laskettua 58,5 dm³/s suuremmalla esivalintatyökalun kaavan 2 avulla laskemalla mitoitusulkoilmavirralla $q_{v,esi}$ esivalintatyökalu ei ehdota 096 MC -ilmanvaihtokoneita, jos esivalintakriteerinä on D2-ohjeistukset täyttävä ilmanvaihtokone.

Muiden ilmanvaihtokoneiden peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirta määritettiin samalla tavalla ottaen huomioon se, että mitä suurempi on koneen teknisessä esitteessä ilmoitettu maksimipoistoilmavirta 100 Pa kanavistopainehäviöllä, niin sitä suurempi saattaa asunnon geometriasta ja kanavistomitoituksesta riippuen olla myös peruskäyttötilanteen kanavistopainehäviö.

Pienempiä koneita käytetään tyypillisesti pienemmissä asunnoissa, jolloin aiheutuva kanavistopainehäviö on yleensä pienempi. Vastaavasti suuremmissa asunnoissa käytetään suurempia koneita, jolloin kanavistopainehäviö saattaa kasvaa muun muassa laajemman kanaviston vuoksi suuremmaksi.

Esimerkiksi pienen maksimipoistoilmavirran omaavalla koneella peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirralla ($q_{v,100\%}$) aiheutuvaksi mitoittavaksi kanavistopainehäviöksi päätettiin 60 Pa. Vastaavasti suuren maksimipoistoilmavirran omaavalla koneella mitoitusulkoilmavirralla ($q_{v,100\%}$) aiheutuvaksi mitoittavaksi kanavistopainehäviöksi päätettiin 100 Pa. Näissä tilanteissa oli myös otettava huomioon, että 30 % ilmavirtojen tehostustilanteessa kanavistopainehäviö muuttuu kaavan 4 mukaan.

Kuvasta 14 nähdään myös, että pisteessä 1 peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirralla ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho on noin 1,4 kW/(m³/s).

Ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, SFP-luku on yksittäisen tulo- ja poistoilmakoneen tapauksessa tulo- ja poistoilmapuhaltimen yhteenlaskettu sähköverkosta ottama sähköteho jaettuna koneen mitoitusilmavirroista suuremmalla (joko tulo- tai poistoilmavirta). SFP-luku kertoo tavallaan ”ilmanvaihdon sähkönkäytön hyötysuhteen” eli

mitä pienempi SFP-luku on, sitä pienemmällä sähköteholla ilman kuljettaminen tapahtuu. On myös huomattava, että SFP-luku on koneen ominaisuus järjestelmään asennettuna, ei siis pelkän koneen ominaisuus. (LVI 30-10529 2013, 2.)

Asuinrakennusten ilmanvaihdon osalta ominaissähköteho määritellään peruskäyttötilanteen mitoitusilmavirralla (Kaava 5) (LVI 30-10529 2013, 2).

$$\text{SFP} = \frac{P_{e,\text{tulo}} + P_{e,\text{poisto}}}{q_{v,\text{max}}} \quad (5)$$

SFP = ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, kW/(m³/s)

P_{e,tulo} = tuloilmapuhaltimen sähköverkosta ottama sähköteho, kW

P_{e,poisto} = poistoilmapuhaltimen sähköverkosta ottama sähköteho, kW

q_{v,max} = peruskäyttötilanteessa ilmanvaihtokoneen mitoitusilmavirroista suurempi (tulo tai poisto), m³/s

Ilmanvaihdon tehostus on lyhytaikaista, jolloin ominaissähköteho saa ylittää ohjeiston (SFP-opas 2009, 11). Nykyisin (2017) ohjeistetaan koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon enimmäisarvoksi 2,0 kW/(m³/s) (Suomen RakMK D3 2012, 15). Vuoden 2017 ja 2018 vaihteessa voimaan astuvan lähes nolla-energiarakentamista säätelevän energiatehokkuusasetuksen vuoksi tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho voi olla tällöin enintään 1,8 kW/(m³/s) (Luonnos YMa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017, 30 §).

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien kuluttama sähköenergian määrä on ilmavirran suuruuden lisäksi riippuvainen kanavistomitoituksesta. Tämä on energiataloudellisuuden osalta syynä siihen, että esivalintatyökalua varten määritetty ilmanvaihtokonekohtainen peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirran arvo sisältää varmuusvaran.

3.3 Ilmanvaihtokoneen valinnan merkitys

Esivalintatyökalun toimivuus voitiin selvittää vertaamalla matalaäänitasoisen ja D2-ohjeistukset täyttävän ilmanvaihtokoneen aiheuttamaa äänitasoa.

Seuraavassa esitetään havainnollistava esimerkki ilmanvaihtokoneen valinnan merkityksestä ilmanvaihtolaitteiston aiheuttamaan äänitasoon. Äänilaskennan tuloksena saatu A-suodatettu äänen painetaso L_{p10A} (dB(A)) makuuhuoneessa MH1 laskettiin laskentataulukolla laitteiden teknisistä esitteistä saatujen tietojen perusteella.

Esimerkkiin koskien tulee huomioida se, että matalaäänitasoisen ja D2-ohjeistukset täyttävän ilmanvaihtokoneen makuuhuoneeseen aiheuttaman äänitasojen ero riippuu esivalintatyökalun laskemasta koneen peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirrasta, joka vaikuttaa esivalintatyökalun esivalitsemiin koneisiin. Puhaltimien äänitekniset ominaisuudet vaihtelevat konekohtaisesti, jolloin virtausteknisesti väljemmin mitoitettu kone ei aina välttämättä ole äänitasoltaan huomattavasti edullisempi.

Esimerkissä asunnon asuinpinta-ala on 120 m^2 ja keskimääräinen huonekorkeus 3 m sekä asunnossa on sauna, jonka lattiapinta-ala on 5 m^2 . Näiden lähtöarvojen avulla esivalintatyökalu määrittää ilmanvaihtokoneen peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirran kaavan 2 avulla

$$q_{v,esi} = \frac{n * V}{3,6} + A_{sauna} * q_{sauna}$$

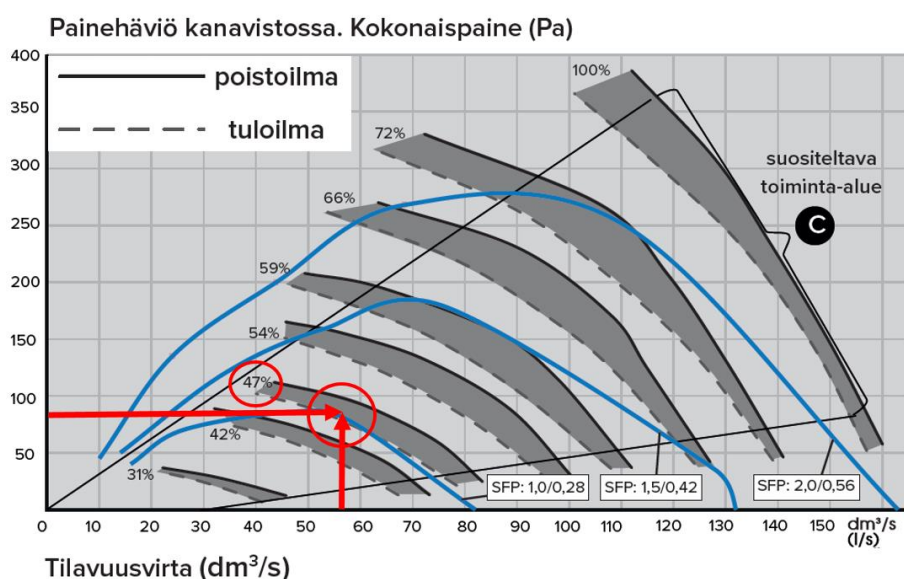
$$q_{v,esi} = \frac{0,5 \frac{1}{h} * 120 \text{ m}^2 * 3 \text{ m}}{3,6 \frac{h}{\text{dm}^3}} + 5 \text{ m}^2 * 2 \frac{\frac{\text{dm}^3}{\text{s}}}{\text{m}^2} = 60 \text{ dm}^3/\text{s}$$

Oletetaan kokonaistuloilmavirraksi $57 \text{ dm}^3/\text{s}$, jolloin saavutetaan lievä asunnon alipaineisuus tulo- ja poistoilmavirran suhteen ollessa 0,95.

Laskennallisen peruskäyttötilanteen mitoitusulkoilmavirran avulla esivalintatyökalu suorittaa matalaäänitasoisen ja D2-ohjeistukset täyttävän ilmanvaihtokoneen esivalinnan. Esivalinnan tuloksena matalaäänitasoiseksi koneeksi osoittautui Vallox 145 MV ja D2-ohjeistukset täyttäväksi Vallox 121 MC.

Alla esitetään näiden koneiden teknisissä esitteissä ilmoitetut äänen tehotasot taajuuskaistakohtaisesti (kuvat 16 ja 18) tuloilmakanavistoon puhaltimen toimintapisteessä $57 \text{ dm}^3/\text{s}$, 80 Pa (kuvat 15 ja 17) sekä tarkasteltava oleva makuuhuone MH1 (kuva 19). Lisäksi kuvassa 20 ja 21 esitetään valitun äänenvaimentimen ja tuloilmalaitteen vaimennus sekä kuvassa 22 esitetään tuloilmalaitteen aiheuttama äänen tehotaso.

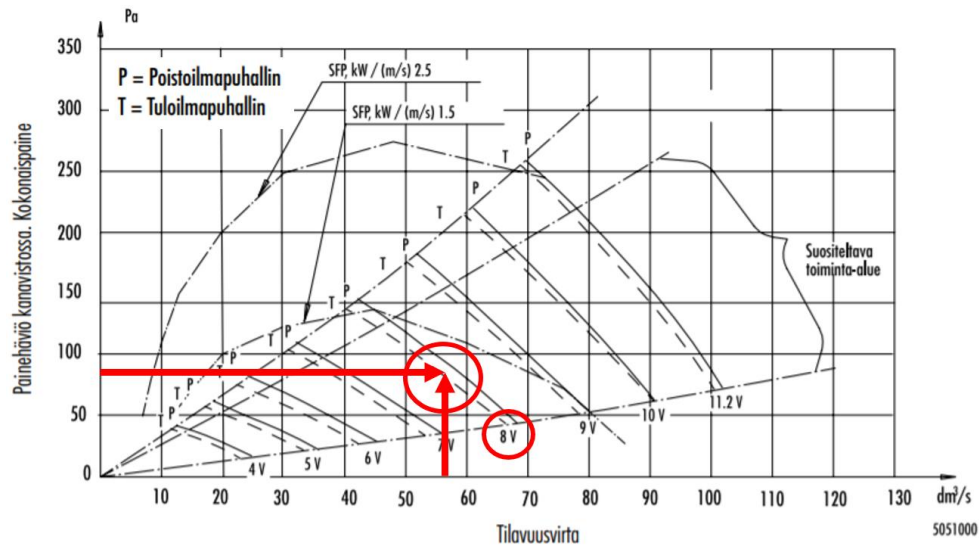
Esimerkissä tarkastellaan tuloilmakanavistoon ja makuuhuoneeseen aiheutuvaa äänitasoa, koska asuinhuoneiden vaatimus on ääniteknisesti tiukka ja makuuhuoneessa on tyypillisesti tuloilmalaite.



Kuva 15. Vallox 145 MV -koneen tuloilmapuhaltimen toimintapiste $57 \text{ dm}^3/\text{s}$, 80 Pa (MyVallox-ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 70).

Säätöasento		Koneesta tuloilmakanavistoon lähtevä äänitehotaso oktaavikaistoittain L_w , dB							
		31 %	42 %	47 %	54 %	59 %	66 %	72 %	100 %
Ilmavirta dm^3/s (l/s)		36,2	56,3	67,3	80,7	92,9	105	116	128
Ilmavirta m^3/h		130,32	202,68	242,28	290,52	334,44	378	417,6	460,8
Oktaavikaistan keski-taajuus Hz	63	41	50	56	58	59	64	67	69
	125	45	53	56	59	62	65	68	71
	250	50	54	57	61	63	66	68	70
	500	48	53	56	59	60	63	65	68
	1000	45	54	57	60	62	64	66	67
	2000	35	46	50	55	58	61	64	66
	4000	26	41	46	51	54	58	60	63
	8000	21	32	38	45	49	53	56	59

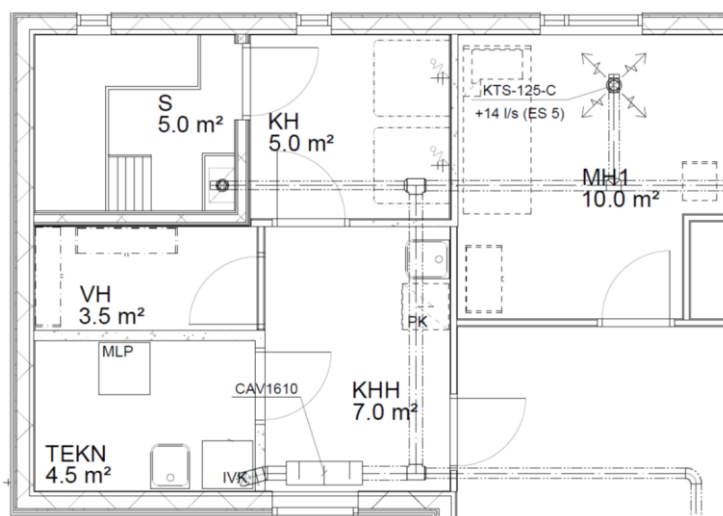
Kuva 16. Vallox 145 MV -koneen äänen tehotasot (dB) tuloilmakanavistoon (MyVallox-ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 70).



Kuva 17. Vallox 121 MC -koneen tuloilmapuhaltimen toimintapiste 57 dm³/s, 80 Pa (Vallox 121 MC - ilmanvaihtokoneen käyttö-, huolto- ja tekniset ohjeet 2013, 5).

		Äänitehotaso tuloilmakanavassa (yhdessä kanavassa) oktaavikaistoittain L _w dB							
		SÄÄTÖASENTO / ILMAVIRTA dm ³ /s							
		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.2
Säätöasento		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.2
Ilmavirta dm ³ /s		17.2	29.4	39.8	51.1	65.6	73.1	78.9	91.6
Oktaavi- kaistan keski- taajuus Hz	63	63	72	73	77	80	83	84	87
	125	53	59	63	66	69	73	75	79
	250	45	50	53	57	62	65	68	70
	500	40	45	47	51	55	58	61	63
	1000	39	46	49	54	57	59	60	62
	2000	32	40	45	51	55	58	61	64
	4000	18	29	35	41	46	50	52	55
8000	*	*	22	31	38	42	45	49	

Kuva 18. Vallox 121 MC -koneen äänen tehotasot (dB) tuloilmakanavistoon (Vallox 121 MC -ilmanvaihtokoneen käyttö-, huolto- ja tekniset ohjeet 2013, 5).



Kuva 19. Esimerkitapauksessa tarkasteltavana oleva makuuhuone MH1.

CAV1610 | 7907061

Vaimennus (dB), f(Hz)							
63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
7	14	16	27	44	45	35	16

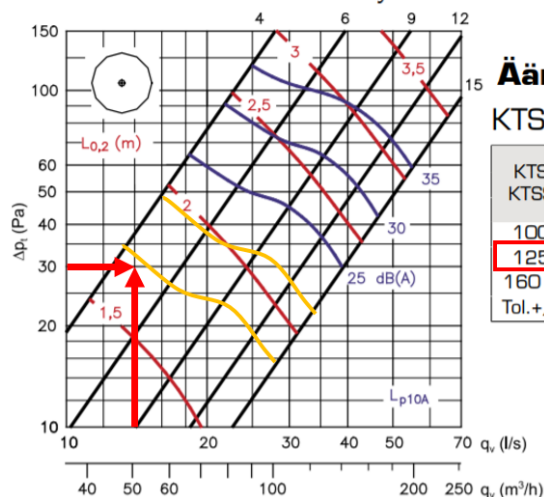
Kuva 20. CAV1610 äänenvaimentimen taajuuskaistakohtainen vaimennus (CASA-äänenvaimentimen tekniset tiedot 2016, 2).

Äänenvaimennus ΔL

KTS KTSS	Äänenvaimennus (dB)							
	oktaavikaistan keskitaajuudella (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
100	22	18	13	11	9	8	7	8
125	20	16	11	9	9	7	6	5
160 *	18	14	10	9	9	7	6	6
Tol.+/-	6	3	2	2	2	2	2	3

Kuva 21. KTS-125 tuloilmalaitteen taajuuskaistakohtainen vaimennus (KTS ja KTSS tuloilmaventtiilien tekniset tiedot 2017, 3).

KTS/KTSS-125 ilman suuntauslevyä ²⁾



Äänen tehotaso L_w

KTS/KTSS ilman suuntauslevyä

KTS KTSS	Äänitason korjauskerroin K_{okt} (dB)						
	oktaavikaistan keskitaajuudella (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
100	-2	2	1	-1	-4	-5	-11
125	4	5	3	-1	-11	-17	-29
160 *	7	6	3	-2	-11	-19	-32
Tol.+/-	3	2	2	2	2	2	3

Kuva 22. KTS-125 tuloilmalaitteen aiheuttama äänen tehotaso (KTS ja KTSS tuloilmaventtiilien tekniset tiedot 2017, 2-3).

Esimerkistä laskenta suoritettiin Excel-laskentataulukolla. Yllä olevilla laitevalinnoilla suoritettu laskenta on esitetty taulukossa 1. Laskennassa ei otettu suoran kanavan ja kanavaosien vaimennusta huomioon, koska niiden vaimennusarvot ovat taulukoissa ja käyrästöissä usein epätarkkoja sekä näin saadaan laskentaan varmuusvaraa (Sandberg 2014, osa 2, 74). Laskenta suoritettiin taulukossa 1 vaiheittain:

1. Kohdassa 3 laskettiin koneesta lähtevän tehotason ja huomioon otettujen vaimennusten aritmeettinen erotus. Haarautumisvaimennus 6 dB saatiin huoneen tuloilmavirran ($14 \text{ dm}^3/\text{s}$) ja kokonaistuloilmavirran ($57 \text{ dm}^3/\text{s}$) suhteen avulla (Sandberg 2014, osa 2, 77).

2. Kohdassa 4 laskettiin tuloilmalaitteesta aiheutuva tehotaso. Lähtökohtana käytettiin kuvassa 22 tuloilmalaitteen toimintapisteessä arvioitua keltaista äänitasoaluetta, joka kuvaa painetasoa 15 dB(A). Arvioituun painetasoon lisättiin kuvassa 22 oikealla näkyvä korjaus.
3. Kohdassa 5 laskettiin koneen vaimennusten jälkeinen tehotaso ja tuloilmalaitteen tehotaso logaritmisesti yhteen.
4. Kohdassa 7 lisättiin aritmeettisesti koneen ja tuloilmalaitteen yhteiseen tehotasoon A-suodatuksen korjaus (Sandberg 2014, osa 2, 59).
5. Taajuuskaistakohtaiset tehotasot laskettiin A-suodatuksen jälkeen logaritmisesti yhteen taulukon oikeaan alanurkkaan (L_{WA}). Lisäksi laskettiin painetaso 10 m² huoneen pintojen absorptioalalla (L_{p10A}).

Taulukko 1. Esimerkkitapauksessa ilmanvaihtolaitteistosta tuloilmakanavan kautta makuuhuoneeseen MH1 aiheutuva äänitaso.

		teho- taso	teho- taso	teho- taso	teho- taso	teho- taso	teho- taso	teho- taso	teho- taso		
		L_{W63}	L_{W125}	L_{W250}	L_{W500}	L_{W1k}	L_{W2k}	L_{W4k}	L_{W8k}		
		[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]		
1.	koneesta lähtevä tehotaso										
	145 MV (Kuva 16)	56	56	57	56	57	50	46	38		
	121 MC (Kuva 18)	80	69	62	55	57	55	46	38		
2.	vaimennus	33	36	33	42	59	58	47	27	yhteensä	
	CAV1610 (Kuva 20)	7	14	16	27	44	45	35	16		
	KTS-125 (Kuva 21)	20	16	11	9	9	7	6	5		
	haarautuminen	6	6	6	6	6	6	6	6		
3.	tehotaso vaimen- nusten jälkeen										
	145 MV	23	20	24	14	0	0	0	11	Aritmeettinen	
	121 MC	47	33	29	13	0	0	0	11	erotus 1-2	
4.	tuloilmalaitteen tehotaso	0	19	20	18	14	4	0	0	lähtökohta+	
	lähtökohta (Kuva 22)	0	15	15	15	15	15	15	15	korjaus	
	korjaus (Kuva 22)	0	4	5	3	-1	-11	-17	-29		
5.	tehotaso tuloil- malaitteen jälkeen										
	145 MV	23	23	25	19	14	5	3	11	Logaritmisesti	
	121 MC	47	33	30	19	14	5	3	11	yhteen 3 & 4	
6.	A-suodatus	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1	teho- taso	paine- taso
7.	tehotaso A-suoda- tuksen jälkeen									L_{WA}	L_{p10A}
										[dB(A)]	[dB(A)]
	145 MV	0	6	17	16	14	7	4	10	21	17
	121 MC	21	17	21	16	14	7	4	10	26	22

Laskennan tuloksena makuuhuoneeseen aiheutuvaksi A-suodatetuksi äänen painetasoksi 10 m² huoneen pintojen absorptioalalla L_{p10A} saatiin 145 MV -koneen osalta 17 dB(A) ja vastaavasti 121 MC -koneella 22 dB(A).

Taulukosta 1 nähdään, että 121 MC -koneella matalimmilla taajuuskaistoilla aiheutuu huoneeseen suurempi äänen tehotaso. Huomattava ero johtunee taulukon 1 laskennan perusteella siitä, että 121 MC -koneesta tuloilmakanavistoon aiheutuva äänen tehotaso

on suhteellisen suuri matalilla taajuuksilla ja siitä, että matalilla taajuuksilla on hankalaa saavuttaa suurta vaimennusta äänenvaimentimella, koska matalien taajuuksien vaimentaminen vaatii paksulta vaimennusmateriaalia (Halme & Seppänen 2002, 73).

Tässä esimerkissä tarkasteltiin asunnon makuuhuonetta sen vuoksi, koska melu voi vähentää unen ja levon virkistävää vaikutusta, jos melu vaikeuttaa nukahtamista, unen syvyyttä tai aiheuttaa ylimääräisiä tai ennenaikaisia heräämisiä. Unen häirintää alkaa esiintyä henkilöstä riippuen, kun keskimääräinen L_{pA} -taso ylittää 25...35 dB(A). (Halme & Seppänen 2002, 1.)

Makuuhuoneissa keskimääräinen L_{pA} -taso peruskäyttötilanteen mitoitustilavirroilla on määräyksen mukaan nykyisin 28 dB(A) (Suomen RakMK C1 1998, 5). 121 MC - ilmanvaihtokoneella aiheutui 145 MV -ilmanvaihtokoneeseen verrattuna suurempi äänitaso, joka kuitenkin laskelman mukaan täyttää vaatimuksen hyvin.

4 MITOITUSOHJELMAN MITOITUSTYÖKALUN KEHITYS

Mitoitustyökalun tarkoituksena on antaa mitoitukseen valitusta ilmanvaihtokoneesta vertailukelpoisessa muodossa olevat yksityiskohtaiset tekniset suoritusarvot ja ilmanvaihdosta aiheutuva energiankulutus. Lisäksi mitoitustyökaluun syötettyjen lähtötietojen perusteella lasketuista tuloksista on tarkoituksena haluttaessa saada tulostus, josta näkee laskennan tulokset ja koneen tekniset tiedot.

Mitoitustyökalun tekninen perusta ja laskentamallit kehitettiin Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen teknisillä suoritusarvoilla kirjallisuudesta saatavaan teoriaan perustuen. Laskentataulukot laadittiin siten, että niissä otetaan huomioon teorian lisäksi laskentatyökaluun syötetyt konekohtaiset mittaustulokset.

Mitoitustyökalun kehityksessä Excel-laskentataulukoiden kaavoihin oli laadittava ehtolausekkeita. Ehtolauseke tarvitaan, kun laskenta-arvon laskentaan liittyy vähintään yksi ehto. Esitettävien kaavojen selkeyden vuoksi ehtolausekkeita ei ole sisällytetty kaavojen yhteyteen.

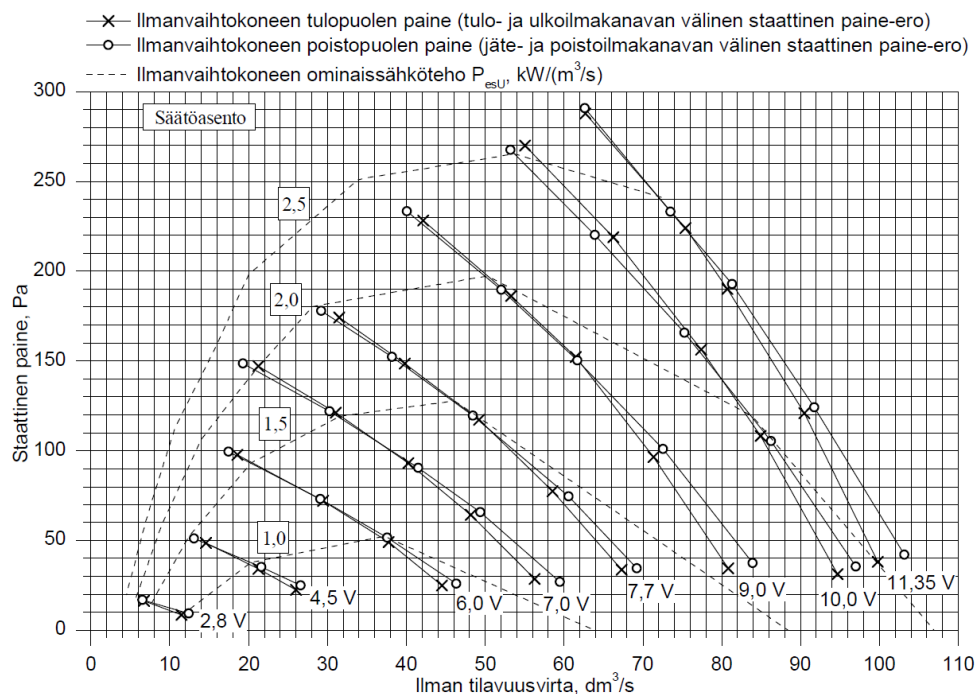
4.1 Puhaltimien sähkötehtäjä ja sähköenergiankulutus

Mitoitustyökaluun syötetyn ilman tilavuusvirran (dm^3/s) ja kanavistossa aiheutuvien painehäviöiden (Pa) perusteella mitoitustyökalun on tarkoitus määrittellä ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköverkosta ottama sähköteho (W). Puhaltimien sähköverkosta ottaman tehon avulla mitoitustyökalun on tarkoitus määrittellä vuotuinen sähköenergiankulutus (kWh).

Mitoitustyökalun avulla voidaan selvittää ilmanvaihtokoneen puhaltimien osalta tarvittavaa sähköenergian määrää tarkemmin, jos mitoitustyökalun käyttäjä syöttää tulo- ja poistoilmapuolten ilman tilavuusvirrat ja kanaviston painehäviöt asunnon kaikissa käyttötilanteissa. Jos mitoitusohjelmaan syötetään vain asunnon peruskäyttötilanteen mitoitustiedot, laskennassa oletetaan ilmanvaihdon toimivan jatkuvasti asunnon peruskäyttötilanteen mitoitustiedoilla.

4.1.1 Ilmanvaihtokoneen aiheuttama painehäviö

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköenergiankulutuksen määrittämiseksi on tunnettava koneen puhaltimien sähköverkosta ottama sähköteho. Lähtötietoina laskennan kehittämiseksi oli saatavilla tulo- ja poistoilmapuhaltimen tuottama paine puhaltimen imu- ja painepuolen kanavistopainehäviöihin puhaltimen ohjausjännitteen ja ilman tilavuusvirran funktiona (Kuva 23) sekä näiden yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho. Nämä mainitut lähtötiedot olivat käytössä myös taulukoina sekä sähkön ottotehon osalta oli myös saatavilla mittaustuloksista laadittu kuvaaja ilman tilavuusvirran ja puhaltimen ohjausjännitteen funktiona.



Kuva 23. Tulo- ja poistoilmapuhaltimen suorituskyvyn lähtötiedot.

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähköverkosta ottaman tehon selvittämiseksi on tunnettava puhaltimien ilman tilavuusvirran suuruus, kokonaispaineenkorotus ja kokonaishyötysuhde (Kaava 6) (SFP-opas 2009, 20).

$$P_e = \frac{q_v * p_F}{\eta_{kok}} \quad (6)$$

P_e = puhallinmoottorin sähköverkosta ottama teho, W

- q_v = puhaltimen ilman tilavuusvirta, m^3/s
 p_F = puhaltimen kokonaispaineenkorotus, Pa
 η_{kok} = puhaltimen kokonaishyötysuhde, -

Kaavasta 6 nähdään, että sähkön ottotehon määrittämiseksi tunnetaan mittausten perusteella ilman tilavuusvirta, kokonaispaineenkorotuksesta puhaltimen imu- ja painepuolen kanavistopainehäviöihin käytettävissä oleva paine sekä ilmanvaihtokoneen molempien puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho.

Yksittäisen puhaltimen sähköverkosta ottaman sähkötehon määrittämiseksi oli selvitettävä puhaltimen kokonaispaineenkorotuksesta se osuus, joka hävitään ilmanvaihtokoneessa. Lisäksi oli selvitettävä yksittäisen puhaltimen kokonaishyötysuhde.

Imu- ja painekanaviston painehäviöihin on yleensä käytettävissä vain puhaltimen tuottama staattinen paine. Ilman virtausnopeuteen sitoutunut dynaaminen paine hävitään yleensä lähes kokonaan ilmanvaihtokoneen liitäntähäviöinä. (Halme & Seppänen 2002, 51.) Tämän vuoksi laskennan yksinkertaistamiseksi kokonaispaineenkorotukseen sisältyvän dynaamisen paineen osuus sisällytettiin ilmanvaihtokoneessa aiheutuvaan painehäviöön.

Lähtötietoina ei ollut saatavilla mitattua ilmanvaihtokoneen aiheuttamaa painehäviötä sekä tulo- että poistopuolella. Vallox 096 MC -koneessa on ebm-papst Oy:n R3G146-AD23-12 kaavuton keskipakopuhallin, joka on varustettu Valloxin valmistamalla puhallinkaavulla. Tämä vastaa ebm:n valmistamaa G3G146-ED23-06 keskipakopuhallinta sillä poikkeuksella, että tässä mallissa on ebm:n puhallinkaapu.

Ilmanvaihtokoneen aiheuttaman painehäviön suuruuden kuvaamiseksi tässä kehitystyössä käytettiin ebm:n tarjoamaa puhallinohjelmaa, koska ebm-puhallinohjelman tulokset todettiin pätevästi riittävällä tarkkuudella Valloxin puhaltimen ominaisuuksiin.

Ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamisen lähtökohdaksi oli saatava arvot ilman tilavuusvirralle ja kanaviston painehäviölle. Mittaustulokset vaihtelivat hieman tulo- ja poistopuolen välillä, joten näistä oli mahdollista ottaa keskiarvo kussakin mittauspis-

teessä ohjausjännitekohtaisesti koneen painehäviön kuvaamisen lähtökohdaksi (taulukko 2). Taulukossa 2 q_{v2} kuvaa tuloilman tilavuusvirtaa ja p_{tUs} on tulopuolen kanavistopainehäviö, sekä q_{v3} kuvaa poistoilman tilavuusvirtaa ja p_{tUe} on poistopuolen kanavistopainehäviö. Lisäksi taulukossa 2 oleva P_e on koneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho ja P_{esU} on koneen ominaissähköteho.

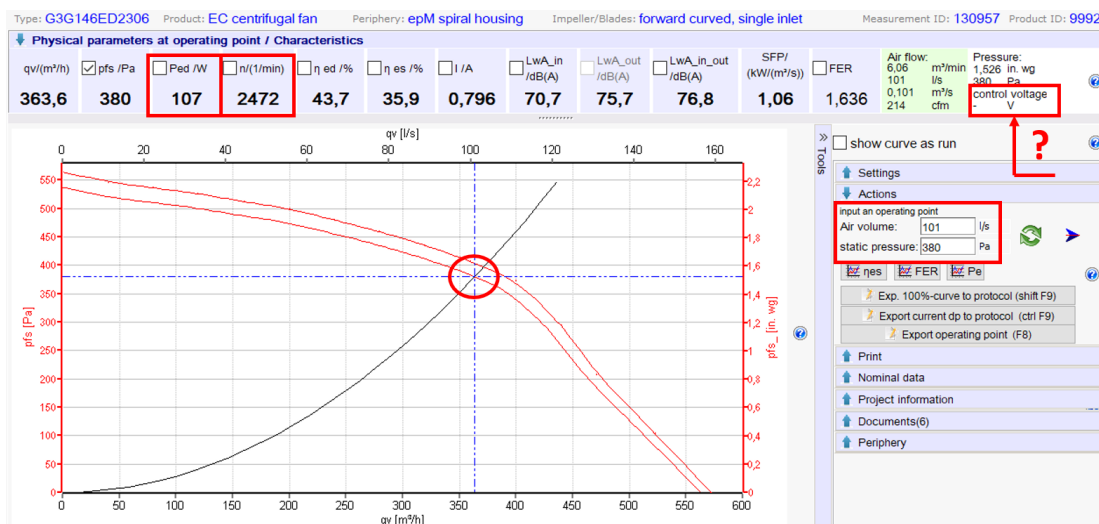
Taulukko 2. Lähtötiedot ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamiseksi ohjausjännitteellä 11,35 V.

Suure	Yksikkö	1	2	3	4	5
SA	V	11,35	11,35	11,35	11,35	11,35
q_{v2}	dm ³ /s	99,8	90,5	80,7	75,4	62,7
p_{tUs}	Pa	38,2	121	190	224	288
q_{v3}	dm ³ /s	103	91,7	81,4	73,5	62,6
p_{tUe}	Pa	42,1	124	193	233	291
P_e	W	214	203	191	183	168
P_{esU}	kW/(m ³ /s)	2,1	2,2	2,3	2,5	2,7

Taulukon 2 mukaiset lähtötiedot olivat saatavilla jokaisella ohjausjännitteellä (V), jotka ovat esitetään aikaisemmin kuvaajamuodossa kuvassa 23. Jokaisella ohjausjännitteellä tulo- ja poistopuolen ilman tilavuusvirtojen ja kanavistopainehäviöiden keskiarvon perusteella oli mahdollista kuvata ilmanvaihtokoneessa aiheutuvan painehäviön suuruus.

Ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamiseksi oli valittava mittaustulosten keskiarvosta ja ebm-puhallinohjelmasta edustava puhaltimen toimintapiste, jota tullaan hyödyntämään kaikissa mittauspisteissä koneen painehäviön kuvaamiseksi. Toisaalta tällä mittauspisteen valinnan edustavuudella ei ole muuta merkitystä kuin koneen kokonaisyhtösuhteeseen kaavan 6 mukaisesti, koska mittauspisteissä sähköverkosta otettu puhaltimien yhteinen sähköteho tunnetaan.

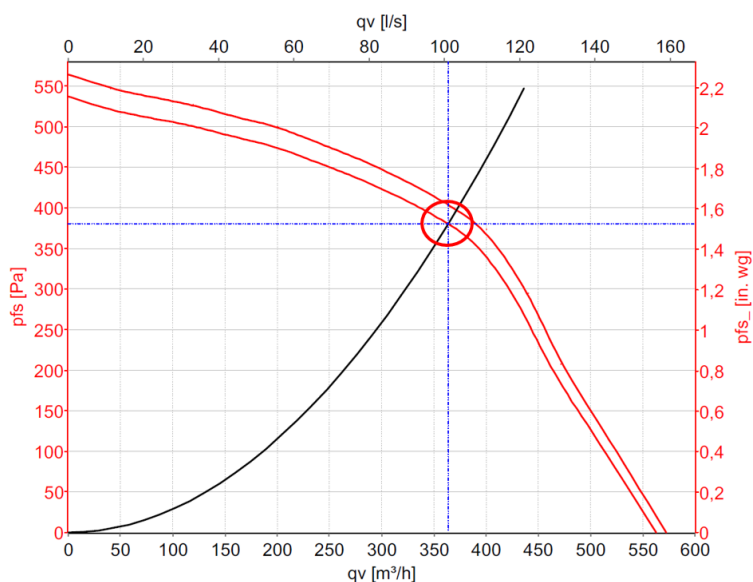
Puhallinohjelman tutkimisen jälkeen edustavaksi mittausten pisteeksi puhallinohjelmaan valikoitui taulukossa 2 esitetty mittauspiste 1, josta tulo- ja poistoilman tilavuusvirran keskiarvona käytettiin 101 dm³/s ja kanavistopainehäviönä käytettiin 40 Pa (Kuva 24). Kuvassa 24 on esitetty ebm-puhallinohjelman käyttöliittymä, jossa puhaltimen toimintapisteen selvittämiseksi käytettiin ilman tilavuusvirran lisäksi taulukossa 2 olevaa sähköverkosta otettua sähkötehoa puolitetuna.



Kuva 24. Ebm-puhallinohjelmaan ilman tilavuusvirran ja sähkön ottotehon avulla määritetty puhaltimen toimintapiste.

Kuvan 24 oikeasta yläreunasta havaittiin, että ohjelma ei julkaise puhaltimen ohjausjännitettä. Lisäksi ohjelma ilmoittaa käyrästössä puhaltimen staattisen paineenkorotuksen, mutta ohjelman avulla saadaan haluttu kokonaispaineenkorotus, kun otetaan toimintapisteestä tuloste (kuva 25). Jokaisesta toimintapisteestä jokaisella ohjausjännitteellä oli otettava kuvan 25 mukainen tuloste, jotta saatiin selvitettyä puhaltimen kokonaispaineenkorotus ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamista varten.

qv	m³/h	363,6
qv	l/s	101
pfs	Pa	380
P _r	Pa	463
n	min ⁻¹	2472
P _{ed}	W	107
SFP	kW/(m³/s)	1,06
η _{ed}	%	43,7
η _{es}	%	35,9
I	A	0,796
L _W A(A,in)	dB(A)	70,7
L _W A(A,out)	dB(A)	75,7(1)
L _W A(A,in+out)	dB(A)	76,8(1)
U _{control}	V	-
Settings		
ρ _{calculated to}	kg/m³	1,2
ρ _{measured at}	kg/m³	1,16



Kuva 25. Ebm-puhallinohjelmasta saatu puhaltimen 101 dm³/s, 463 Pa toimintapisteestä tuloste.

Kuvan 25 tapauksessa ilmanvaihtokoneen painehäviö saatiin, kun vähennettiin kokonaispaineenkorotuksesta aiemmin mainittu mitattu kanavistopainehäviön keskiarvo. Näin ilmanvaihtokoneen painehäviöksi kuvattiin $463 - 40 = 423$ Pa.

Tämän edustavaksi valitun toimintapisteen ohjausjännitettä ei saatu puhallinohjelmalla selvitettyä, mutta tässä toimintapisteessä sähkön ottoteho vastaa mitattua sekä kuvista 24 ja 25 nähdään toimintapisteen olevan lähes maksimisuorituskyvyllä.

Puhallinohjelma antaa puhaltimen tuottokäyrät ohjausjännitteen perusteella. Tämä selvisi siitä, että kuvan 24 mukaisella tuottokäyrällä ilman tilavuusvirran muuttuessa muuttuu myös puhaltimen kierrosluku. Puhallinohjelmasta oli havaittavissa se, että kierrosluku pienenee, kun ilmavirta suurenee tuottokäyrällä ja vastaavasti kierrosluku suurenee, kun ilmavirta pienenee valitulla tuottokäyrällä.

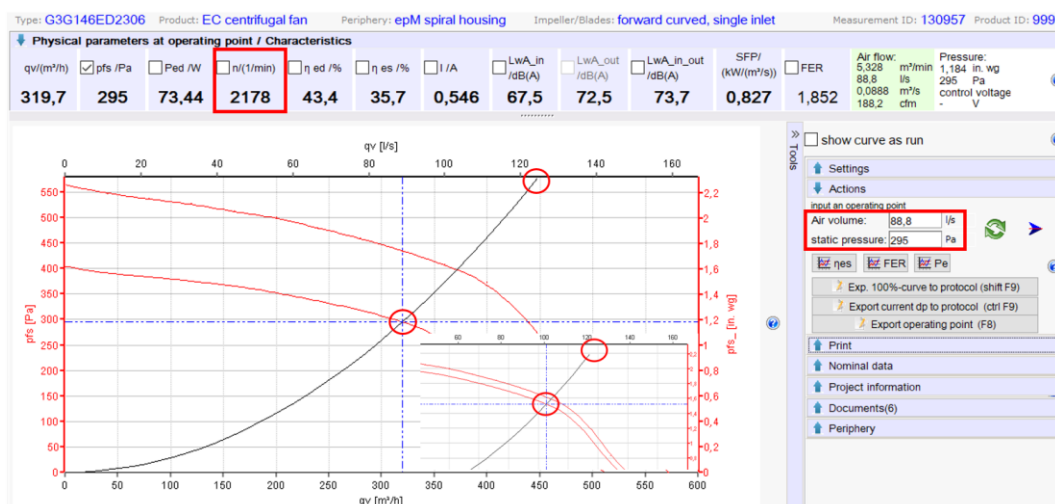
Havaintojen perusteella saatiin kuvien 24 ja 25 mukaisella tuottokäyrällä ohjausjännitteen 11,35 V mitattujen ilman tilavuusvirtojen kokonaispaineenkorotus ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamista varten, kun haettiin muut ilman tilavuusvirran mittauspisteet samalta ohjausjännitteen tuottokäyrältä.

Muut puhaltimen ohjausjännitteet ja niiden tuottokäyrät saatiin haettua, kun tunnetaan kuvissa 24 ja 25 näkyvä painehäviön suuruutta kuvaava laitoskäyrä. Tämä laitoskäyrä on esitetty tummana paraabelin puolikkaana, jonka kokonaispaineenkorotuksentarve kasvaa ilman tilavuusvirtojen suhteen neliöön puhallinlakien mukaan. Tällä laitoskäyrällä kierrosluku pienenee puoleen puhallinlakien mukaisesti, kun ilman tilavuusvirta puolittuu. Lisäksi, kun kierrosluku pienenee puoleen samalla laitoskäyrällä, niin pienenee myös puhaltimen ohjausjännite puoleen puhallinlakien mukaisesti.

Kun tunnettiin puhallinlaeista aiheutuvat seikat, voitiin muiden ohjausjännitteiden tuottokäyrät hakea kuvissa 24 ja 25 esitetyn laitoskäyrän avulla siten, että siirrytään laitoskäyrää pitkin seuraavalle ohjausjännitteelle.

Kuvien 24 ja 25 toimintapisteessä puhaltimen kierrosluku on 2472 1/min ja ohjausjännite on 11,35 V. Esimerkiksi 10,0 V ohjausjännitteellä ilman tilavuusvirran mittauss-

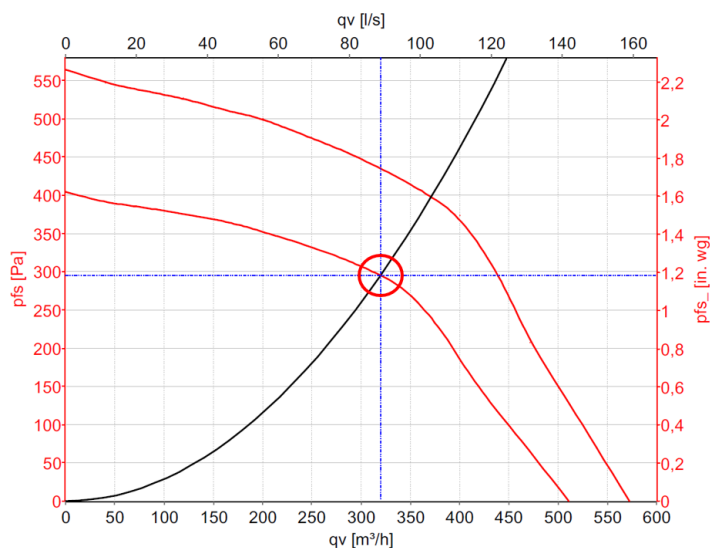
pisteiden toimintapisteet voitiin hakea, kun siirrytään 10,0 V ohjaujännitteen tuotto-
käyrälle kuvissa 24 ja 25 esitettyä laitoskäyrää pitkin kertomalla ohjaujännitteiden
suhteella kierrosluku 11,35 V tuottokäyrällä. Näin kierrosluku 10,0 V ohjaujännit-
teellä on $10,0 \text{ V} / 11,35 \text{ V} * 2472 \text{ 1/min} = 2178 \text{ 1/min}$, kun pysytään samalla laitos-
käyrällä (Kuva 26).



Kuva 26. Puhaltimen kierrosluvun pientyminen samalla laitoskäyrällä puhallinlakien mukaisesti.

Kuvan 26 oikeassa alanurkassa on otos kuvan 24 toimintapisteestä. Kuvan 26 toimin-
tapisteestä nähdään, että laitoskäyrä kulkee edelleen saman punaisella ympyrällä mer-
kityn leikkauspisteen kautta. Kuvan 26 mukaisen toimintapisteiden tulosteesta, saatiin
puhaltimen kokonaispaineenkorotukseksi 359 Pa (kuva 27).

qv	m³/h	319,7
qv	l/s	88,8
pfs	Pa	295
Pf	Pa	359
n	min⁻¹	2178
P _{ed}	W	73,44
SFP	kW/(m³/s)	0,827
η _{ed}	%	43,4
η _{es}	%	35,7
I	A	0,546
L _{wA} (A,in)	dB(A)	67,5
L _{wA} (A,out)	dB(A)	72,5(1)
L _{wA} (A,in+out)	dB(A)	73,7(1)
U _{control}	V	-
Settings		
ρ _{calculated to}	kg/m³	1,2
ρ _{measured at}	kg/m³	1,16

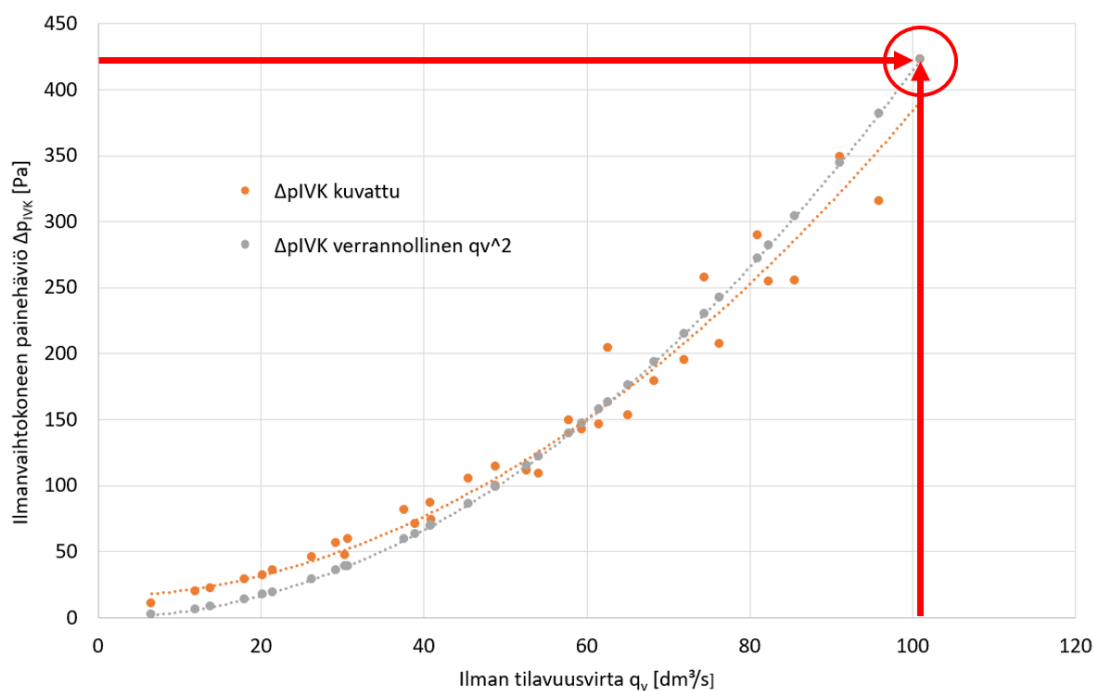


Kuva 27. Puhaltimen kokonaispaineenkorotus ohjaujännitteellä 10,0 V, kun pysytään samalla laitos-
käyrällä.

Kuvasta 27 voidaan todeta, että myös kokonaispaineenkorotus on muuttunut puhallinlakien mukaisesti ilman tilavuusvirtojen suhteen neliöön. Näin voitiin hakea kaikki mitatut 10,0 V ohjausjännitteen toimintapisteet ja näissä aiheutuva ilmanvaihtokoneen painehäviö, kun pysytään ohjausjännitteen tuottokäyrällä.

Samaa menetelmää käytettiin kaikilla ohjausjännitteillä ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamiseksi puhaltimen toimintapisteissä mitatuilla ilman tilavuusvirroilla. Koneen painehäviö mittauspisteessä saatiin, kun vähennettiin toimintapisteen kokonaispaineenkorotuksesta mitattu kanavistopainehäviön keskiarvo.

Kun tarkastellaan ilmanvaihtojärjestelmän tai sen osan käyttäytymistä erilaisilla ilman tilavuusvirroilla, käytetään yksinkertaistusta, jossa painehäviöt yksinkertaistetaan verrannolliseksi ilman tilavuusvirran neliöön. (Sandberg 2014, osa 2, 105). Kuvassa 28 on esitetty oransseilla pisteillä puhallinohjelman avulla kuvatut kokonaispaineenkorotukset, joista on vähennetty mitattu kanavistopainehäviön keskiarvo ja näin saatu koneen painehäviö. Lisäksi kuvassa 28 on esitetty harmaana laitoskäyränä koneen painehäviö verrannollisena ilman tilavuusvirran neliöön. Harmaan laitoskäyrän lähtöpisteeksi määritettiin koneen painehäviön kuvaamiseksi valittu lähtöpiste 101 dm³/s koneen painehäviöllä 423 Pa.



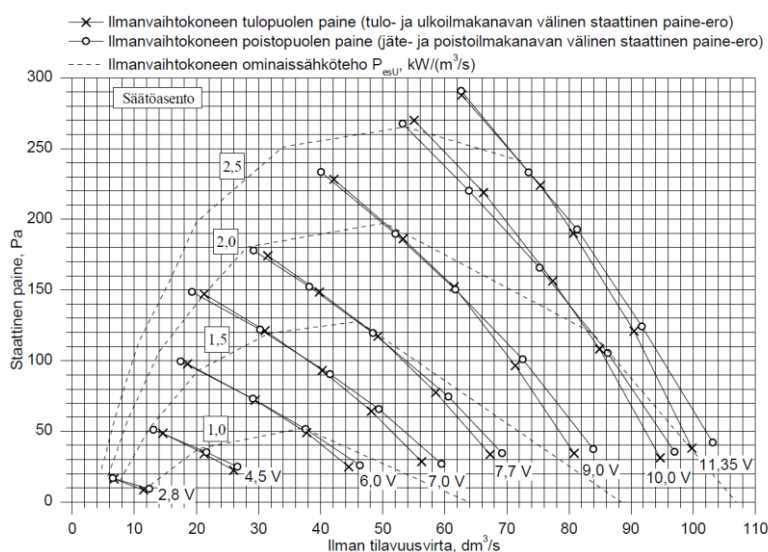
Kuva 28. Kuvattu ilmanvaihtokoneen aiheuttama painehäviö.

Kuvasta 28 selviää puhallinohjelman avulla kuvatun ilmanvaihtokoneen painehäviön vastaavan hyvin harmaata laitoskäyrää, kun tarkastellaan trendikäyriä. Eroavuutta on havaittavissa pienillä ja suurilla ilman tilavuusvirroilla.

Kuvassa 28 näkyvän kuvatun ilmanvaihtokoneen painehäviön laitoskäyrän perusteella todettiin, että painehäviöt eivät aivan ole verrannollisia ilman tilavuusvirran neliöön. Tähän vaikuttaa suodattimien ja mahdollisesti myös lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen painehäviön käyttäytyminen. Kuvattu laitoskäyrä korjattiin kulkemaan origon kautta. Lisäksi ilman tilavuusvirran ollessa $0 \text{ dm}^3/\text{s}$, niin täytyy painehäviönkin olla 0 Pa , koska ilman virtausta ei voi aiheutua painehäviötä.

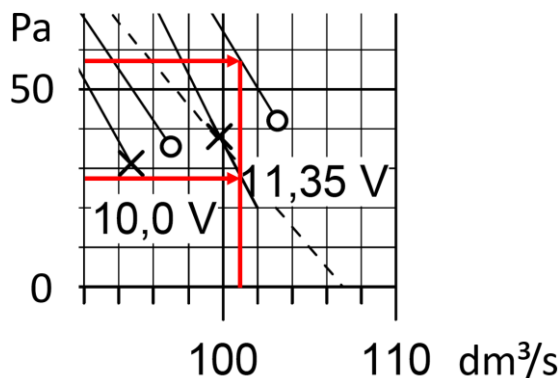
Kuvasta 28 todettiin myös se, että suuremmilla ilman tilavuusvirroilla kuvatuissa ilmanvaihtokoneen painehäviön lukuarvoissa on suurta hajontaa. Tässä oli muistettava se, että koneen painehäviön kuvaamisen lähtökohdaksi otettiin tulo- ja poistoilman tilavuusvirtojen, sekä kanavistopainehäviöiden keskiarvot. Tästä voitiin päätellä, että hajonta kuvaa koneen painehäviötä tulo- ja poistoilmapuolella ilman tilavuusvirran ollessa suuri.

Lähtötietoina olleessa virtausteknisestä kuvaajasta voitiin havaita se, että koneen painehäviö on tulopuolella suurella ilman tilavuusvirralla poistupuolta suurempi. Tämä voidaan havaita kuvasta 29, kun tarkastellaan suurella ilman tilavuusvirralla tulo- ja poistupuolen kykyä tuottaa kanavistopainehäviöihin käytettävää painetta.



Kuva 29. Tulo- ja poistoilmapuhaltimen suorituskyvyn lähtötiedot.

Kun otetaan kuvasta 29 tarkempi näkymä, voidaan tarkastella ilman tilavuusvirralla $101 \text{ dm}^3/\text{s}$ tulo- ja poistopuolen tuottamaa kanavistopainehäviöihin käytettävissä olevaa painetta. Kuvassa 30 on esitetty tarkempi näkymä kuvasta 29, jossa tuloilmapuhallin tuottaa tarkastellussa pisteessä 28 Pa painetta kanavistopainehäviöihin ja vastaavasti poistoilmapuhallin 57 Pa .



Kuva 30. Tulo- ja poistoilmapuhaltimen suorituskyky ilman tilavuusvirralla $101 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Työssä käytetyn ilmanvaihtokoneen ilmansuodatus on tehokkaampi tuloilmapuolella. Kanavistoon tuotetun paineen ero tulo- ja poistopuolella selittyyne tuloilmapuolen tehokkaammasta ilmansuodatuksesta, josta aiheutuu suurempi painehäviö kuvan 30 mukaisesti suurilla ilman tilavuusvirroilla.

Ilmanvaihtokoneen painehäviön kuvaamisen lähtökohtana käytettiin ilman tilavuusvirtana $101 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja kanavistopainehäviönä 40 Pa sekä tällöin koneen painehäviöksi kuvattiin 423 Pa kokonaispaineenkorotuksen ollessa 463 Pa . Kuvan 30 mukaisesti ilman tilavuusvirralla $101 \text{ dm}^3/\text{s}$ poistopuolella kanavistopainehäviöihin on käytettävissä 57 Pa ja vastaavasti tulopuolella 28 Pa . Näin ollen poistopuolella koneen painehäviöksi kuvattiin ilman tilavuusvirralla $101 \text{ dm}^3/\text{s}$ $463 - 57 = 406 \text{ Pa}$ ja tulopuolella vastaavasti $463 - 28 = 435 \text{ Pa}$.

Ilmanvaihtokoneen painehäviö voitiin mallintaa ilman tilavuusvirran funktiona, kun huomioitiin yllä esitetyt ilman tilavuusvirran suuruudesta riippuvat seikat. Mallinnuksen lähtökohdaksi päätettiin tulo- ja poistopuolella yllä esitetty painehäviön suuruus ilman tilavuusvirralla $101 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Kun tarkastellaan ilmanvaihtojärjestelmän tai sen osan käyttäytymistä erilaisilla ilman tilavuusvirroilla, käytetään yksinkertaistusta, jossa painehäviöt yksinkertaistetaan verrannolliseksi ilman tilavuusvirran neliöön (Sandberg 2014, osa 2, 105). Ilmanvaihtokoneen painehäviö mallinnettiin tulo- ja poistopuolelle ilmanvaihtokoneen painehäviön laitoskäyrän avulla (Kaava 7).

$$k_{\text{laitos,IVK}} = \frac{\Delta p_{\text{laitos,IVK}}}{q_v^2} \quad (7)$$

$k_{\text{laitos,IVK}}$ = ilmanvaihtokoneen painehäviön laitoskäyrän k-kerroin,
Pa/(dm³/s)²

$\Delta p_{\text{laitos,IVK}}$ = ilmanvaihtokoneen painehäviö, Pa

q_v = ilman tilavuusvirta, dm³/s

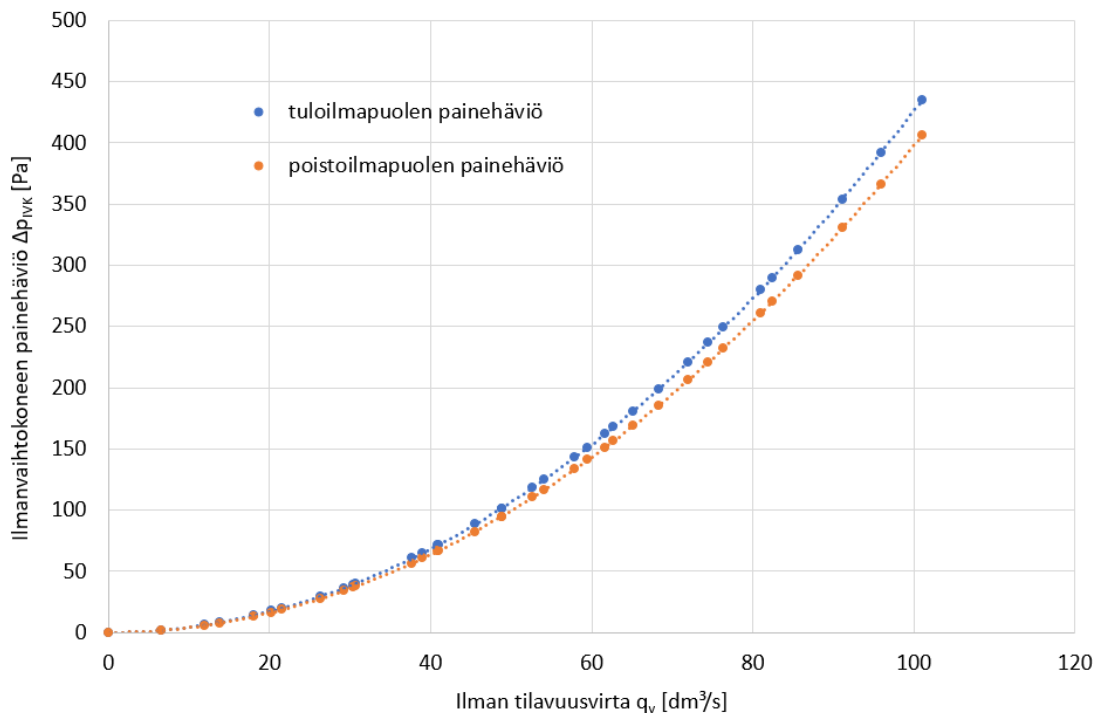
Kaavan 7 avulla saadaan ilmanvaihtokoneen tuloilmapuolen painehäviön laitoskäyrän k-kertoimeksi

$$k_{\text{laitos,IVK,tulo}} = \frac{\Delta p_{\text{laitos,IVK,tulo}}}{q_v^2} = \frac{435 \text{ Pa}}{\left(101 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}}\right)^2} = 0,043 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$$

Vastaavasti ilmanvaihtokoneen poistoilmapuolen painehäviön laitoskäyrän k-kertoimeksi saadaan

$$k_{\text{laitos,IVK,poisto}} = \frac{\Delta p_{\text{laitos,IVK,poisto}}}{q_v^2} = \frac{406 \text{ Pa}}{\left(101 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}}\right)^2} = 0,040 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$$

Kuvassa 31 on esitetty yllä lasketun tulo- ja poistopuolen k-kertoimen avulla mallinnettu ilmanvaihtokoneen painehäviö. Kuvassa 31 oleva sininen laitoskäyrä kuvaa tulo- ja poistopuolella aiheutuvaa painehäviötä ja vastaavasti oranssi laitoskäyrä poistopuolella aiheutuvaa painehäviötä.



Kuva 31. Mallinnettu ilmanvaihtokoneen painehäviö tulo- ja poistopuolella.

4.1.2 Puhaltimen kokonaishyötysuhde

Ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmapuhaltimen sähköverkosta ottaman tehon selvittämiseksi tarvitaan puhaltimen kokonaispaineenkorotuksen lisäksi puhaltimen kokonaishyötysuhde. Kokonaishyötysuhteeksi saadaan kaavaa 6 hyödyntäen (Kaava 8).

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{q_v * p_F}{P_e} \quad (8)$$

η_{kok} = puhaltimen kokonaishyötysuhde, -

q_v = puhaltimen ilman tilavuusvirta, m³/s

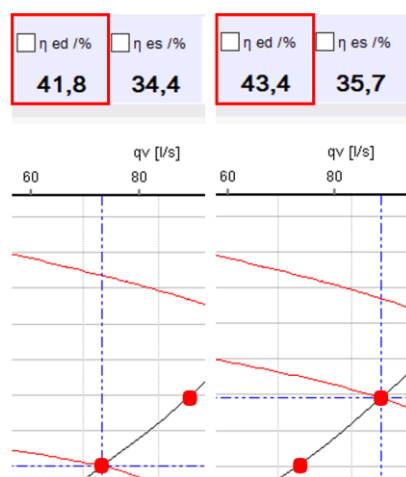
p_F = puhaltimen kokonaispaineenkorotus, Pa

P_e = puhallinmoottorin sähköverkosta ottama teho, W

Kokonaishyötysuhteen määrittämiseksi tunnettiin kaavasta 8 kaikki arvot. Toisaalta sähkötehon osalta tunnettiin tulo- ja poistoilmapuhaltimen sähköverkosta ottama kokonaisteho kaikissa mitatuissa ilman tilavuusvirran ja paineen mittauspisteissä. Näissä

mittauspisteissä voitiin sähkötehon osuus approksimoida tulo- ja poistopuolella, kun tunnettiin mittauspisteissä ilman tilavuusvirrat ja kokonaispaineenkorotukset.

Sähkötehon osuuden approksimoinnissa oli otettava huomioon se, että puhaltimen kokonaishyötysuhde heikentyy, kun laitoskäyrällä ilman tilavuusvirta ja kokonaispaineenkorotus pienenevät. Kuvassa 32 on havainnollistettu punaisella ympyröidyn kokonaishyötysuhteen riippuvuutta puhaltimen toimintapisteestä, kun pysytään samalla laitoskäyrällä. Pienillä ilman tilavuusvirroilla kokonaishyötysuhteen heikentyminen on voimakkaampaa puhallinohjelman avulla tehtyjen havaintojen perusteella.



Kuva 32. Samalla laitoskäyrällä puhaltimen kokonaishyötysuhteen riippuvuus puhaltimen toimintapisteestä.

Kun tunnettiin puhaltimen kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavat seikat, voitiin tulo- ja poistoilmapuhaltimen ottaman sähkötehon osuus approksimoida siten, että sähkötehon, kokonaispaineenkorotuksen ja ilman tilavuusvirran avulla laskettu kokonaishyötysuhde noudattelee kuvassa 32 esitettyä periaatetta. Puhaltimen kokonaishyötysuhde riippuu myös laitoskäyrän jyrkkyydestä, mutta tätä ei otettu sähkötehon approksimoinnissa huomioon, koska samassa mittauspisteessä tulo- ja poistoilmapuhaltimen toimintapisteet olivat aina lähes samat.

Taulukossa 3 on esitetty ohjausjännitteellä 11,35 V mitatun ilman tilavuusvirran q_v ja lasketun puhaltimen kokonaispaineenkorotuksen p_F perusteella approksimoitujen tulo- ja poistoilmapuhaltimen sähkötehojen P_e ja kaavan 8 avulla lasketut kokonaishyötysuhteet η_{kok} .

Taulukossa 3 esitetty kokonaispaineenkorotus p_F saatiin, kun laskettiin yhteen mitattu kanavistopainehäviö p_t ja mallinnettu ilmanvaihtokoneen painehäviö Δp_{IVK} .

Taulukossa 3 oleva $P_{e/2}$ on puolet puhaltimien yhteensä ottamasta sähkötehosta $P_{e,kok}$. Jos molempien puhaltimien kokonaispaineenkorotukset ja ilman tilavuusvirrat olisivat samat, olisivat myös sähkön ottotehot ja kokonaishyötysuhteetkin samat kaavan 8 mukaisesti. Taulukon 3 mittaustuloksista tulo puolen osuus on merkitty punaisella ja poisto puolen osuus keltaisella. Sähkön ottotehon osuus approksimoitiin tulo- ja poistoilmapuhaltimelle siten, että saatiin kokonaishyötysuhteen suuruus vastaamaan sen riippuvuutta ilman tilavuusvirran suuruudesta laitoskäyrällä.

Taulukko 3. Puhaltimien kokonaishyötysuhteen määrittäminen ilmanvaihtokoneen painehäviön mallinuksen ja sähkön ottotehon osuuden approksimoinnin avulla.

mitattu		mitattu	mitattu			APPROKSIM	laskettu		
Vallox SA		ilmavirta	tuloilma	Δp_{IVK}	tuloilma	tuloilma	tuloilma	Vallox	Vallox
[V]		$q_{v,tulo}$	$p_{t,tulo}$	$p_{IVK,tulo}$	$p_{F,tulo}$	$P_{e,tulo}$	$\eta_{kok,tulo}$	$P_{e/2}$	$P_{e,kok}$
		[dm ³ /s]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[W]	[%]	[W]	[W]
11,35		99,8	38	425	463	105,4	43,8		
11,35		90,5	121	349	470	102,0	41,7		
11,35		80,7	190	278	468	96,0	39,3		
11,35		75,4	224	242	466	94,0	37,4		
11,35		62,7	288	168	456	85,0	33,6		

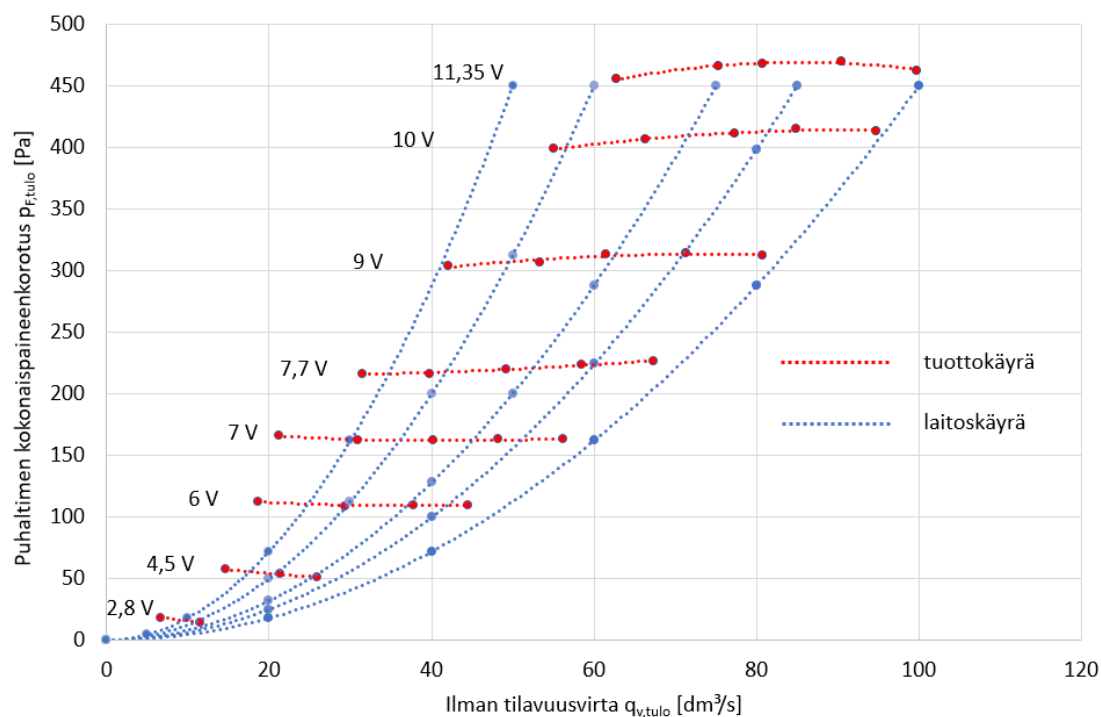
mitattu	mitattu	mitattu			APPROKSIM	laskettu		mitattu	
Vallox SA	ilmavirta	poistoilma	Δp_{IVK}	poistoilma	poistoilma	poistoilma	Vallox	Vallox	
[V]	$q_{v,poisto}$	$p_{t,poisto}$	$p_{IVK,poisto}$	$p_{F,poisto}$	$P_{e,poisto}$	$\eta_{kok,poisto}$	$P_{e/2}$	$P_{e,kok}$	
	[dm ³ /s]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[W]	[%]	[W]	[W]	
11,35	103,0	42	422	464	108,6	44,0	107,0	214,0	
11,35	91,7	124	335	459	101,0	41,6	101,5	203,0	
11,35	81,4	193	264	457	95,0	39,1	95,5	191,0	
11,35	73,5	233	215	448	89,0	37,0	91,5	183,0	
11,35	62,6	291	156	447	83,0	33,7	84,0	168,0	

Tulo- ja poistoilmapuhaltimen sähkön ottotehon suuruus oli approksimoitava kullekin mittauspisteelle jokaisella ohjausjännitteellä taulukon 3 mukaisesti, jolloin saatiin laskettua puhaltimien kokonaishyötysuhde mittauspisteissä.

Tulo- ja poistoilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde oli määritettävä siten, että kokonaishyötysuhteelle saadaan lukuarvo mitoitusohjelmaan syötetyn ilman tilavuusvirran

ja kanavistossa aiheutuvien painehäviöiden perusteella saadussa toimintapisteessä. Tämän vuoksi puhaltimien kokonaishyötysuhde oli mallinnettava yllä esitettyjen periaatteiden mukaisesti siten, että puhaltimen kokonaishyötysuhde on riippuvainen toimintapisteestä, joka on riippuvainen kanavistomitoituksen mukaan määräytyvän ilmanvaihtojärjestelmän painehäviötä kuvaavan laitoskäyrän jyrkkyydestä.

Puhaltimien kokonaishyötysuhteen mallintamisen avuksi oli laadittava tulo- ja poistoilmapuhaltimen mitattujen ohjausjännitteiden kokonaispaineenkorotuksen tuottokäyrät. Samaan kaavioon mallinnettiin jyrkkyydeltään erilaisia painehäviötä kuvaavia laitoskäyriä. Kuvassa 33 on esitetty tuloilmapuhaltimen tuottokäyrät ohjausjännitteillä, joiden kokonaispaineenkorotukset perustuvat ilmanvaihtokoneen mallinnettuun painehäviöön ja mitattuun kanavistopainehäviöön mitatulla ilman tilavuusvirralla.



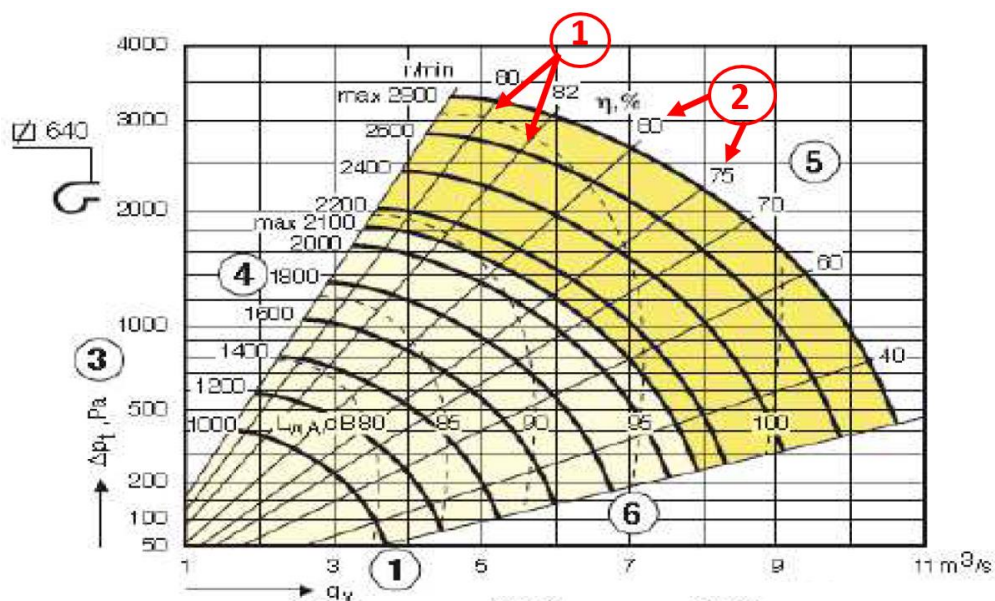
Kuva 33. Tuloilmapuhaltimen tuottokäyrät eri ohjausjännitteillä.

Kuvassa 33 näkyvät laitoskäyrät mallinnettiin kokonaispaineenkorotuksen ollessa verrannollinen ilman tilavuusvirran neliöön. Keskisuuruuksilla puhaltimen ohjausjännitteillä (7 V...7,7 V) pyrittiin saamaan kahden laitoskäyrän väliin puhaltimen toimintapiste, jotka näkyvät kuvassa 33 punaisina pisteinä. Näistä puhaltimen tuottokäyrästä

piirretyistä laitoskäyristä saatiin kustakin k-kerroin, joita hyödynnettiin puhaltimen kokonaishyötysuhteen määrittämisessä.

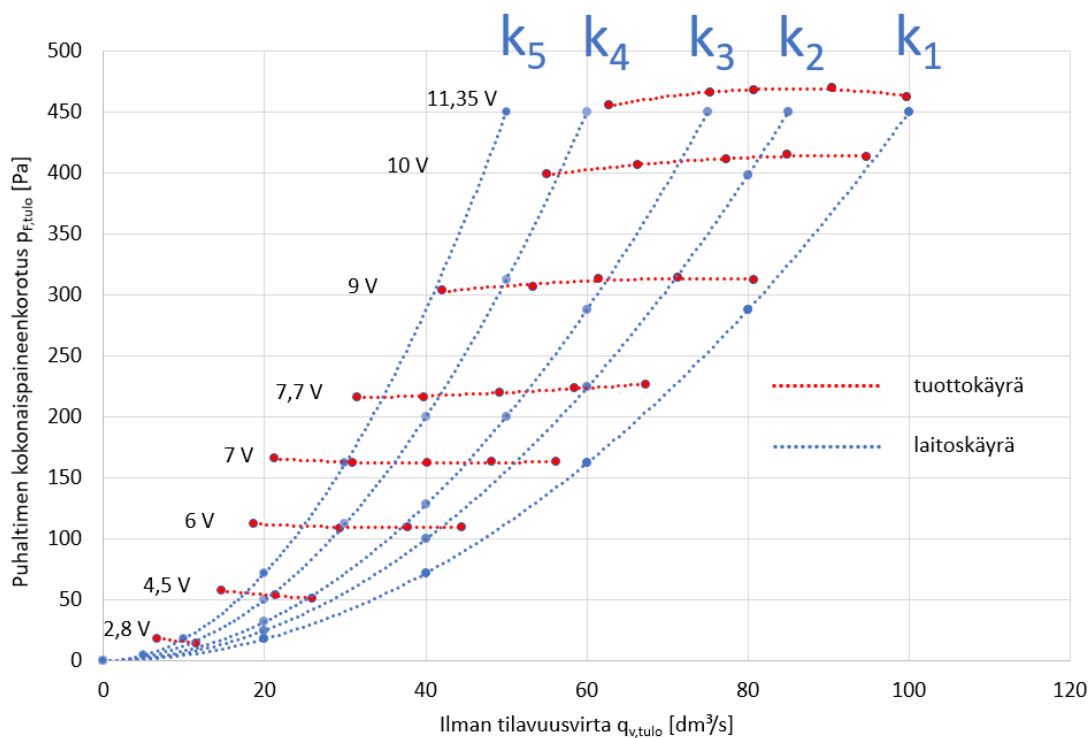
Puhaltimen kokonaishyötysuhde voitiin määrittellä laitoskäyrän k-kertoimen suuruudesta riippuvaiseksi, koska kokonaishyötysuhde on laitoskäyrällä olevan puhaltimen toimintapisteen lisäksi riippuvainen laitoskäyrän jyrkkyydestä.

Kuvassa 34 on havainnollistettu puhaltimen hyötysuhteen riippuvuutta laitoskäyrän jyrkkyydestä LIN - LOG -tuottokäyrästä, josta johtuen laitoskäyrät ovat piirrettynä tuottokäyrästä viuhkamaisesti. Kuvassa 34 numerolla 1 on merkitty laitoskäyrät ja numerolla 2 puhaltimen hyötysuhde. Kuvassa 34 oleva hyötysuhteen optimilaitoskäyrä vaihtelee puhallinkohtaisesti.



Kuva 34. Puhaltimen hyötysuhteen riippuvuus laitoskäyrän jyrkkyydestä (Sandberg 2014, osa 2, 157).

Puhaltimen kokonaishyötysuhteen riippuvuus mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtöarvojen avulla määritetystä laitoskäyrästä määritettiin siten, että kuvassa 33 mallinnettujen laitoskäyrien väliin sekä jyrkimmän ja loivimman laitoskäyrän ulkopuolille valitaan kuvatuissa puhaltimen toimintapistissä jokaisella ohjausjännitteellä vallitsevat puhaltimen lasketut kokonaishyötysuhteet. Kuvassa 33 oleville laitoskäyrille oli laskettava k-kerroin kaavan 7 avulla ja näin voitiin kehittää kokonaishyötysuhteen riippuvuus laitoskäyrän jyrkkyydestä. Kuvassa 35 on havainnollistettu tämä periaate laitoskäyrien k-kertoimien avulla.



Kuva 35. Puhaltimen kokonaishyötysuhteen mallinnukseen tarvittavat laitoskäyrien k-kertoimet.

Kuvassa 35 k-kerroin k_1 kuvaa loivinta laitoskäyrää ja k_5 jyrkintä. Jokaiselle laitoskäyrävälille k_2 ja k_1 , k_3 ja k_2 ja niin edelleen sekä loivimman ja jyrkimmän laitoskäyrän ulkopuolelle valittiin lasketut kokonaishyötysuhteet puhaltimen toimintapisteessä jokaisella ohjausjännitteellä ja laadittiin näistä taulukot.

Taulukossa 4 on kuvattu tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen mallinnukseen tarvittava taulukko, kun mitoitusohjelmaan syötettyjen tietojen perusteella laskettu tuloilmapuolen laitoskäyrän k-kerroin on suurempi, kuin 0,1250 (k_4) ja pienempi, kuin 0,1800 (k_5). Mitoitusohjelmaan syötetyn ilman tilavuusvirran avulla määritetty automaattisesti ilmanvaihtokoneen painehäviö aikaisemman mallinnuksen mukaisesti, joka sisältyy laitoskäyrän k-kertoimen määrittämiseen, koska laitoskäyrä määriteltiin tässä tapauksessa puhaltimen kokonaispaineenkorotuksen perusteella.

Taulukossa 4 on esitetty myös tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen mallinnuksen tulos laitoskäyrävälillä k_5 ja k_4 , joka käsitellään myöhemmin.

Taulukko 4. Tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde laitoskäyrävälillä k_5 ja k_4 .

	$k_5 - k_4$		$0,1800 > k_{\text{laitos}} > 0,1250$	
	ilmavirta	tuloilma	mallinnettu	
	$q_{v,tulo}$	$\eta_{\text{kok,tulo}}$	$\eta_{\text{kok,tulo}}$	
SA [V]	[dm ³ /s]	[%]	[%]	
11,35	62,7	33,6	33,8	
10,00	55	33,0	32,4	
9,00	42,1	27,2	27,4	
7,70	39,8	26,5	26,1	
7,00	31	21,4	20,4	
6,00	29,4	18,8	19,2	
4,50	21,3	11,1	12,3	
2,80	11,5	2,8	2,1	
	50		30,9	

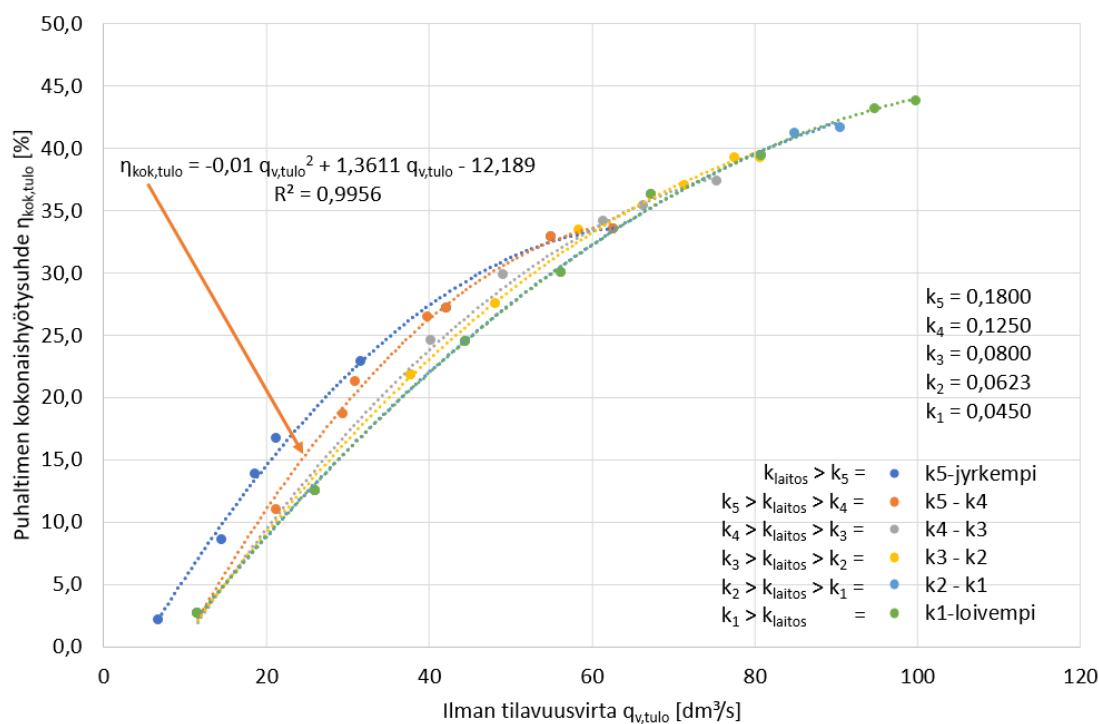
Kullekin laitoskäyrävälille k_n ja k_{n-1} sekä niiden ulkopuolille laadittiin taulukon 4 mukaiset taulukot, joiden avulla voitiin määrittää puhaltimen kokonaishyötysuhteelle kaava kullakin laitoskäyrävälillä ja niiden ulkopuolella. Puhaltimen kokonaishyötysuhteen kaavan määrittämiseksi oli laadittava jokaiselta kokonaishyötysuhteen taulukosta kuvaaja, joka kuvaa kokonaishyötysuhteen riippuvuutta ilman tilavuusvirran suuruudesta, kun puhaltimen toimintapiste on laitoskäyrävälillä k_n ja k_{n-1} sekä uloimpien laitoskäyrien tapauksessa niiden ulkopuolella.

Kuvassa 36 on esitetty tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen riippuvuus ilman tilavuusvirrasta kullakin laitoskäyrävälillä ja niiden ulkopuolella.

Kuvan 36 kokonaishyötysuhteen kuvaajan käyristä k_1 -loivempi kuvaa puhaltimen kokonaishyötysuhteen ilman tilavuusvirran funktiona, kun mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtöarvojen perusteella laskettu tuloilmapuolen laitoskäyrän jyrkkyys on loivinta laitoskäyrää k_1 loivempi. $k_2 - k_1$ puhaltimen kokonaishyötysuhteen kuvaaja kuvassa 36 kuvaa laitoskäyrien k_2 ja k_1 välillä määrittyvää tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhdetta ilman tilavuusvirran funktiona. Muissa laitoskäyräväleissä sekä jyrkimmän laitoskäyrän k_5 ulkopuolella tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde määrittyy vastaavalla tavalla.

Kuvaan 36 on merkitty näkyviin tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen kaava, kun lähtötietojen avulla laskettu tuloilmapuolen laitoskäyrän k -kertoimen arvo on välillä k_5 ja k_4 . Tämän käyrän lähtötiedot esitettiin aiemmin taulukossa 4, josta mitatun

ilman tilavuusvirran ja lasketun kokonaishyötysuhteen avulla on kuvattu $k_5 - k_4$ puhaltimen kokonaishyötysuhteen kuvaaja kuvaan 36. Kuvassa 36 näkyvä korrelaatiokerroin R^2 kuvaa sitä, että miten hyvin kuvaajan kaava kuvaa kuvaajan lähtötietoina olutta arvojoukkoa. Kuvaajan kaava kuvaa lähtötietojen arvojoukon aina sitä paremmin, mitä lähempänä korrelaatiokerroin on arvoa 1.



Kuva 36. Tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde ilman tilavuusvirran ja laitoskäyrän k-kertoimen funktiona.

Kuvassa 36 näkyvillä laitoskäyräväleillä ja uloimpien laitoskäyrien ulkopuolella kuvaajasta saatujen kaavojen avulla voitiin muodostaa tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteelle kaava. Kokonaishyötysuhteen kaavaa varten oli tiedettävä, että puhaltimen tuottokäyrästä olevan loivimman laitoskäyrän k-kerroin on pienin ja jyrkimmän laitoskäyrän k-kerroin on suurin.

Näin voitiin muodostaa kaava siten, että kun lähtötietojen perusteella lasketun laitoskäyrän k-kertoimen arvo on pienempi, kuin puhaltimen tuottokäyrällä olevan loivimman laitoskäyrän k-kertoimen arvo, niin puhaltimen kokonaishyötysuhde määrittyy k_1 -loivemman puhaltimen kokonaishyötysuhteen kaavan avulla. Samaan tapaan määrittyy kokonaishyötysuhteen kaavan valinta loivemmasta kohti jyrkempiä laitoskäyrävälejä.

Alla on esitetty tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen määrittäminen, kun lähtötietojen perusteella laskettu laitoskäyrän k-kertoimen arvo on puhaltimen tuottoikäyrälle piirretyn laitoskäyrän k-kertoimen k_4 arvoa suurempi ja laitoskäyrän k-kertoimen k_5 arvoa pienempi. Kaava määrittyy tällöin kuvassa 36 esitetyn $k_5 - k_4$ laitoskäyrävälän puhaltimen kokonaishyötysuhteen kaavan avulla (Kaava 9).

$$k_5 > k_{\text{laitos,tulo}} > k_4$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{kok,tulo}} = (-0,01 * q_{v,tulo}^2) + (1,3611 * q_{v,tulo}) - 12,189 \quad (9)$$

$\eta_{\text{kok,tulo}}$ = tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhde välillä $k_5 - k_4$, %

$k_{\text{laitos,tulo}}$ = mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtötietojen perusteella määritetty tuloilmapuolen laitoskäyrän k-kerroin, $\text{Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$

k_4 = tuloilmapuhaltimen tuottokäyrästään piirretyn laitoskäyrän k_4 k-kerroin, $\text{Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$

k_5 = tuloilmapuhaltimen tuottokäyrästään piirretyn laitoskäyrän k_5 k-kerroin, $\text{Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$

$q_{v,tulo}$ = tuloilman tilavuusvirta, dm^3/s

Puhaltimen kokonaishyötysuhde lasketaan puhaltimen tuottokäyrästään piirrettyjen laitoskäyrien välillä tai niiden ulkopuolella määrittävän kaavan avulla, jolle mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtöarvojen perusteella lasketun laitoskäyrän k-kertoimen arvo osuu yllä esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Yllä esitetyin menetelmin kehitettiin myös poistoilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteen riippuvuus puhaltimen toimintapisteestä.

4.1.3 Puhaltimien sähkötehtarve

Aiemmin esitettiin ilmanvaihtokoneen painehäviön ja puhaltimien kokonaishyötysuhteen määrittäminen, jotka tarvitaan lähtötiedoiksi sähkötehtarpeen ja -energiankulutuksen määrittämiseksi.

Puhaltimien sähköverkosta ottama sähköteho saadaan laskettua aiemmin esitetyn kaavan 6 avulla, johon lähtötiedoiksi mitoitusohjelman käyttäjä antaa tulo- ja poistoilmapuolten ilman tilavuusvirrat ja kanavistopainehäviöt.

Esimerkiksi kehitystyön lähtötietoina käytetyistä mittaustuloksista tuloilmapuolen ilman tilavuusvirralla $44,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja kanavistopainehäviöillä 25 Pa sekä poistoilmapuolen ilman tilavuusvirralla $46,4 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja kanavistopainehäviöillä 26 Pa saadaan tuloilmapuolella ilmanvaihtokoneen painehäviöksi kaavaa 7 hyödyntäen

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{laitos,IVK,tulo}} &= k_{\text{laitos,IVK,tulo}} * q_{v,\text{tulo}}^2 \\ &= 0,043 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2 * (44,5 \text{ dm}^3/\text{s})^2 = 84 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Vastaavasti ilmanvaihtokoneen poistoilmapuolen painehäviöksi saadaan

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{laitos,IVK,poisto}} &= k_{\text{laitos,IVK,poisto}} * q_v^2 \\ &= 0,040 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2 * (46,4 \text{ dm}^3/\text{s})^2 = 86 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Tulo- ja poistoilmapuolen laitoskäyrien k-kertoimet lasketaan kaavalla 7 puhaltimen kokonaispaineenkorotuksen avulla, joka muodostuu ilmanvaihtokoneen painehäviöstä $\Delta p_{\text{laitos,IVK}}$ ja kanaviston painehäviöistä.

Tuloilmapuolella laitoskäyrän k-kertoimeksi saadaan

$$k_{\text{laitos,tulo}} = \frac{\Delta p_{\text{laitos,tulo}}}{q_{v,\text{tulo}}^2} = \frac{(84 + 25) \text{ Pa}}{(44,5 \text{ dm}^3/\text{s})^2} = 0,055 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$$

Vastaavasti poistoilmapuolella laitoskäyrän k-kertoimeksi saadaan

$$k_{\text{laitos,poisto}} = \frac{\Delta p_{\text{laitos,poisto}}}{q_{v,\text{poisto}}^2} = \frac{(86 + 26) \text{ Pa}}{(46,4 \text{ dm}^3/\text{s})^2} = 0,052 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{s})^2$$

Sekä tulo- että poistoilmapuolella laitoskäyrän k-kertoimen arvon perusteella puhaltimien kokonaishyötysuhteet määrittyvät molempien puhaltimien tuottokäyrästäihin

piirrettyjen laitoskäyrien k_2 ja k_1 välillä määräytyvän puhaltimen kokonaishyötysuhteen kaavalla.

Tuloilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteeksi saadaan vallitsevalla kaavalla

$$k_2 > k_{\text{laitos}} > k_1 \Rightarrow \eta_{\text{kok,tulo}} = (-0,0037 * q_v^2) + (0,8816 * q_v) - 7,2873 \\ = (-0,0037 * (44,5 \text{ dm}^3/\text{s})^2) + (0,8816 * 44,5 \text{ dm}^3/\text{s}) - 7,2873 = 24,6 \%$$

Vastaavasti poistoilmapuhaltimen kokonaishyötysuhteeksi saadaan poistoilmapuolella vallitsevalla kaavalla

$$k_2 > k_{\text{laitos}} > k_1 \Rightarrow \eta_{\text{kok,poisto}} = (-0,0035 * q_v^2) + (0,8584 * q_v) - 7,2416 \\ = (-0,0035 * (46,4 \text{ dm}^3/\text{s})^2) + (0,8584 * 46,4 \text{ dm}^3/\text{s}) - 7,2416 = 25,1 \%$$

Tuloilmapuhaltimen sähkön ottotehoksi saadaan kaavan 6 avulla

$$P_{e,\text{tulo}} = \frac{q_{v,\text{tulo}} * p_{F,\text{tulo}}}{\eta_{\text{kok,tulo}}} = \frac{0,0445 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * (84 + 25) \text{ Pa}}{\frac{24,6}{100}} = 20 \text{ W}$$

Vastaavasti poistoilmapuhaltimen sähkön ottotehoksi saadaan

$$P_{e,\text{poisto}} = \frac{q_{v,\text{poisto}} * p_{F,\text{poisto}}}{\eta_{\text{kok,poisto}}} = \frac{0,0464 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * (86 + 26) \text{ Pa}}{\frac{25,1}{100}} = 21 \text{ W}$$

Mitoitusohjelman avulla esitetään ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, joka saadaan aikaisemmin esitetyn kaavan 5 avulla

$$\text{SFP} = \frac{P_{e,\text{tulo}} + P_{e,\text{poisto}}}{q_{v,\text{max}}} = \frac{(0,020 \text{ kW} + 0,021 \text{ kW})}{0,0464 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 0,88 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$$

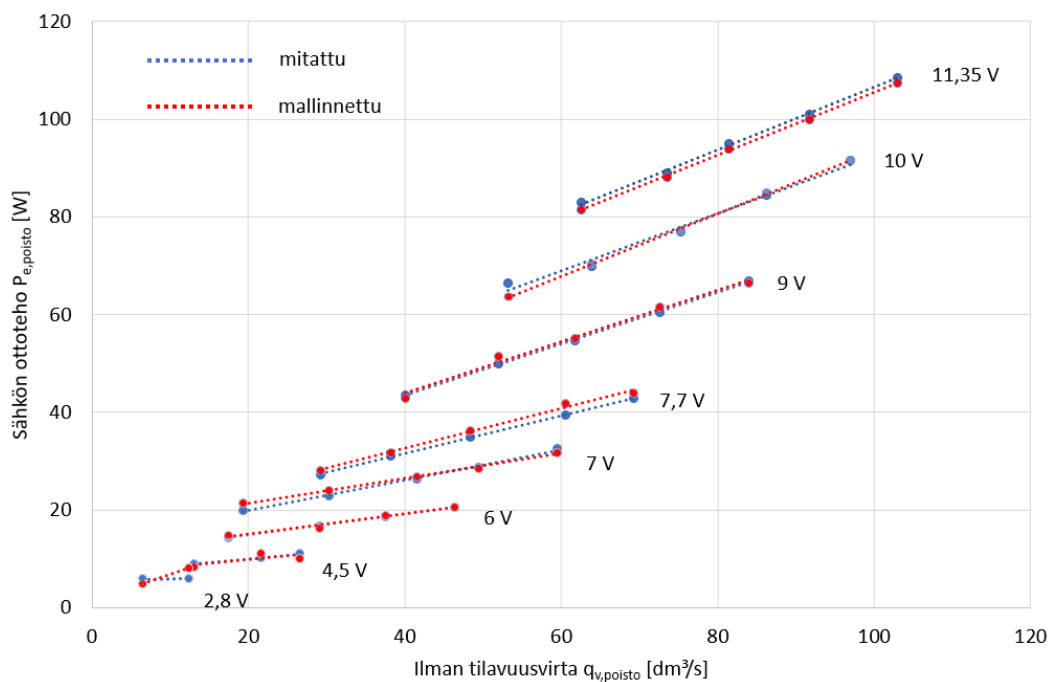
Ilman kuljettamiseen tarvittavan sähkötehon osalta laskentataulukon laskennan toimivuus voitiin tarkistaa lähtötietoina olleiden mittaustuloksien avulla, jotka ovat esitetty

esimerkkilaskelman osalta taulukossa 5 punaisena ympyröitynä. Taulukossa 5 q_{V2} kuvaa tuloilman tilavuusvirtaa ja p_{tUs} on tuloilmapuolen kanavistopainehäviö, sekä q_{V3} kuvaa poistoilman tilavuusvirtaa ja p_{tUe} on poistoilmapuolen kanavistopainehäviö. Lisäksi taulukossa 5 oleva P_e on ilmanvaihtokoneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho ja P_{esU} on ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho.

Taulukko 5. Puhaltimien sähkön ottotehon esimerkkilaskelman lähtötiedot.

Suure	Yksikkö	1	2	3	4
SA	V	6,0	6,0	6,0	6,0
q_{V2}	dm ³ /s	44,5	37,8	29,4	18,6
p_{tUs}	Pa	24,9	49,1	72,2	97,7
q_{V3}	dm ³ /s	46,4	37,6	29,1	17,5
p_{tUe}	Pa	25,9	51,7	73,0	99,5
P_e	W	40,8	37,6	33,9	29,4
P_{esU}	kW/(m ³ /s)	0,9	1,0	1,2	1,7

Laskennan toimivuuden selvittämiseksi laadittiin tulo- ja poistoilmapuhaltimen osalta kuvaajat, joissa on esitetty puhaltimen ottama sähköteho eri ohjaujännitteillä mittausten ja mallinnuksen osalta ilman tilavuusvirran funktiona. Kuvassa 37 on esitetty sähkönottotehon kuvaaja poistoilmapuhaltimen osalta, jossa vaaka-akselilla on ilman tilavuusvirta ja pystyakselilla sähkön ottoteho. Kuvassa 37 olevat punaiset tulokset kuvaavat mallinnettua sähkön ottotehoa ja siniset tulokset mitattua sähkön ottotehoa.



Kuva 37. Mallinnettu ja mitattu poistoilmapuhaltimen sähkön ottoteho.

4.1.4 Puhaltimien sähköenergiankulutus

Mitoitusohjelman avulla on tarkoitus esittää ilmanvaihtokoneen puhaltimien vuotuinen sähköenergiankulutus. Sähköenergiankulutuksen laskennassa oletetaan, että ilmanvaihtokonetta käytetään jatkuvasti.

Puhaltimien sähköenergiankulutus saadaan, kun kerrotaan tulo- ja poistoilmapuhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama teho koko vuoden tuntien määrällä (Kaava 10).

$$W_{iv} = P_e * \Delta\tau_a \quad (10)$$

W_{iv} = ilmanvaihtokoneen puhaltimien vuotuinen sähköenergiankulutus,
kWh/a

P_e = ilmanvaihtokoneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho, kW

$\Delta\tau_a$ = tuntien lukumäärä vuodessa, h/a

Kaavan 10 avulla ilmanvaihtokoneen vuotuiseksi sähköenergiankulutukseksi saadaan yllä esitetystä esimerkkitapauksessa puhaltimien osalta

$$W_{iv} = P_e * \Delta\tau_a = \frac{(20 + 21) \text{ W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} * 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} = 359 \text{ kWh/a}$$

Mitoitusohjelma laskee sähköenergiankulutuksen vain asunnon peruskäyttötilanteen mitoitus tietojen perusteella, jos muiden käyttötilanteiden mitoitus tietoja ilman tilavuusvirran ja kanavistopainehäviön osalta ei syötetä mitoitusohjelmaan.

Muissa käyttötilanteissa puhaltimien sähköverkosta ottama sähköteho mallinnetaan ja lasketaan samaan tapaan, kuten asunnon peruskäyttötilanteessa. Muille käyttötilanteille on syötettävä mitoitus tietojen lisäksi vuorokautinen keskimääräinen käyttöaika, jolloin saadaan päivittäisten käyttöaikojen perusteella laskettua puhaltimien sähköenergiankulutus koko vuoden osalta (Kaava 11).

$$W_{iv} = P_{e1} * \Delta\tau_{a1} + P_{e2} * \Delta\tau_{a2} + P_{e3} * \Delta\tau_{a3} \quad (11)$$

W_{iv} = ilmanvaihtokoneen puhaltimien vuotuinen sähköenergiankulutus, kWh/a

P_{e1} = ilmanvaihtokoneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho ”poissa” -käyttötilanteessa, kW

$\Delta\tau_{a1}$ = ”poissa” -käyttötilanteen tuntien lukumäärä vuodessa, h/a

P_{e2} = ilmanvaihtokoneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho ”kotona” -käyttötilanteessa, kW

$\Delta\tau_{a2}$ = ”kotona” -käyttötilanteen tuntien lukumäärä vuodessa, h/a

P_{e3} = ilmanvaihtokoneen puhaltimien yhteinen sähköverkosta ottama sähköteho ”tehostus” -käyttötilanteessa, kW

$\Delta\tau_{a3}$ = ”tehostus” -käyttötilanteen tuntien lukumäärä vuodessa, h/a

4.2 Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus

Ilmanvaihdon ulkoilmavirran lämmittäminen tarvitsee lämpöenergiaa, josta ilman lämmitysprosessiin syötettävän lämpöenergian osuus riippuu suurelta osin ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton tehokkuudesta ja tyypistä (Sandberg 2014, osa 2, 448).

Tässä työssä kehitettävän teknisen perustan avulla mitoitusohjelman on tarkoitus ilmoittaa ilmanvaihdon lämpöenergiankulutukseen vaikuttavat tekniset suoritusarvot sekä lämpöenergiankulutukseen liittyvät laskentatulokset vuositasolla. Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskennassa ei huomioida asuntoon kohdistuvia lämpökuormia ja asunnon sisäilman lämpötila oletetaan pysyvän vakiona.

Poistoilman kosteus ja ulkoilman lämpötila vaikuttavat ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton toimintaan ja tehokkuuteen. Poistoilmasta tiivistyy kosteutta lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen pinnoille, kun ulkoilman lämpötila on riittävän matala ja kun lämmönsiirtimen pintalämpötila laskee pakkasen puolelle, lämmönsiirtimen pintaan alkaa syntyä huurretta (Sandberg 2014, osa 1, 159).

Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen jäätyssuojausautomaatiikan toimintaperiaate selvitettiin ennen laskentamallien kehittämistä koneen lämpötekniisten suoritusarvojen mittausraportista. Mittausraportista selvisi, että koneen lämmönsiirtimen jäätyssuojausautomaatiikka toimii lämpötilamittausten perusteella rajoittaen jäteilmän lämpötilan $-5,4\text{ °C}$:seen ohittamalla tuloilmavirtaa lämmönsiirtimen ohitse. Lisäksi lämmönsiirtimen huurteensulatuksen aikana lämmönsiirrin ohitetaan tuloilmapuolelta. Jäätyssuojausautomaatiikka pyrittiin ottamaan kohtuudella huomioon ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskentamalleissa.

4.2.1 Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde lasketaan mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtöarvojen perusteella. Mitoitusohjelman ilmoittama ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskenta-arvo on sellaisenaan käytettävissä rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittamisessa.

Ilmanvaihdon lämpöhäviötä rajoitetaan hyvän energiatehokkuuden saavuttamiseksi. Rakennuksen lämpöhäviö saa olla enintään yhtä suuri kuin vertailuarvoilla rakennukselle määritetty vertailulämpöhäviö. (Suomen RakMK D3 2012, 12.)

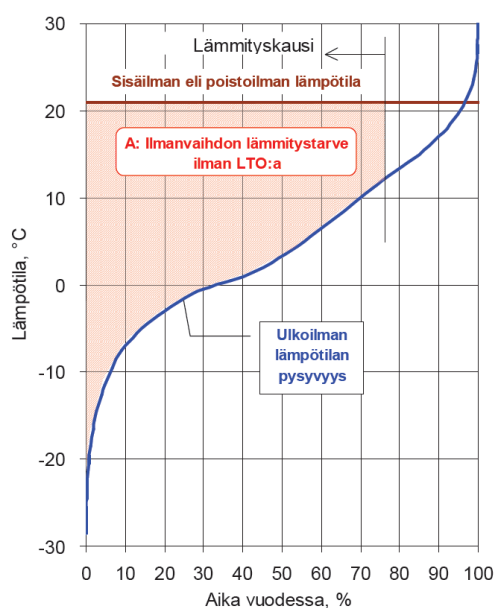
Nykyisin (2017) vertailuarvona vertailulämpöhäviön laskennassa poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteelle käytetään määrättyä arvoa 45 % (Suomen RakMK D3 2012, 15). Vertailuarvo tulee muuttumaan vuoden 2017 ja 2018 vaihteessa voimaan astuvan lähes nollaenergiarakentamista säätelevän energiatehokkuusasetuksen vuoksi. Asetuksessa vertailulämpöhäviön vertailuarvoksi on annettu 55 % (Luonnos YMa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 2017, 26 §).

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskenta perustuu tässä kehitystyössä Ympäristöministeriön toimeksiannosta vuonna 2011 laadittuun ta-sauslaskentaopas 2012 liitteen 4 menetelmään ja kaavoihin.

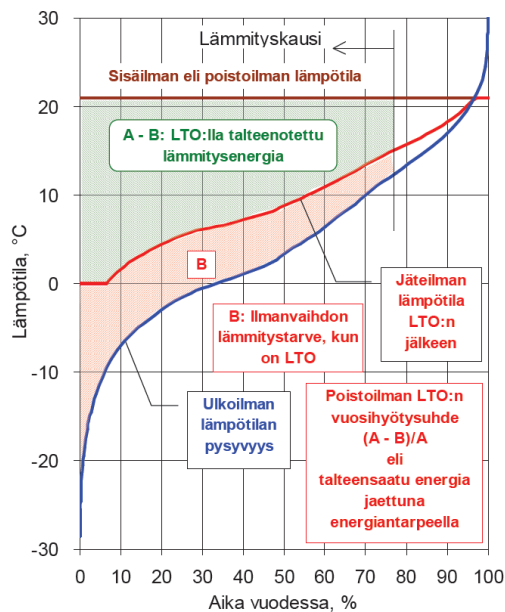
Ilmanvaihdon lämmitystarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa on havainnollistettu kuvassa 38 ja ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on havainnollistettu kuvassa 39.

Vuosihyötysuhde η_a on lämmöntalteenottolaitteistolla vuodessa talteenotettavan ja hyödynnettävän lämpöenergian (A-B) suhde ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaan lämpöenergiaan (A), kun lämmöntalteenottoa ei ole. B on ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema lämpöenergia, kun lämmöntalteenotto on. (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 28.)

Kuvan 38 mukaan huomioitavana nähdään pinta-alasta A se, että ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema lämpöenergian määrä lasketaan vuosihyötysuhdetta laskettaessa lämmityskaudella, eli silloin, kun ulkoilman lämpötila on alle 12 °C.



Kuva 38. Ilmanvaihdon lämmitystarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 28).



Kuva 39. Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 28).

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennassa on otettava huomioon tulo- ja poistoilmavirtojen suhde, lämmöntalteenoton jäätymissuojauksen toiminta sekä mahdollinen tuloilman lämpötilan rajoittaminen (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 28). Näistä Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ominaisuuksia ovat lämmöntalteenoton jäätymissuojaus, joka toimii mittausraportin mukaan rajoittamalla jäteilman minimilämpötilan $-5,4\text{ °C}$:seen ohittaen tuloilmavirtaa tarpeen mukaan lämmöntalteenoton ohitse. Lisäksi Vallox 096 MC -koneessa tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta lämmityskaudella (ulkoilman lämpötila $< 12\text{ °C}$) lämmöntalteenoton heikentämiseksi (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 3).

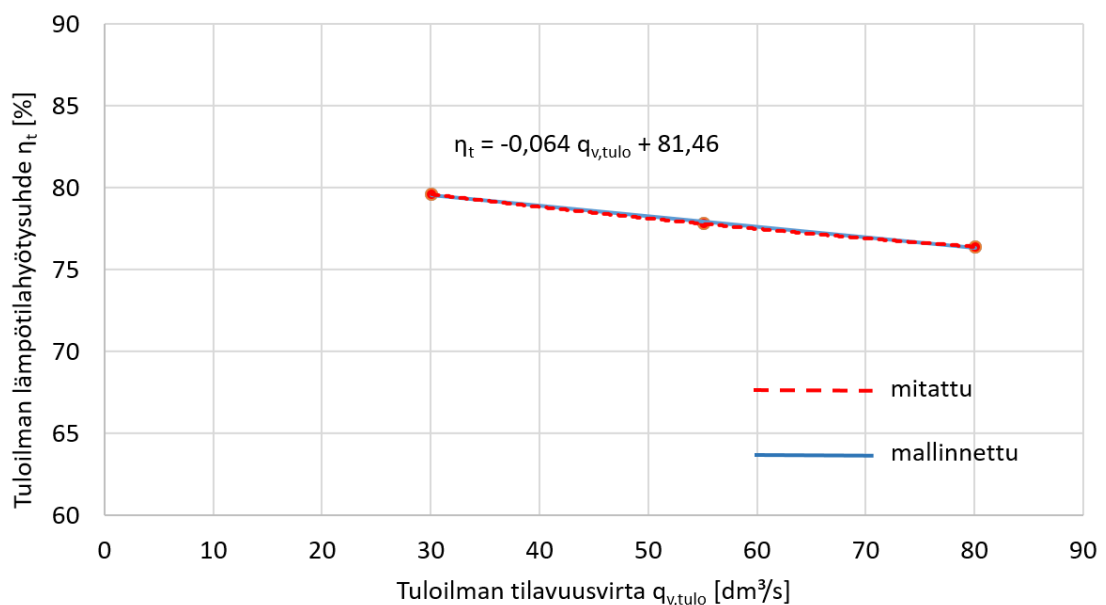
Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskentamalliin tarvittiin mittaustulosten perusteella ilmoitettu lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen tuloilman lämpötilahyötysuhde η_t , joka on ilmoitettu tulo- ja poistoilmavirtojen massavirtojen ollessa yhtä suuret (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 41).

Kuvassa 40 on esitetty punaisella katkoviivalla mitattu tuloilman lämpötilahyötysuhde yhtä suurilla tulo- ja poistoilman massavirroilla. Kuvassa 40 on kuvattu y-akselilla olevan tuloilman lämpötilahyötysuhteen η_t riippuvuus x-akselilla olevaan tuloilmavirran $q_{v,tulo}$ suuruuteen ilman tiheydessä $1,20\text{ kg/m}^3$. Kuvan 40 mittaustuloksista nähdään, että Vallox 096 MC -koneen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen tuloilman

lämpötilahyötysuhde on noin 76...80 % koneen koko ilmavirta-alueella tulo- ja poistoilmavirtojen massavirtojen ollessa yhtä suuret.

Lisäksi kuvassa 40 on esitetty sinisellä viivalla mallinnettu tuloilman lämpötilahyötysuhde. Tuloilman lämpötilahyötysuhde oli mallinnettava, jotta mitoitusohjelmassa on aina käytettävissä riittäväällä tarkkuudella ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen tuloilman lämpötilahyötysuhde ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta ja ilmanvaihdon lämpöenergiankulutusta laskettaessa.

Kuvasta 40 nähdään, että mitatun lämpötilahyötysuhteen riippuvuus muistuttaa hyvin laskevaa suoraa. Tämän vuoksi tuloilman lämpötilahyötysuhteen riippuvuus tuloilman tilavuusvirran suuruudesta voitiin yksinkertaistaa mallinnuksessa lineaarisiksi.



Kuva 40. Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen mitattu ja mallinnettu tuloilman lämpötilahyötysuhde.

Kuvassa 40 olevasta lineaarisesta kuvaajasta saatiin mallinnusta varten tuloilman lämpötilahyötysuhteen riippuvuus tuloilman tilavuusvirrasta ja tälle riippuvuudelle tuloilman tilavuusvirran kulmakertoimeksi kuvan 40 mukaan saatiin -0,064 sekä vakioterminiksi 81,46 (kaava 12).

$$\eta_t = k * q_{v,tulo} + b \quad (12)$$

- η_t = mitattu tuloilman lämpötilahyötysuhde yhtä suurilla tulo- ja poistoilman massavirroilla, %
 k = kulmakerroin, -
 $q_{v,tulo}$ = tuloilman tilavuusvirta, dm^3/s
 b = vakiotermi, -

Näiden vakiona pysyvien termien k ja b avulla voidaan laskea tuloilman lämpötilahyötysuhde tuloilman tilavuusvirrasta riippuvana. Esimerkiksi tuloilman tilavuusvirran ollessa $45 dm^3/s$ saadaan tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi yhtä suurilla tulo- ja poistoilman massavirroilla

$$\eta_t = k * q_{v,tulo} + b = -0,064 * 45 \frac{dm^3}{s} + 81,46 = 78,6 \%$$

Tuloilman lämpötilahyötysuhde on tuloilman lämpenemisen suhde poistoilman ja ulkoilman väliseen lämpötilaerotukseen (Kaava 13). Tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen vaikuttaa lämmöntalteenottolaitteen tyyppin lisäksi tulo- ja poistoilmavirtojen suhde. (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 44.)

$$\eta_t = \frac{(t_{tLTO} - t_u)}{(t_s - t_u)} \quad (13)$$

- η_t = tuloilman lämpötilahyötysuhde, -
 t_{tLTO} = tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C
 t_u = ulkoilman lämpötila, °C
 t_s = sisäilman lämpötila (= poistoilman lämpötila), °C

Tuloilman lämpötilahyötysuhteen lisäksi laskentaan tarvittiin poistoilman lämpötilahyötysuhde, jotta voitiin ottaa laskennassa huomioon aiemmin mainitusta jäteilman lämpötilan rajoittamisesta aiheutuva lämmöntalteenoton heikentäminen (Kaava 14).

$$\eta_p = \frac{(t_s - t_j)}{(t_s - t_u)} \quad (14)$$

- η_p = poistoilman lämpötilahyötysuhde, -
 t_j = jäteilman lämpötila (poistoilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeä), °C
 t_u = ulkoilman lämpötila, °C
 t_s = sisäilman lämpötila (= poistoilman lämpötila), °C

Asuinrakennukset pyritään suunnittelemaan hieman alipaineiseksi, joten tuloilman tilavuusvirta on hieman poistoilman tilavuusvirtaa pienempi. Ilmavirtojen suhteesta aiheutuu se, että tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteet eivät ole yhtä suuret. Ilmavirtojen suhteen vaikutus voidaan laskea, kun tunnetaan tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteiden riippuvuus toisistaan (Kaava 15).

$$\eta_p = \eta_t * R_{LTO} \quad (15)$$

R_{LTO} = tulo- ja poistoilmavirran suhde, -

Suhde R_{LTO} saadaan jakamalla ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilman tilavuusvirta poistoilman tilavuusvirralla (Kaava 16).

$$R_{LTO} = \frac{q_{v,tulo,LTO}}{q_{v,poisto,LTO}} \quad (16)$$

$q_{v,tulo,LTO}$ = lämmöntalteenoton läpi kulkeva tuloilman tilavuusvirta, dm³/s

$q_{v,poisto,LTO}$ = lämmöntalteenoton läpi kulkeva poistoilman tilavuusvirta, dm³/s

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennassa käytetään valmistajan ilmoittamaa mittauksin laskettua tuloilman lämpötilahyötysuhdetta (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 49). Tämä saadaan yhtä suurilla tulo- ja poistoilman tilavuusvirroilla mallinnuksen avulla kaavassa 12 esitetysti, kun ilmojen tiheysero jätetään huomioimatta. Mallinnetun tuloilman lämpötilahyötysuhteen avulla voidaan laskea tuloilman lämpötilahyötysuhde, kun tulo- ja poistoilman tilavuusvirrat ovat erisuuret (Kaava 17).

$$\eta_{t,RLTO} = \frac{2}{(1 + R_{LTO})} * \eta_{t,RLTO=1} \quad (17)$$

$n_{t,RLTO}$ = tuloilman lämpötilahyötysuhde erisuurilla tulo- ja poistoilman tilavuusvirroilla, -

$n_{t,RLTO=1}$ = mallinnettu tuloilman lämpötilahyötysuhde yhtä suurilla tulo- ja poistoilman tilavuusvirroilla, -

Yllä esitettyjen kaavojen avulla voidaan laskea tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteet Vallox 096 -ilmanvaihtokoneen jäätymissuojauksen toiminnalla ottaen huomioon se, että tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta ohittamalla lämmöntalteenottoa ulkolämpötilan ollessa alle 12 °C.

Lasketaan esimerkkinä aiemmin lasketun 45 dm³/s tuloilmavirran tuloilman lämpötilahyötysuhteen avulla määrittyvät lämpötilahyötysuhteet, kun oletetaan R_{LTO} olevan 0,95, jolloin asunto on hieman alipaineinen.

Tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi saadaan kaavan 17 avulla

$$n_{t,RLTO} = \frac{2}{(1 + R_{LTO})} * n_{t,RLTO=1} = \frac{2}{(1 + 0,95)} * 78,6 = 80,6 \%$$

Poistoilman lämpötilahyötysuhteeksi saadaan kaavan 15 avulla

$$\eta_p = \eta_t * R_{LTO} = 80,6 * 0,95 = 76,6 \%$$

Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jäätymissuojaus rajoittaa jäteilman lämpötilan -5,4 °C:seen, joten poistoilman lämpötilahyötysuhteeksi esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa -20 °C saadaan kaavan 14 avulla olettamalla, että sisäilman lämpötila on 21 °C

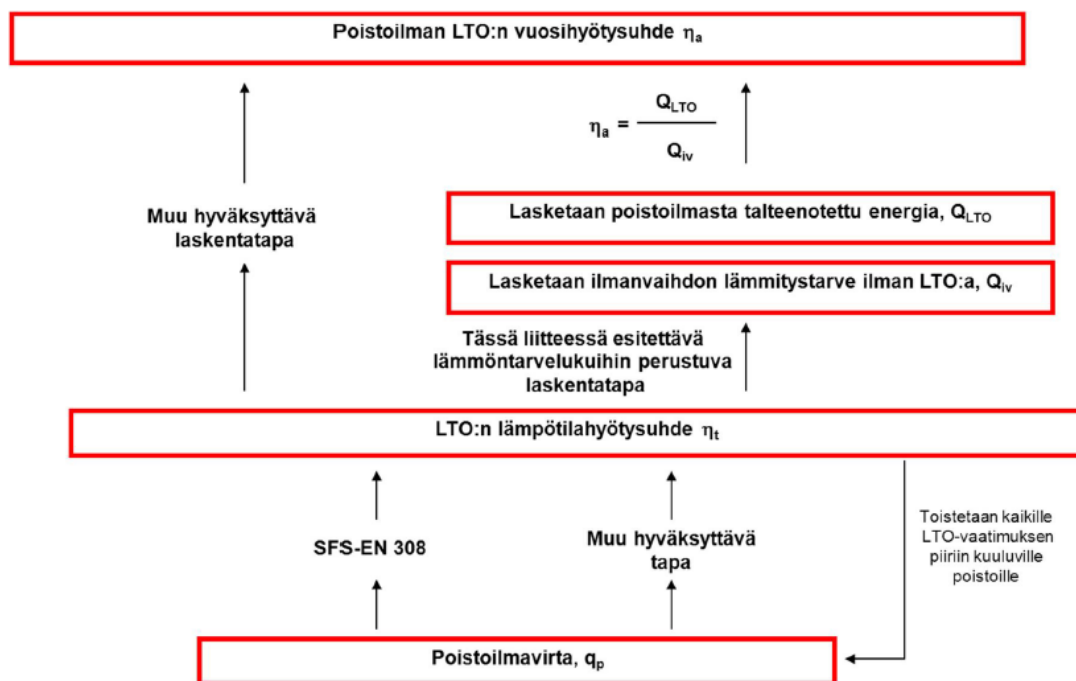
$$\eta_p = \frac{(t_s - t_j)}{(t_s - t_u)} = \frac{(21 \text{ °C} - (-5,4 \text{ °C}))}{(21 \text{ °C} - (-20 \text{ °C}))} = 0,644 = 64,4 \%$$

Tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi saadaan ulkolämpötilan ollessa -20 °C kaavan 15 avulla

$$\eta_p = \eta_t * R_{LTO} \Rightarrow \eta_t = \frac{\eta_p}{R_{LTO}} = \frac{64,4}{0,95} = 67,8\%$$

Kun ulkoilman lämpötila lämpenee kovimmista pakkasista, kasvavat lämpötilahyötysuhteiden arvot, kunnes ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jäätymissuojaus ei enää rajoita jäteilman lämpötilaa. Kun jäätymissuojaus ei enää rajoita jäteilman lämpötilaa, pysyvät tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteet mallinnetun tuloilman lämpötilahyötysuhteen avulla laskettujen lämpötilahyötysuhteiden mukaisissa arvoissa, jos tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta ulkolämpötilan noustessa.

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde η_a lasketaan aiemmin mainittujen laskentaan vaikuttavien lähtöarvojen ja ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottoon vaikuttavien ominaisuuksien avulla. Laskentaperiaate on esitetty kuvassa 41, josta mitoitusohjelma hyödyntää lämmöntarvelukuihin perustuvaa menetelmää.



Kuva 41. Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskentaperiaate (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 42).

Kuvassa 41 oleva ilmanvaihdon lämmitystarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa Q_{iv} (kuvassa 38 oleva pinta-ala A) määritellään ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta määritettäessä asunnon jatkuvaan ilmanvaihtoon kuuluvan poistoilmavirran tarvitsemana lämpöenergiana (Kaava 18).

$$Q_{iv} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,poisto} * \sum (t_s - t_u) * \Delta\tau * \frac{24}{1000} \quad (18)$$

Q_{iv} = ilmanvaihdon lämpöenergiantarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa lämmityskaudella, kWh

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, J/kg*°C

ρ_i = ilman tiheys, kg/m³

$q_{v,poisto}$ = asunnon jatkuvaan ilmanvaihtoon kuuluva poistoilmavirta, m³/s

t_s = sisäilman lämpötila (= poistoilman lämpötila), °C

t_u = ulkoilman lämpötila, °C

$\Delta\tau$ = ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero ($t_s - t_u$) esiintyy, d

$\frac{24}{1000}$ = kerroin, joka muuttaa yksikön W*d muotoon kWh, (h/d)/(W/kW)

Kaavassa 18 oleva poistoilmavirta $q_{v,poisto}$ on asunnon peruskäyttötilanteen mitoituspoistoilmavirta ja ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennassa ei oteta huomioon esimerkiksi hetkellistä liesikuvun käyttämisestä aiheutuvaa ilmavirtojen tehostusta. Kaavan 18 summalausekkeessa oleva lämpötilaeron ja ajanjakson tulo vastaa sisä- ja ulkoilman välistä lämmöntarvelukua S_s ajanjaksolla $\Delta\tau$, joten ottamalla huomioon koko vuoden lämmöntarveluku S_s , saadaan kaava 18 muotoon (Kaava 19).

$$Q_{iv} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,poisto} * S_s * \frac{24}{1000} \quad (19)$$

S_s = sisä- ja ulkoilman lämpötilojen välinen lämmöntarveluku lämmityskaudella, °C*d

Vastaavasti poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia lämmityskaudella Q_{LTO} määritellään useimmiten tuloilman lämmitysenergiana (Kaava 20).

$$Q_{LTO} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,tulo,LTO} * \sum (t_{tLTO} - t_u) * \Delta\tau * \frac{24}{1000} \quad (20)$$

Q_{LTO} = poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia lämmityskaudella, kWh

$q_{v,tulo,LTO}$ = lämmöntalteenoton läpi kulkeva asunnon tuloilmavirta, m³/s

t_{tLTO} = tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C

$\Delta\tau$ = ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero ($t_{tLTO} - t_u$) esiintyy, d

Kaavan 20 summalausekkeessa oleva lämpötilaeron ja ajanjakson tulo vastaa lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman ja ulkoilman välistä lämmöntarvelukua S_T ajanjaksolla $\Delta\tau$, joten ottamalla huomioon koko vuoden lämmöntarveluku S_T , saadaan kaavassa 20 esitetty kaava muotoon (Kaava 21).

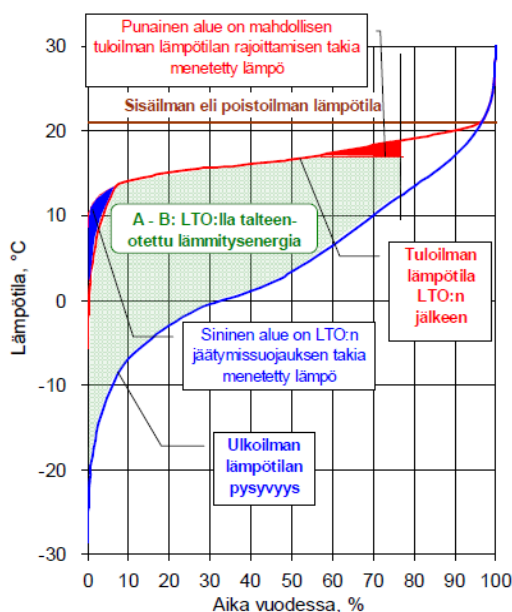
$$Q_{LTO} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,tulo,LTO} * S_T * \frac{24}{1000} \quad (21)$$

S_T = lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman ja ulkoilman lämpötilojen välinen lämmöntarveluku lämmityskaudella, °C*d

Mitoitusohjelma laskee lämmöntarveluvut S_S ja S_T lämmityskaudelle eli, kun ulkolämpötila on alle 12 °C. Näin määritetty ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen arvo on käytettävissä rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittamisessa. (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 61.)

Kuvassa 42 on havainnollistettu poistoilmasta tuloilmaan talteenotettua vuotuista lämpöenergiaa viivoitetulla alueella A-B, joka vastaa lämmöntarvelukua S_T . Kuvassa 42 oleva sininen alue kuvaa lämmöntalteenoton jäätymissuojauksen vuoksi menetettyä lämpöenergiaa, joka toteutetaan Vallox 096 MC -koneella rajoittamalla jäteilman lämpötila -5,4 °C:seen ohittamalla lämmöntalteenotto tarpeen mukaan tuloilmapuolelta.

Kuvassa 42 oleva punainen alue kuvaa menetettyä lämpöenergiaa, joka aiheutuu lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman lämpötilan rajoittamisesta +17 °C:seen. Tästä poiketen Vallox 096 MC -koneella tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta lämmityskaudella (ulkoilman lämpötila < 12 °C) lämmöntalteenoton heikentämiseksi (Vallox 096 MC - ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 3).



Kuva 42. Vuotuinen poistoilmasta tuloilmaan talteenotettu lämpöenergia (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 56).

Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde η_a määritellään poistoilmasta tuloilmaan talteenotetun lämpöenergian Q_{LTO} (Kaava 21) ja asunnon jatkuvaan ilmanvaihtoon kuuluvan poistoilmavirran tarvitseman lämmitysenergian Q_{iv} (Kaava 19) suhteena (Kaava 22).

$$\eta_a = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv}} = \frac{c_{pi} * \rho_i * q_{v,tulo,LTO} * S_T * \frac{24}{1000}}{c_{pi} * \rho_i * q_{v,poisto} * S_S * \frac{24}{1000}} \quad (22)$$

η_a = ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde, -

Koska kertoimet supistuvat sekä tulo- ja poistoilmavirran ominaislämpökapasiteettien ja tiheyksien oletetaan olevan yhtä suuret, saadaan kaava muotoon (Kaava 23).

$$\eta_a = \frac{q_{v,tulo,LTO} * S_T}{q_{v,poisto} * S_S} \quad (23)$$

Mitoitusohjelman avulla voidaan suorittaa lämpöenergiankulutuksen tarkastelu jokaisella Suomen lämpötilavyöhykkeellä TRY2012 testivuoden mukaan. Testivuoden sää-tiedot perustuvat säävyöhykekohtaisesti eri vuosilta kutakin kuukautta edustaviin tyyppikuukausiin, joiden sää-tiedot perustuvat Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittauksiin (Rakennusten energialaskennan testivuodet 2012 2011, 1).

Lämmöntarveluvut S_S ja S_T lasketaan Ilmatieteen laitoksen testivuoden TRY2012 ulkoilman lämpötilojen pysyvyystietojen perusteella (Kaava 24 & 25). Rakennusten lämpöhäviön määräystenmukaisuutta osoittaessa ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskenta suoritetaan säävyöhykkeen I-II (Vantaa) ulkoilman lämpötilatiedoilla. (Tasauslaskentaopas 2012 2011, 58.)

$$S_S = \sum_n (\tau_n - \tau_{n-1}) * (t_s - t_{u,n}) * \frac{365}{100} \quad (24)$$

$$S_T = \sum_n (\tau_n - \tau_{n-1}) * (t_{LTO,n} - t_{u,n}) * \frac{365}{100} \quad (25)$$

S_S = sisä- ja ulkolämpötilan välinen lämmöntarveluku, °C*d

S_T = lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman lämpötilan ja ulkolämpötilan välinen lämmöntarveluku, °C*d

τ_n = tarkasteltavan ajanhetken aika, d

τ_{n-1} = tarkasteltavaa ajanhetkeä edeltävän ajanhetken aika, d

Jos tarkasteltavien ajanhetkien ajat ilmaistaan prosentteina vuodesta, tulee kaavoissa 24 ja 25 esitettyjen kaavojen oikea puoli kertoa kaavoissa esitetysti luvulla 365/100, jotta lämmöntarveluvun yksiköksi tulee °C*d.

Yllä esitetyn ulkolämpötilan pysyvyystietoihin perustuvalla lämpöenergiälaskentamenetelmällä laadittiin laskentataulukko, jonka avulla mitoitusohjelma laskee ilmanvaihi-

don poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen η_a syötettyjen tulo- ja poistoilman tilavuusvirtojen perusteella. Laskenta ottaa huomioon lasketun tulo- ja poistoilmavirtojen suhteen ja tuloilman tilavuusvirran suuruuden vaikutuksen lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen η_t sekä lämmöntalteenoton jäätymissuojauksesta aiheutuvan jäteilman lämpötilan rajoittamisen. Lisäksi huomioon otetaan se, että tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta alle 12 °C ulkoilman lämpötilassa ohittamalla lämmöntalteenottoa tuloilman lämpötilan nousun hillitsemiseksi.

4.2.2 Ilmanvaihdon vuotuinen lämpöenergiankulutus

Yllä esitetty ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskenta perustuu TRY2012 testivuoden ulkolämpötilojen prosentuaalisiin pysyvyystietoihin ulkolämpötiloilla, jotka ovat 12 °C tai tämän alle.

Ilmanvaihdon vuotuista lämpöenergiankulutusta kuvaavan laskennan mitoitusohjelma suorittaa TRY2012 testivuoden tuntitason ulkoilman lämpötiloilla, jossa laskentatuloksista osa perustuu Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5 2012 (myöhemmin D5) ohjeistettuihin lämpöenergiankulutuksen laskentamenetelmiin. Ilmanvaihdon lämpöenergian laskennassa ei oteta huomioon asunnon sisäisiä ja ulkoisia lämpökuormia sekä sisäilman lämpötilan oletetaan pysyvän vakiona 21 °C koko vuoden ajan.

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskennassa ilmanvaihtokoneen toiminnasta otettiin huomioon seuraavat asiat (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 3).

- ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenotto ohitetaan tuloilmapuolelta, kun ulkoilman lämpötila on yli 14 °C
- tuloilmaa ei jälkilämmitetä, kun lämmöntalteenotto ohitetaan ulkoilman lämpötilan ollessa yli 14 °C
- ilmanvaihtokone ottaa poistoilmasta tuloilmaan lämmön talteen, kun ulkoilman lämpötila on alle 12 °C, jolloin tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen voi olla yli asetetun jälkilämmityksen asetusarvon
- talviaikana tuloilma jälkilämmitetään asetettuun asetusarvoon, mikäli asetettua tuloilman asetusarvoa ei ole saavutettu lämmöntalteenoton avulla

- Jälkilämmityspatterin maksimiteho, joka Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen osalta on 900 W (Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje 2017, 8).

Lisäksi laskennassa otettiin huomioon ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen jäätymissuojauksesta aiheutuva jäteilmän lämpötilarajoitus lämpötilaan $-5,4\text{ °C}$. Koneen lämmöntalteenoton jäätymissuojauksesta aiheutuvan jäteilmän lämpötilan rajoittamisen vuoksi ja lämmöntalteenoton huurteensulatuksen aikana tuloilmavirta ohjataan ajoittain tarpeen mukaan lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen ohitse.

Laskennassa ei oteta huomioon huurteensulatuksen aikaista lämmöntalteenoton ohittamista tuloilmapuolelta, jolloin jälkilämmityspatterin on lämmitettävä ulkoilmaa, johon ei ole otettu lämpöä talteen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen avulla. Laskentaa yksinkertaistettiin lämmöntalteenoton huurteensulatuksen osalta, koska lämmönsiirtimeen kertyvän huurteen muodostumisen ja huurteensulatuksen mallintaminen on monimutkaista kohtuullisella tarkkuudella.

Yksinkertaistuksen vuoksi laskennassa lämmöntalteenoton jälkeisen tuloilman lämpötila lasketaan huurteensulatuksen aikana sen aikaisen tuloilman lämpötilahyötysuhteen avulla sen sijaan, että ajoittain tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen olisi sama, kuin ulkoilman lämpötila. Lisäksi yksinkertaistuksen vuoksi huurteensulatuksen aikainen tuloilman lämpötilahyötysuhde heikentyy laskennassa vain silloin, kun ulkoilman lämpötila on riittävän alhainen, jolloin jäteilmän lämpötila rajoittuu $-5,4\text{ °C}$:seen.

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus tulee yllä mainitun yksinkertaistuksen vuoksi olemaan pienempi, kuin se huurteensulatuksen toimintajaksot huomioon ottaen olisi.

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskenta suoritetaan mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtöarvojen perusteella, joista mitoitusohjelman käyttäjän syötettävissä ovat tulo- ja poistoilman tilavuusvirrat sekä tuloilman jälkilämmityksen asetusarvo. Lisäksi käyttäjän on valittava TRY2012 testivuoden mukainen laskentavyöhyke.

Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneella voidaan ohjata ilmanvaihtoa tarpeen mukaisesti joko pienemmälle tai suuremmalle riippuen asunnon käyttäjästä. Normaalitylanteessa asunnon ilmanvaihtoa käytetään yleensä ”kotona” -tilassa, jolloin ilmanvaihto toimii peruskäyttötilanteen mitoitusilmavirroilla. Tästä voidaan poiketa asunnon käyttäjän toimesta joko pienentämällä ilmanvaihtoa, jolloin ilmanvaihto käy ”poissa” -tilassa tai suurentamalla ilmanvaihtoa, jolloin ilmanvaihto käy ”tehostus” -tilassa.

Näille ”poissa” ja ”tehostus” -tilanteille voidaan mitoitusohjelmaan syöttää tulo- ja poistoilman tilavuusvirtojen suuruudet ja keskimääräiset vuorokautiset käyttöajat, jolloin mitoitusohjelma ottaa nämä huomioon ilmanvaihdon lämpöenergiälaskennassa.

Käyttöaikojen vaikutus ilmanvaihdon lämpöenergiankulutukseen toteutettiin vuorokautisten käyttöaikojen ja niiden aikaisten tulo- ja poistoilman tilavuusvirtojen perusteella muodostuvan kertoimen avulla, jolla lasketaan käyttöajoilla painotetut tulo- ja poistoilman tilavuusvirrat.

Yllä mainitut seikat huomioon ottaen mitoitusohjelma laskee seuraavassa esitettyjä ilmanvaihdon lämpöenergiankulutustietoja tuntikohtaisesti, jolloin kaavoissa esitetty ajanjakso vuodesta on aina yhden tunnin mittainen. Seuraavassa esitettyjen kaavojen avulla saadaan vuotuinen lämpöenergian laskenta-arvo, kun summataan vuoden jokaisesta tunnista saatu asetuntimäärä ja kerrotaan saatu asetuntimäärä summalausekkeen ulkopuolella olevalla lausekkeella.

D5 mukaisesta menetelmästä poiketen mitoitusohjelma laskee lämpöenergian laskenta-arvot voimassa olevan lämpötilahyötysuhteen huomioiden sen sijaan, että käytettäisiin ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta. Laskenta suoritetaan voimassa olevan lämpötilahyötysuhteen avulla, koska näin saadaan yllä mainittu lämmöntalteenoton huurteensulatuksen yksinkertaistus huomioimatta edustavia ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskenta-arvoja.

Vuotuinen ilmanvaihdon lämpöenergiatarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa määritettiin siten, että laskenta suoritetaan käyttöajoilla painotetuista tulo- ja poistoilman tilavuusvirroista suuremmalla. Laskenta määritettiin näin, koska esimerkiksi asunnon geometriasta ja suuruudesta riippuen voidaan asunnon ilmanvaihto järjestää

useammalla ilmanvaihtokoneella ja näiden kaikkien tuloilman tilavuusvirta ei välttämättä ole poistoilman tilavuusvirtaa pienempi, vaan tuloilman tilavuusvirta voi olla poistoilman tilavuusvirtaa suurempi jollain koneella.

Vuotuinen ilmanvaihdon lämpöenergiantarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa määritettiin kaavaa 18 soveltaen siten, että lasketaan kaikki lämpöenergia siltä ajalta, jolloin ulkoilma on sisäilmaa kylmempää (Kaava 26). Jos ulkoilma on sisäilmaa lämpimämpää, lasketaan ilmanvaihdon lämpöenergiantarpeeksi 0 kWh.

$$Q_{iv} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,max} * \sum (t_s - t_u) * \Delta\tau / 1000 \quad (26)$$

Q_{iv} = ilmanvaihdon lämpöenergiantarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa, kWh

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti, J/kg*°C

ρ_i = ilman tiheys, kg/m³

$q_{v,max}$ = asunnon käyttöajoilla painotetun tulo- ja poistoilman tilavuusvirroista suurempi, m³/s

t_s = sisäilman lämpötila (= poistoilman lämpötila), °C

t_u = ulkoilman lämpötila, °C

$\Delta\tau$ = yhden tunnin mittainen ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero ($t_s - t_u$) esiintyy, h

1000 = kerroin, joka muuttaa yksikön W*h muotoon kWh, W/kW

Tuloilman jälkilämmityksen tarvitsema vuotuinen lämpöenergiantarve määritettiin D5 kaavaa 3.11 soveltaen (Kaava 27). D5 mukaisesta kaavasta oli jätettävä tuloilmapuhaltimen lämmittävä vaikutus pois, koska Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilahyötysuhteen mittaustuloksiin sisältyy tuloilmapuhaltimen lämmittävä vaikutus (Suomen RakMK D5 2012, 22). Lisäksi koneen mittaustuloksissa oli maininta siitä, että tuloilmapuhaltimen lämmittävä vaikutus sisältyy tuloilman lämpötilahyötysuhteeseen ja tämän yhteydessä oli saatavilla kaava tarvittaessa vaikutuksen poistamiseksi.

Tuloilman jälkilämmityspatterin lämpöenergiälaskenta määritettiin siten, että jälkilämmitykseen ei kulu lämpöenergiaa, kun lämmöntalteenoton avulla saavutetaan tuloilman lämpötilan asetusarvo tai sitä suurempi arvo. Lisäksi jälkilämmityspatteri on pois päältä, jos ulkoilman lämpötila on yli 14 °C. Laskennassa otetaan huomioon myös ilmanvaihtokonekohtainen jälkilämmityspatterin maksimiteho, joka on Vallox 096 MC -koneen osalta 900 W. Mikäli jälkilämmityspatterin tehontarve on suurempi, kuin lämpötilaerotuksesta $t_{sp} - t_{LTO}$ aiheutuu, lasketaan kyseessä olevan tunnin osalta jälkilämmityspatterin lämpöenergiantarpeeksi Vallox 096 MC -koneen osalta 0,9 kWh.

$$Q_{lp} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,tulo} * \sum (t_{sp} - t_{LTO}) * \Delta\tau / 1000 \quad (27)$$

Q_{lp} = tuloilman jälkilämmityksen lämpöenergiantarve, kWh

$q_{v,tulo}$ = asunnon tuloilmavirta, m³/s

t_{sp} = tuloilman sisäänpuhalluslämpötilan asetusarvo, °C

t_{LTO} = tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen, °C

$\Delta\tau$ = yhden tunnin mittainen ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero ($t_{sp} - t_{LTO}$) esiintyy, h

Tuloilman lämpeneminen asunnon huonetiloissa määritettiin D5 kaavaa 3.14 soveltaen (Kaava 28). Laskenta suoritetaan kaikilta niiltä tunneilta, jolloin tuloilman lämpötila on sisäilman lämpötilaa alhaisempi ottaen huomioon se, että lämmöntalteenotto ohitetaan tuloilmapuolelta, kun ulkoilman lämpötila on yli 14 °C ja tällöin jälkilämmityspatteri on pois päältä. Mikäli jälkilämmityspatterin teho ei riitä lämmittämään tuloilmavirtaa sisäänpuhalluslämpötilaan, lasketaan kyseessä olevan tunnin osalta lämpöenergiantarve lämpötilaerotuksesta $t_s - t_{lp}$, jossa t_{lp} on tuloilman lämpötila jälkilämmityspatterin jälkeen.

$$Q_{sp} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,tulo} * \sum (t_s - t_{lp}) * \Delta\tau / 1000 \quad (28)$$

Q_{sp} = asunnon huonetiloissa tuloilman lämpenemisestä sisäilman lämpötilaan aiheutuva lämpöenergiantarve, kWh

$\Delta\tau$ = yhden tunnin mittainen ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero $(t_s - t_{sp})$ esiintyy, h

Ilmavaihdon korvausilman lämpenemisen lämpöenergiantarve määritettiin D5 kaavan 3.15 mukaisesti (Kaava 29). Lämpöenergiantarve korvausilman osalta on 0 kWh, jos sisäilman lämpötila on ulkoilman lämpötilaa alhaisempi. Lisäksi, jos tuloilman tilavuusvirta on yhtä suuri tai suurempi kuin poistoilman tilavuusvirta, niin tällöin ei ole korvausilmavirtaa ja ei ole myöskään ilmanvaihdon korvausilmavirran lämpenemisestä aiheutuvaa lämpöenergiantarvetta (Suomen RakMK D5 2012, 23). Korvausilmavirta saadaan poistoilmavirran ja tuloilmavirran erotuksesta.

$$Q_{\text{korvaus}} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,\text{korvaus}} * \sum (t_s - t_u) * \Delta\tau / 1000 \quad (29)$$

Q_{korvaus} = korvausilman lämpenemisen lämpöenergiantarve, kWh

$q_{v,\text{korvaus}}$ = korvausilmavirta (= $q_{v,\text{poisto}} - q_{v,\text{tulo}}$), m³/s

$\Delta\tau$ = yhden tunnin mittainen ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero $(t_s - t_u)$ esiintyy, h

Ilmanvaihdosta talteenotettu lämpöenergia määritettiin D5 kaavan 3.17 mukaisesti (Kaava 30). Laskennassa otetaan huomioon se, että lämpöenergiaa ei oteta talteen, kun ulkoilman lämpötila on yli 14 °C ja se, että tuloilman lämpötilaa ei rajoiteta lämpöenergiaa otettaessa talteen.

$$Q_{\text{LTO}} = c_{pi} * \rho_i * q_{v,\text{tulo}} * \sum (t_{\text{LTO}} - t_u) * \Delta\tau / 1000 \quad (30)$$

Q_{LTO} = ilmanvaihdosta talteenotettu lämpöenergia, kWh

$\Delta\tau$ = yhden tunnin mittainen ajanjakso vuodesta, jolloin lämpötilaero $(t_{\text{LTO}} - t_u)$ esiintyy, h

Mitoitusohjelman avulla ilmoitetaan lämpöenergiamäärä, joka on kulutettu kokonaisuudessaan ilmanvaihdon ilman lämmittämiseksi sisäilman lämpötilaan. Tämä lämpö-

energiamäärä saadaan, kun lasketaan yhteen ilman jälkilämmitykseen sekä sisäänpuhallusilman ja korvausilman lämpenemisestä sisäilman lämpötilaan kulunut lämpöenergiamäärä (Kaava 31).

$$Q_{\text{kok}} = Q_{\text{lp}} + Q_{\text{sp}} + Q_{\text{korvaus}} \quad (31)$$

Q_{kok} = ilmanvaihtoon kulutettu lämpöenergia, kWh

Q_{lp} = tuloilman jälkilämmityksen lämpöenergiantarve, kWh

Q_{sp} = asunnon huonetiloissa tuloilman lämpenemisestä sisäilman lämpötilaan aiheutuva lämpöenergiantarve, kWh

Q_{korvaus} = korvausilman lämpenemisen lämpöenergiantarve, kWh

Yllä esitetyistä kaavoista voidaan johtaa ilmanvaihdon lämpöenergiatase. Esitetty ilmanvaihdon lämpöenergiantarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa Q_{iv} (Kaava 26) kuvaa kokonaislämpöenergiamäärää, joka tarvitaan ilmanvaihdon ilman lämmittämiseksi sisäilman lämpötilaan. Tämä lämpöenergia saadaan, kun lasketaan yhteen

- tuloilman jälkilämmitys Q_{lp} (Kaava 27)
- sisäänpuhallusilman lämpeneminen huonetiloissa Q_{sp} (Kaava 28)
- korvausilman lämpeneminen Q_{korvaus} (Kaava 29)
- ilmanvaihdosta talteenotettu lämpöenergia Q_{LTO} (Kaava 30)

Näin ollen voidaan muodostaa ilmanvaihdon lämpöenergiatase (Kaava 32).

$$Q_{\text{iv}} = Q_{\text{lp}} + Q_{\text{sp}} + Q_{\text{korvaus}} + Q_{\text{LTO}} \quad (32)$$

Q_{iv} = ilmanvaihdon lämpöenergiantarve ilman poistoilman lämmöntalteenottoa, kWh

Q_{lp} = tuloilman jälkilämmityksen lämpöenergiantarve, kWh

Q_{sp} = asunnon huonetiloissa tuloilman lämpenemisestä sisäilman lämpötilaan aiheutuva lämpöenergiantarve, kWh

Q_{korvaus} = korvausilman lämpenemisen lämpöenergiantarve, kWh

Q_{LTO} = ilmanvaihdosta talteenotettu lämpöenergia, kWh

Ilmanvaihdon vuotuisen lämpöenergiankulutuksen laskenta-arvoista mitoitusohjelma antaa lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhdearvot, jotka kuvaavat ilmanvaihtokoneen energiatehokkuutta.

Näistä vuosihyötysuhteista toinen on ilmanvaihtokoneen lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhde, joka kuvaa sitä osuutta vuodesta, jolloin ei tarvita tuloilman jälkilämmitystä tuloilman asetusarvon saavuttamiseksi. Koneen lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhde saadaan, kun jaetaan poistoilmasta tuloilmaan talteenotettu lämpöenergiamäärä lämpöenergiämäärällä, joka tarvitaan tuloilmavirran lämmittämiseksi asetusarvoonsa, kun lämmöntalteenottoa ei ole (Kaava 33).

$$\eta_{Q,IVK} = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv} - (Q_{sp} + Q_{korvaus})} * 100 \quad (33)$$

$\eta_{Q,IVK}$ = ilmanvaihtokoneen lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhde, %

Ilmanvaihtokoneen energiatehokkuutta kuvaavana vuosihyötysuhteena mitoitusohjelma antaa myös ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhteen, joka kuvaa sitä miten hyvin lämmöntalteenotto riittää lämmittämään tuloilmavirran sisäilman lämpötilaan. Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhde saadaan, kun jaetaan poistoilmasta tuloilmaan otettu lämpöenergiamäärä lämpöenergiämäärällä, joka tarvitaan tuloilmavirran lämmittämiseksi huonelämpötilaan, kun lämmöntalteenottoa ei ole (Kaava 34).

$$\eta_{Q,iv} = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv} - Q_{korvaus}} * 100 \quad (34)$$

$\eta_{Q,iv}$ = ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen vuosihyötysuhde, %

Mitoitusohjelman avulla saadaan jälkilämmityspatterin huipputehontarve (W). Huipputehontarve esiintyy kehitetyssä laskentamallissa kylmimpänä vuoden tuntina tuloilman lämpötilahyötysuhteen ollessa lämmöntalteenoton jäätymissuojauksesta aiheutuvan jäteilman lämpötilan minimiarvon -5,4 °C vaikutuksen mukaisesti laskettu.

Huipputehontarpeen arvossa on huomioitava se, että laskenta ei ota huomioon lämmöntalteenoton huurteensulatuksesta aiheutuvaa tuloilmavirran ajoittaista ohjaamista lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen ohitse, jonka vuoksi todennäköisesti jälkilämmityspatterin huipputehontarve on suurempi, kuin mitoitusohjelmassa esitetään.

Lämpöenergiankulutuksen laskentaan päätettiin tehdä huurteensulatuksen mallinnuksen osalta yksinkertaistus ja tämä vaikuttaa myös jälkilämmityspatterin huipputehontarpeen laskentaan. Lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen huurteensulatuksen mallintaminen todettiin monimutkaiseksi ja tämän vuoksi yksinkertaistus oli hyväksyttävissä.

Lisäksi mitoitusohjelman avulla saadaan ilmanvaihtokoneen mitattu tuloilman lämpötilahyötysuhde mitattuna SFS-EN 13141-7:2010 mukaan yhtä suurilla tulo- ja poistoilman massavirroilla asunnon mitoistuloilmavirran mukaan ilmoitettuna. Tämä ilmanvaihtokoneen ominaisuus riippuen tuloilman tilavuusvirran suuruudesta esitetään mitoitusohjelman laskentatuloksissa aikaisemmin ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennan yhteydessä esitetyn laskentamallin avulla.

4.3 Ilmanvaihtokoneesta aiheutuva äänitaso

Mitoitusohjelman avulla ilmoitetaan ilmanvaihtokoneesta aiheutuva äänitaso tulo-, poisto-, ulko- ja jäteilmakanavaan. Lisäksi mitoitusohjelma ilmoittaa ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänitason asennusympäristöönsä. Koneen mitoistiedot saadaan, kun käyttäjä syöttää mitoitusohjelmaan tulo- ja poistoilman tilavuusvirran sekä kanavistojen painehäviöt.

Useimmiten energiatehokas ilmanvaihtokone on myös hiljainen. Puhaltimen aiheuttama ääni on pitkälti riippuvainen sen kokonaispaineenkorotuksesta. Näin ollen energiataloudellisesti ja ääniteknisesti on järkevää minimoida ilmanvaihtokanavistossa tarvittava kokonaispaine. (Halme & Seppänen 2002, 115.)

Ilmanvaihtokanavistoon aiheutuva äänitaso on voimakkaasti riippuvainen tarvittavasta kokonaispaineenkorotuksesta ja ilman tilavuusvirrasta. Ilmavirran pyörteiden luku-

määrä kasvaa ilman tilavuusvirran suurentuessa ja ilmavirran painevaihtelu on voimakkaampaa, kun kokonaispaineenkorotus on suurempi ja näiden perusteella voidaan arvioida kokonaisäänitehotason muuttumista, kun ilman tilavuusvirta ja kokonaispaineenkorotus muuttuvat (Kaava 35) (Halme & Seppänen 2002, 48). Kaavassa 35 alaindeksi x kuvaa tarkastelupistettä ja o vertailupistettä.

$$L_{W,x} = 10 * \lg\left(\frac{q_{v,x}}{q_{v,o}}\right) + 20 * \lg\left(\frac{P_{F,x}}{P_{F,o}}\right) + L_{W,o} \quad (35)$$

L_W = puhaltimen kehittämä kokonaisäänitehotaso, dB

q_v = puhaltimen ilman tilavuusvirta, dm³/s

p_F = puhaltimen kokonaispaineenkorotus, Pa

Kaava 35 pätee, kun pysytään samalla laituskäyrällä. Puhaltimen toimintapisteessä aiheutuva kokonaisäänitehotaso riippuu puhaltimen hyötysuhdealueesta vallitsevalla laituskäyrällä. Optimilaituskäyrään verrattuna heikomman hyötysuhdealueen laituskäyrällä on verrattain suurempi äänentuotto (Halme & Seppänen 2002, 48).

Kaavasta 35 nähdään, että kokonaispaineenkorotuksen vaikutus aiheutuvaan kokonaisäänitehotasoon on kaksinkertainen verrattuna ilman tilavuusvirran vaikutukseen. Tästä syystä on perusteltua minimoida ilmanvaihtojärjestelmässä aiheutuvat painehäviöt, jolloin saadaan sekä energiataloudellinen että ääniteknisesti hiljainen järjestelmä.

Keskipakoispuhaltimen aiheuttama äänen tehotaso on voimakkainta matalilla taajuuksilla. Matalien taajuuksien vaimentaminen on myöskin hankalinta, koska niiden suuremmat aallonpituudet vaativat paksumpia vaimennuksia (Halme & Seppänen 2002, 77).

Ilmanvaihtomelulle suoritettavan A-suodatuksen johdosta matalilla taajuuksilla korjataan vähentävästi eniten äänen tehotasoa, koska A-suodatus kuvailee ihmisen melutuntemusta suhteellisen hiljaisilla äänillä (Halme & Seppänen 2002, 13). A-suodatuksen vuoksi kaikista matalimmat taajuudet eivät mahdollisesti olekaan merkittävimpiä, kun otetaan huomioon ihmisen melutuntemus. Toisaalta korkeampia taajuuksia voi-

daan vaimentaa tehokkaammin, joten loppujen lopuksi taajuuskaistojen äänen tehotasoista syntyvästä melusta määräävin taajuuskaista äänen tehotason osalta riippuu monen eri tekijän summasta.

4.3.1 Ilmanvaihtokanavistoon aiheutuva äänitaso

Ilmanvaihtokanavistoon aiheutuvan äänitason osalta mitoitusohjelman avulla saadaan tulo-, poisto-, ulko- ja jäteilmakanaviin aiheutuvat äänen tehotasot (dB) taajuuskaistakohtaisesti ja näistä yhteenlaskettu A-suodatettu kokonaisäänitehotaso (dB(A)).

Seuraavassa esitetään tuloilmakanavaan aiheutuvan taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen mallinnusmenetelmä. Mallinnusmenetelmä on jokaiselle kanavaosuudelle samanlainen.

Äänilaskentataulukon kehitykseen oli käytettävissä jokaisen kanavaosuuden osalta jokaiselta tarkastellulta ohjausjännitteeltä kaksi toimintapistettä, jolloin näistä eri ohjausjännitteiden toimintapisteistä saatiin kaksi laituskäyrää äänilaskentataulukon kehittämiseksi.

Taulukossa 6 on esitetty tuloilmakanavan osalta loivemman laituskäyrän äänen tehotasojen $L_{W,Hz}$ mittaustulokset taajuuskaistakohtaisesti. Taulukossa 6 oleva SA on tuloilmapuhaltimeen ohjausjännite (V) ja q_v on tuloilman tilavuusvirta (dm^3/s) sekä p_{tU} on tuloilmapuolen kanavistopainehäviö (Pa). Lisäksi taulukossa 6 oleva L_W on kokonaisäänitehotaso (dB), kun taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot on laskettu logaritmisesti yhteen, sekä L_{WA} on A-suodatettu kokonaisäänitehotaso (dB(A)), kun A-suodatetut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot on laskettu logaritmisesti yhteen.

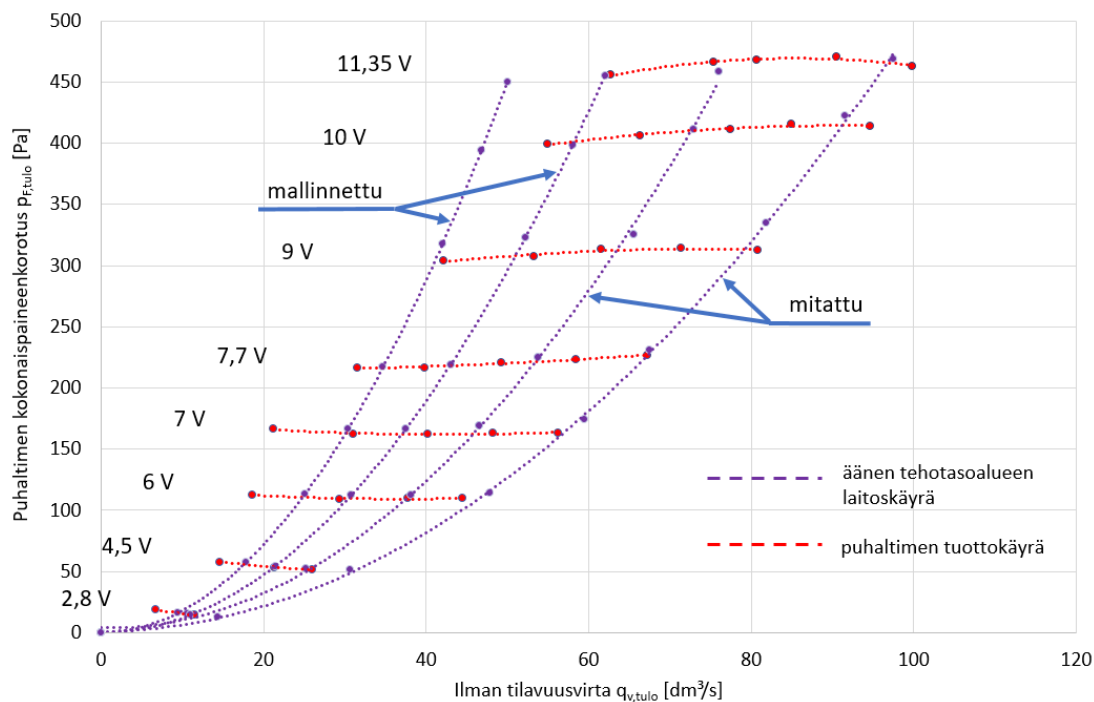
Taulukko 6. Tuloilmakanavan loivemman mitatun laitoskäyrän lähtötiedot äänilaskennan kehitykseen.

Suure	Yksikkö	1	2	3	4	5	6	7	8
SA	V	11,3	10,0	9,0	7,7	7,0	6,0	4,5	2,8
qv	dm ³ /s	97,5	91,5	81,9	67,5	59,5	47,8	30,6	14,3
p _{rU}	Pa	63,5	65,6	48,6	36,4	23,2	16,5	11,0	3,8
Lw ₆₃	dB	65,9	64,7	66,2	61,8	57,4	59,0	52,9	38,7
Lw ₁₂₅	dB	63,6	63,3	60,1	57,8	55,2	49,9	45,0	34,8
Lw ₂₅₀	dB	67,6	66,4	64,5	61,2	58,6	55,1	49,3	40,0
Lw ₅₀₀	dB	65,9	64,8	62,6	59,2	56,6	53,6	50,3	38,8
Lw ₁₀₀₀	dB	65,2	64,5	62,6	59,9	57,6	54,2	47,4	34,2
Lw ₂₀₀₀	dB	65,0	63,9	61,5	57,5	54,4	49,9	41,7	24,4
Lw ₄₀₀₀	dB	57,8	56,5	53,6	49,7	46,6	41,7	31,0	*16,4
Lw ₈₀₀₀	dB	49,6	48,0	44,5	38,7	33,9	*26,7	*21,0	*20,7
Lw	dB	73,6	72,6	71,3	67,7	64,7	62,6	56,9	44,9
L _{WA}	dB(A)	70,4	69,4	67,2	63,8	61,2	57,5	51,1	38,9

Mittaustulokset olivat saatavilla kahdelta jyrkkyydeltään erilaiselta laitoskäyrältä. Kanavaan aiheutuvan äänitehotason mallinnuksen kannalta nämä kaksi laitoskäyrää mahdollistaisivat melko karkean mallinnuksen, joten tämän vuoksi tässä kehitystyössä mallinnettiin kaksi laitoskäyrää lisää ebm-puhallinohjelmaa hyväksikäyttäen.

Ensimmäiseksi oli kuvattava lähtötietojen mittauspisteiden toimintapisteet puhaltimen tuottokäyrästä, jotta nähdään mitatut laitoskäyrät puhaltimen tuottokäyrästä. Lisäksi puhaltimen tuottokäyrästä kuvattiin kahden äänitiedoiltaan mallinnettavan laitoskäyrän laitoskäyrät siten, että mitattuihin laitoskäyriin nähden nämä mallinnetut laitoskäyrät ovat tasavälein jyrkempiä. Kaksi mallinnettavaa laitoskäyrää mallinnettiin hyväksikäyttäen kaavaa, jossa laitoksen painehäviö yksinkertaistetaan ilman tilavuusvirran neliöön verrannolliseksi ja tämän laitoskäyrän jyrkkyys on verrannollinen laitoskäyrän k-kertoimen suuruuteen.

Kuvassa 43 on esitetty tuloilmakanavaan aiheutuvan äänen tehotasojen mallinnuksessa käytetty puhaltimen tuottokäyrä, jossa mitatut ja mallinnetut laitoskäyrät ovat piirretty violetin värisenä ja ohjausjännitteiden (V) tuottokäyrät on piirretty punaisella.



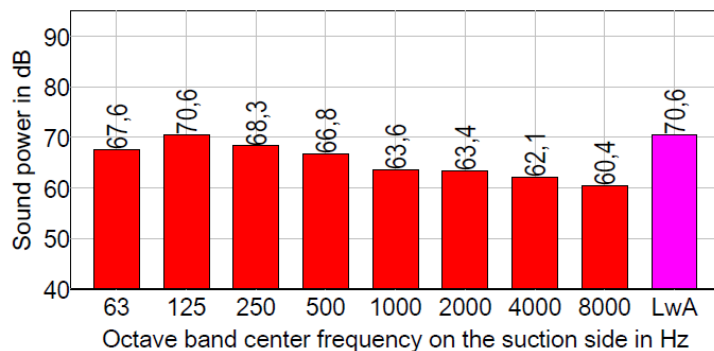
Kuva 43. Tuloilmapuhaltimen tuottokäyrästäöön piirretyt äänen tehotasojen mallinnuksessa käytetyt laitoskäyrät.

Kuvassa 43 olevista violetin värisistä laitoskäyristä erottuvat violetit pisteet kuvaavat puhaltimen toimintapistettä vallitsevalla ohjaujännitteellä, jotka ovat merkittynä kuvassa 43 vasempaan reunaan.

Kuvan 43 mukaisten laitoskäyrien perustana on toimintapistettä jokaisella ohjaujännitteellä. Näissä jokaisessa puhaltimen toimintapistessä vallitsee tietty ilman tilavuusvirta (dm^3/s) ja kokonaispaineenkorotus (Pa), joten näiden tietojen avulla voidaan hyväksikäyttää ebm-puhallinohjelmaa äänen tehotasojen mallintamiseksi.

Ebm-puhallinohjelmalla selvitettiin vastaavat taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot ebm-puhallinohjelmassa ilmoitettuna jokaisen neljän laitoskäyrän jokaisessa toimintapistessä. Esimerkiksi loivimmalla laitoskäyrällä, kun tuloilman tilavuusvirta ohjaujännitteellä 11,35 V on $97,5 \text{ dm}^3/\text{s}$, niin puhaltimen kokonaispaineenkorotus saatiin, kun lisättiin taulukossa 6 esitettyyn kanavapaineeseen mallinnettu ilmavaihtokoneen painehäviö. Kokonaispaineenkorotukseksi saatiin tässä tapauksessa 469 Pa.

Kuvassa 44 on esitetty ebm-puhallinohjelmasta saadun tulosteen taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot ja A-suodatettu kokonaisäänitehotaso toimintapisteessä 97,5 dm³/s, 469 Pa.



Kuva 44. Ebm-puhallinohjelmasta saadut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot ja A-suodatettu kokonaisääniteho puhaltimen toimintapisteessä 97,5 dm³/s, 469 Pa.

Kuvasta 44 nähdään se, että äänen tehotasot on ilmoitettu imukanavaan (suction side). Samassa tulostetiedostossa on ilmoitettu myös painekanavaan aiheutuvat äänen tehotasot, mutta nämä ovat samoja lukuarvoja, joita on kaikkia korotettu luvulla 5. Tästä johtuen ei ollut merkitystä kumpia lukuarvoja käytettiin ja näistä päätettiin käyttää imukanavaan aiheutuvia äänen tehotason arvoja.

Kuvan 44 mukainen tuloste otettiin jokaisesta selvitetystä puhaltimen toimintapisteestä jokaisella laitoskäyrällä ja niistä oli laadittava laitoskäyräkohtaiset taulukot.

Taulukossa 7 on esitetty ebm-puhallinohjelmasta saadut loivimman laitoskäyrän toimintapisteiden taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot ebm-puhaltimella. Taulukossa 7 ebm-puhaltimen äänen tehotasot on esitetty jokaisella kahdeksalla taajuuskaistalla laitoskäyrän jokaisen mitatun ohjausjännitteen toimintapisteessä, jossa ilman tilavuusvirtaa kuvaa $q_{v,tulo}$ (dm³/s) ja kokonaispaineenkorotusta $p_{F,tulo}$ (Pa).

Taulukko 7. Ebm-puhallinohjelmasta saadut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot puhaltimen toimintapisteissä loivimmalla laitoskäyrällä.

ilmavirta	tuloilma	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso
$q_{v,tulo}$	$p_{F,tulo}$	L_{W63}	L_{W125}	L_{W250}	L_{W500}	L_{W1000}	L_{W2000}	L_{W4000}	L_{W8000}
[dm ³ /s]	[Pa]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
97,5	469	68	71	68	67	64	63	62	60
91,5	423	67	70	67	66	62	62	61	59
81,9	335	65	67	65	63	60	59	57	55
67,5	231	61	64	60	59	55	55	52	48
59,5	174	59	61	57	55	52	51	48	43
47,8	114	55	57	52	50	48	46	42	36
30,6	51	47	49	44	41	38	36	30	22
14,3	13	34	36	29	24	22	19	11	0

Taulukon 7 mukaisten laitoskäyräkohtaisten taulukoiden avulla saatiin selvitettyä taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen muuttuminen laitoskäyrän jyrkkyyden muuttuessa, kun oletetaan Valloxin puhaltimen äänen tehotasojen muuttuvan samalla tavalla. Tähän seikkaan voi vaikuttaa puhallinkaapujen erilaisuus, mutta tämän vaikutus äänen tehotasojen muuttumiseen jätettiin huomioimatta.

Taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen mallinnuksen lähtökohdaksi määritettiin puhaltimen toimintapisteessä vallitseva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso. Kokonaisäänitehotasot ilmoitetaan A-suodatettuina, koska A-suodatus korjaa rakennuksen melulähteiden taajuuskaistojen äänen tehotasoja siten, että saadaan usean taajuuskaistan yhteenlaskettu kokonaisääniteho vastaamaan paremmin ihmisen melutuntemusta (Sandberg 2014, osa 2, 59).

A-suodatettu kokonaisäänitehotaso saadaan määritettyä, kun lasketaan vallitsevassa puhaltimen toimintapisteessä jokaisen taajuuskaistan A-suodatetut äänen tehotasot logaritmisesti yhteen (Kaava 36) (Halme & Seppänen 2002, 14).

$$\begin{aligned}
 L_{WA} = & 10 * \lg\left(10^{\frac{L_{W63}+K_{A63}}{10}} + 10^{\frac{L_{W125}+K_{A125}}{10}} \right. \\
 & + 10^{\frac{L_{W250}+K_{A250}}{10}} + 10^{\frac{L_{W500}+K_{A500}}{10}} + 10^{\frac{L_{W1000}+K_{A1000}}{10}} \\
 & \left. + 10^{\frac{L_{W2000}+K_{A2000}}{10}} + 10^{\frac{L_{W4000}+K_{A4000}}{10}} + 10^{\frac{L_{W8000}+K_{A8000}}{10}} \right) \quad (36)
 \end{aligned}$$

L_{WA} = A-suodatettu kokonaisäänitehotaso, dB(A)

$L_{W,Hz}$ = taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso, dB

$K_{A,Hz}$ = A-suodatuksen taajuuskaistakohtainen korjaus, dB

Kaavassa 36 tarvittavat A-suodatuksen korjaukset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Taajuuskaistoille tehtävät korjaukset A-suodatuksessa (Sandberg 2014, osa 2, 59).

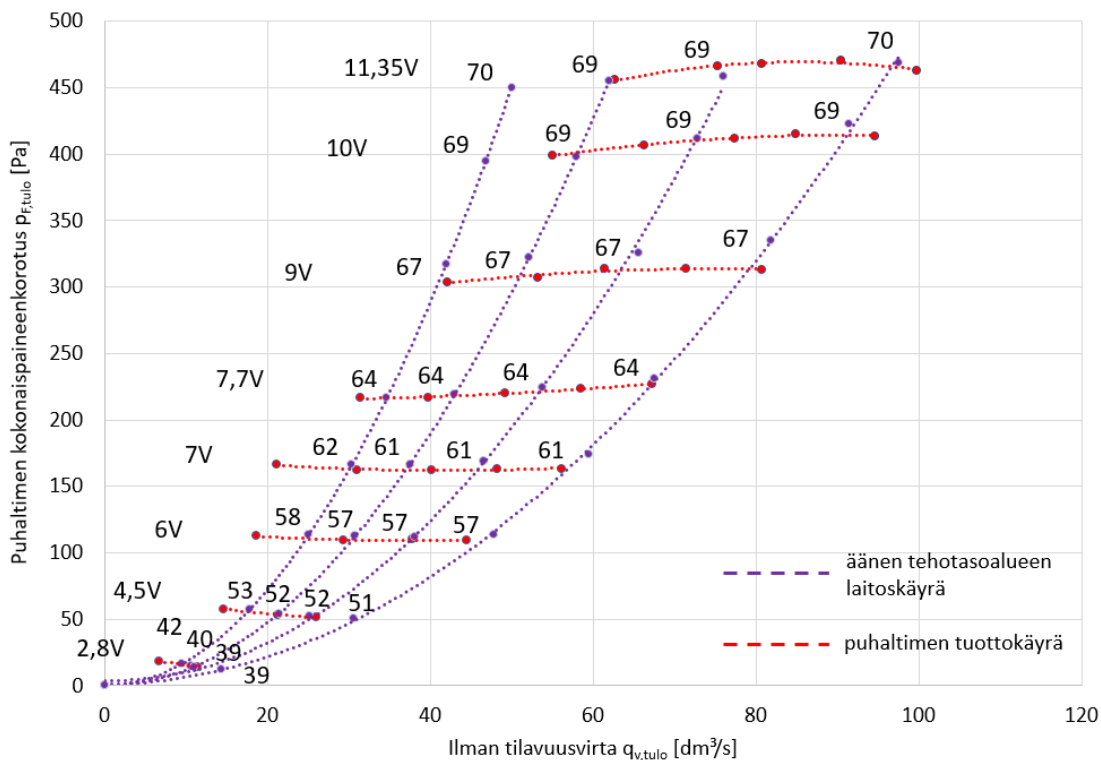
63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1

Jokaisen neljän laitoskäyrän jokaisen ohjausjännitteen toimintapisteen A-suodatettu kokonaisäänitehotaso saatiin määritettyä, kun käytettiin loivimman laitoskäyrän mitaustulosten A-suodatettuja kokonaisäänitehotasoja lähtökohtana.

Muiden laitoskäyrien vastaavien ohjausjännitteiden toimintapisteiden A-suodatetut kokonaisäänitehotasot saatiin, kun lisättiin ebm-puhallinohjelmasta saatu A-suodatetun kokonaisäänitehotason muutos, kun siirrytään loivemmalta laitoskäyrältä jyrkemälle laitoskäyrälle. Tämä toistettiin jokaisen laitoskäyrän osalta, jolloin saatiin A-suodatettu kokonaisäänitehotaso jokaisen laitoskäyrän jokaisen ohjausjännitteen toimintapisteessä.

Esimerkiksi loivimman laitoskäyrän A-suodatetuksi kokonaisäänitehoksi ohjausjännitteellä 11,35 V toimintapisteessä 97,5 dm³/s, 469 Pa kaavan 36 avulla saatiin 70 dB(A). Muutos ebm-puhallinohjelman mukaan siirryttäessä seuraavaksi jyrkemälle laitoskäyrälle on samalla ohjausjännitteellä -1 dB, joten loivinta laitoskäyrää seuraavaksi jyrkemällä laitoskäyrällä ohjausjännitteen 11,35 V toimintapisteen A-suodatetuksi kokonaisäänitehoksi saatiin 70 - 1 = 69 dB(A). Tämä toimenpide suoritettiin jokaisen ohjausjännitteen toimintapisteellä jokaisella laitoskäyrällä, jolloin saatiin määritettyä A-suodatettu kokonaisäänitehotaso jokaisen laitoskäyrän jokaisen ohjausjännitteen toimintapisteessä.

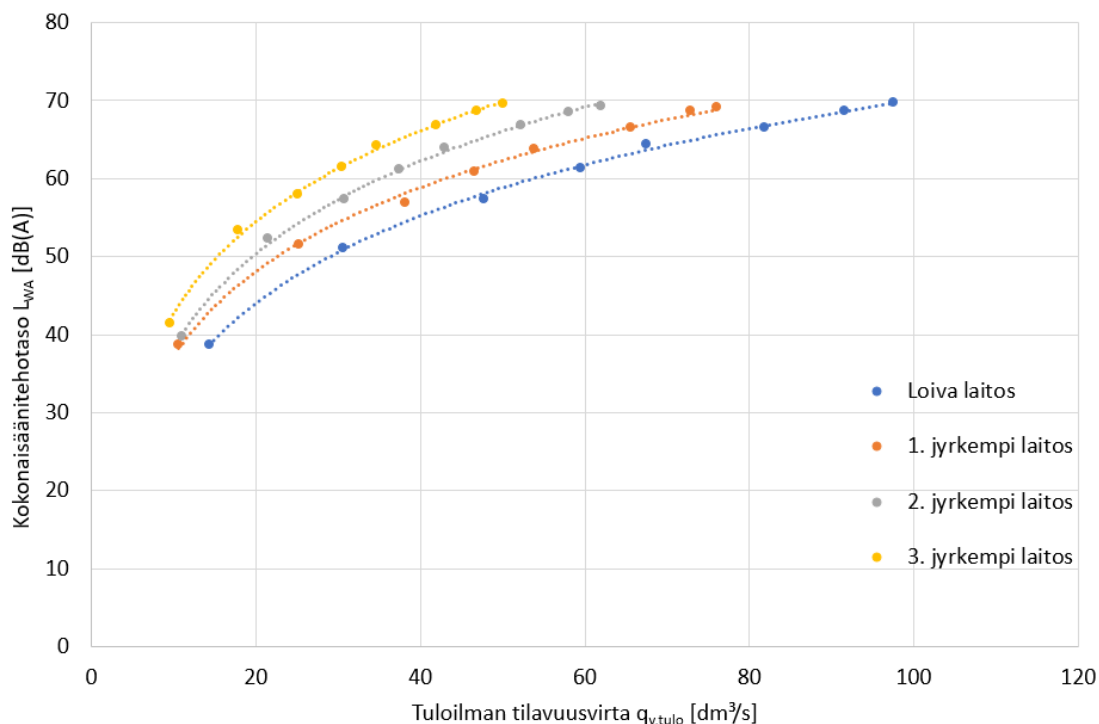
Kuvassa 45 on esitetty tuloilmapuhaltimen tuottokäyrästä, johon on merkitty yllä olevaa menetelmää hyödyntäen tuloilmakanavaan aiheutuvat A-suodatetut kokonaisäänitehotasot jokaisessa mitatussa ja mallinnetussa puhaltimen toimintapisteessä.



Kuva 45. Puhaltimen tuottokäyrästöllä mitatuissa ja mallinnetuissa toimintapisteissä tuloilmakanavaan aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso.

A-suodatettu kokonaisäänitehotaso oli mallinnettava kuvassa 45 esitetyistä lukuarvoista tuloilman tilavuusvirrasta riippuvaisena jokaisella jyrkkyydeltään erilaisella laitoskäyrällä, koska taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot mallinnettiin A-suodatetusta kokonaisäänitehotasosta korjausten avulla.

Kuvassa 46 on esitetty mallinnettu A-suodatettu kokonaisäänitehotaso jyrkkyydeltään erilaisilla laitoskäyrillä ilman tilavuusvirrasta riippuvaisena. Kuvassa 46 eri väriset käyrät kuvaavat kuvassa 45 esitettyjen laitoskäyrien A-suodatettua kokonaisäänitehotasoa, joka luetaan kuvan 46 pystyakselilta.



Kuva 46. Mallinnettu tuloilmakanavaan aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso.

Taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot määritettiin kuvan 45 laskettuihin A-suodatettuihin kokonaisäänitehoihin perustuen. Kokonaisäänitehotason jakauma eri taajuuskaistoille ilmoitetaan yleensä korjauksena kokonaisäänitehotasosta (Halme & Seppänen 2002, 46). Äänen tehotason jakauma eri taajuuskaistoille määriteltiin taajuuskaistakohtaisten korjausten avulla, koska taajuuskaistakohtaiset korjaukset havainnollistavat merkittävimpien taajuuskaistojen vaikutuksen puhaltimen aiheuttamaan kokonaisäänitehotasoon.

Taajuuskaistakohtaisille äänen tehotasoille mallinnettiin korjaukset kullakin laitospöytäkäyrällä jokaisessa puhaltimen toimintapisteessä A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon nähden. Taajuuskaistakohtaiselle äänen tehotasolle saadaan korjaus, kun vähennetään puhaltimen toimintapisteessä vallitsevasta taajuuskaistakohtaisesta äänen tehotasosta A-suodatettu kokonaisääniteho (Kaava 37).

$$K_{Hz} = L_{W,Hz} - L_{WA} \quad (37)$$

K_{Hz} = taajuuskaistakohtainen korjaus, dB

$L_{W,Hz}$ = taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso, dB

$$L_{WA} = A\text{-suodatettu kokonaisäänitehotaso, dB(A)}$$

Mitattuja tuloksia edustavan loivimman laitoskäyrän taajuuskaistakohtaisia äänen tehotasoja ja A-suodatettuja kokonaisäänitehotasoja käytettiin hyväksi kolmen jyrkemmän laitoskäyrän taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen korjausten mallinnukseen.

Mitattuja loivimman laitoskäyrän äänen tehotasojen tuloksia ja ebm-puhallinohjelman vastaavien tulosten suuruuksia ja niiden muuttumista ohjausjännitteen mukaan oli havaittavissa se, että pienimmillä ohjausjännitteillä ei taustameluvaatimus ollut todennäköisesti täyttynyt korkeimpien taajuuskaistojen osalta, kuten taulukon 6 lähtötiedoissa muutamilla mittaustuloksilla esitettiin tähtimerkinnällä. Näitä mittaustuloksia oli korjattava, jotta mallinnuksessa saatiin taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen muuttumisen trendi vastaamaan paremmin niiden muuttumista, kun ilman tilavuusvirta ja kokonaispaineenkorotus pienenee samalla laitoskäyrällä.

Mittaustuloksia edustavasta loivimman laitoskäyrän puhaltimen toimintapisteistä laadittiin taulukon 7 mukainen taulukko ja tämän perusteella laadittiin kaikissa puhaltimen toimintapisteissä taajuuskaistakohtaisten korjausten taulukko loivimmalla laitoskäyrällä kaavan 37 mukaisesti vähentäen toimintapisteen kustakin taajuuskaistakohtaisesta äänen tehotasosta toimintapisteen A-suodatettu kokonaisäänitehotaso.

Taulukossa 9 on esitetty loivimman laitoskäyrän taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen korjaukset ohjausjännitteittäin puhaltimen toimintapisteessä A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon, kun taajuuskohtaisesta äänen tehotasosta on vähennetty A-suodatettu kokonaisäänitehotaso kaavan 37 mukaisesti. Taulukossa 9 oleva SA on puhaltimen toimintapisteessä vallitseva ohjausjännite (V) ja $q_{v,tulo}$ on puhaltimen toimintapisteen ilman tilavuusvirta (dm^3/s) sekä K_{Hz} on taajuuskaistakohtainen korjaus A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon (dB).

Taulukko 9. Taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen lasketut korjaukset A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon loivimmalla laitoskäyrällä puhaltimen eri toimintapisteissä.

SA	ilmavirta	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus
[V]	$q_{v,tulo}$	k_{63Hz}	k_{125Hz}	k_{250Hz}	k_{500Hz}	k_{1kHz}	k_{2kHz}	k_{4kHz}	k_{8kHz}
	[dm ³ /s]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
11,35	97,5	-4	-6	-2	-4	-5	-7	-12	-20
10,00	91,5	-4	-6	-2	-4	-5	-7	-12	-21
9,00	81,9	-4	-6	-2	-4	-5	-7	-13	-22
7,70	67,5	-3	-5	-1	-3	-4	-7	-15	-26
7,00	59,5	-2	-5	-1	-4	-4	-7	-15	-26
6,00	47,8	-1	-4	0	-3	-4	-7	-16	-28
4,50	30,6	1	-2	0	-4	-4	-8	-18	-32
2,80	14,3	4	0	1	-4	-4	-10	-21	-32

Taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen mallinnusta varten tunnettiin loivimman laitoskäyrän mitatut äänen tehotasot ja niiden taajuuskaistakohtaiset korjaukset kaikissa puhaltimen toimintapisteissä. Vastaavat mitatut arvot tunnettiin seuraavaksi jyrkemmällä laitoskäyrällä. Mitatut seuraavaksi jyrkemmän laitoskäyrän taajuuskaistakohtaiset mittaustulokset eri puhaltimen toimintapisteissä päätettiin mallintaa mallinnettavien laitoskäyrien lisäksi ebm-puhallinohjelmaa hyväksikäyttäen, koska näin saatiin äänen tehotasojen muuttuminen vastaamaan ebm-puhallinohjelmasta saatavaa muuttumista kaikkien jyrkkyydeltään erilaisten laitoskäyrien osalta.

Aikaisemmin haettiin jokaiselta neljältä laitoskäyrältä kaikki toimintapisteet ebm-puhallinohjelman avulla ja näissä vallitsevat taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot. Näistä kaikista neljästä laitoskäyrästä laadittiin taulukon 9 mukainen toimintapiste-kohtainen taajuuskaistakohtainen korjaustaulukko. Näitä neljää korjaustaulukkoa hyödyntäen saatiin laskettua jokaisen toimintapisteen taajuuskaistakohtaisten tehotasojen korjauksen muutos, kun siirrytään laitoskäyrältä toiselle. Näitä korjausten muutoksia voitiin hyödyntää, koska aiemmin määritettiin mallinnusta varten valmiiksi jokaisen laitoskäyrän A-suodatetut kokonaisäänitehotasot jokaisessa toimintapisteessä ja näin oli mahdollista hyödyntää ebm-puhallinohjelman avulla saatavia taajuuskaistakohtaisten korjausten muutoksia, kun siirrytään laitoskäyrältä laitoskäyrälle.

Loivempaa laitoskäyrää jyrkemmällä laitoskäyrällä saadaan vastaavalla ohjausjännitteen toimintapisteellä laskettua taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso A-suodatetusta kokonaisäänitehosta, kun tunnetaan jyrkempää laitoskäyrää loivemman laitoskäyrän vastaavan toimintapisteen taajuuskaistakohtainen korjaus ja muutos korjaukseen, kun siirrytään laitoskäyrältä jyrkemmälle laitoskäyrälle (Kaava 38).

$$L_{W,H,z,n+1} = L_{WA,n+1} + K_{Hz,n} + \Delta K_{Hz,n \rightarrow n+1} \quad (38)$$

$L_{W,H,z,n+1}$ = jyrkemmän laitoskäyrän taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso ohjausjännitteen toimintapisteessä, dB

$L_{WA,n+1}$ = jyrkemmän laitoskäyrän A-suodatettu kokonaisäänitehotaso ohjausjännitteen toimintapisteessä, dB(A)

$K_{Hz,n}$ = taajuuskaistakohtainen korjaus loivemmalla laitoskäyrällä ohjausjännitteen toimintapisteessä, dB

$\Delta K_{Hz,n \rightarrow n+1}$ = taajuuskaistakohtaisen äänen tehotason korjauksen muutos siirryttäessä loivemmalta laitoskäyrältä jyrkemmälle laitoskäyrälle, dB

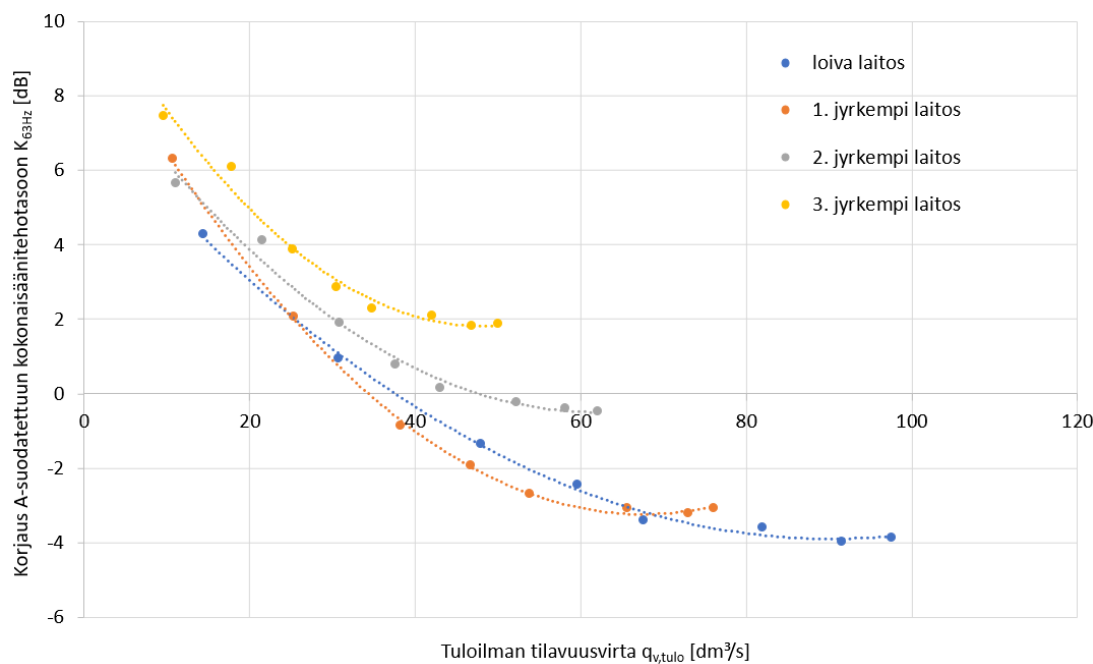
Kaavan 38 avulla saatiin laskettua loivempaa seuraavaksi jyrkemmällä laitoskäyrällä jokaisessa jyrkemmän laitoskäyrän toimintapisteessä taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot, kun hyväksikäytettiin ebm-puhallinohjelmasta saatua taajuuskaistakohtaista äänen tehotason muutosta vastaavassa ohjausjännitteen toimintapisteessä. Tämä toistettiin jokaisella jyrkemmällä laitoskäyrällä käyttäen kaavaa 38, jolloin saatiin lasketuksi kaikkien laitoskäyrien taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot jokaisessa toimintapisteessä.

Kun kaikkien laitoskäyrien jokaisen toimintapisteen taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot tunnettiin, voitiin laatia laitoskäyräkohtaisesti taajuuskaistakohtainen korjauskuvaaja, jonka avulla saatiin mallinnettua tarvittava korjaus A-suodatettuun äänitehotasoon portaattomasti jokaisella laitoskäyrällä ilman tilavuusvirrasta riippuvaisena.

Korjauskuvaajia varten oli laadittava loivimman laitoskäyrän toimintapisteiden taajuuskaistakohtaisen korjaustaulukon lisäksi jyrkempien laitoskäyrien kaikkien toimintapisteiden vastaavat korjaustaulukot. Näistä taulukoista saatiin laadittua taajuuskaistakohtainen korjauskuvaaja laitoskäyrän jyrkkyydestä riippuvaisena.

Kuvassa 47 on esitetty laitoskäyräkohtaisten korjaustaulukoiden avulla laadittu kuvaaja taajuuskaistalla 63 Hz. Kuvassa 47 olevat käyrät edustavat jyrkkyydeltään erilaisilla laitoskäyrillä suoritettavaa pystyakselilla olevaa korjausta toimintapisteessä

vallitsevaan A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon vaaka-akselilla olevan ilman tilavuusvirran funktiona, jotta saadaan äänen tehotaso taajuuskaistalla 63 Hz.



Kuva 47. Mallinnettu korjaus tuloilmakanavan A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon taajuuskaistalla 63 Hz ilman tilavuusvirran ja laituskäyrän jyrkkyyden funktiona.

Jokaisen taajuuskaistan korjauksesta laadittiin kuvan 47 mukainen kuvaaja, jotta voitiin mallintaa taajuuskaistakohtainen suoritettava korjaus A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon. Näin voitiin laskea jyrkkyydeltään erilaisilla laituskäyrillä jokaisessa toimintapisteessä vallitsevat taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot.

Jyrkkyydeltään erilaisille laituskäyrille oli laadittava taulukot, kun oltiin laadittu kuvan 47 mukaiset kuvaajat jokaiselle taajuuskaistalle. Näistä kuvaajista saatiin kaavat, joissa muuttujana on vallitsevalla laituskäyrällä ilman tilavuusvirta ja tuloksena saadaan suoritettava korjaus A-suodatettuun kokonaisäänitehoon vallitsevassa toimintapisteessä.

Taulukossa 10 on esitetty loivimman laituskäyrän osalta taulukko, johon on mallinnettu taajuuskohtaiset suoritettavat korjaukset A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon jokaisessa mitatussa toimintapisteessä. Taulukon 10 arvot pitäisivät olla täysin samat, kuin taulukossa 9, mutta mallinnuksen epätarkkuudesta johtuen korjaus voi

erota taulukon 9 laskennallisesta arvosta. Taulukossa 10 oleva ilmavirta $q_{v,tulo}$ ja kokonaispaineenkorotus $p_{F,tulo}$ muodostavat puhaltimen toimintapisteen loivalla laitoskäyrällä sekä korjaukset K_{Hz} ovat taajuuskaistoille suoritettavat korjaukset A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon vallitsevassa puhaltimen toimintapisteessä.

Taulukko 10. Mallinnetut korjaukset A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon loivimmalla laitoskäyrällä puhaltimen eri toimintapisteissä.

ilmavirta	tuloilma	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus	korjaus
$q_{v,tulo}$	$p_{F,tulo}$	K_{63Hz}	K_{125Hz}	K_{250Hz}	K_{500Hz}	K_{1kHz}	K_{2kHz}	K_{4kHz}	K_{8kHz}	
[dm ³ /s]	[Pa]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
97,5	469	-4	-6	-2	-4	-5	-6	-12	-19	
91,5	423	-4	-6	-2	-4	-5	-6	-12	-21	
81,9	335	-4	-6	-2	-4	-4	-6	-13	-23	
67,5	231	-3	-6	-2	-4	-4	-7	-14	-25	
59,5	174	-3	-5	-1	-4	-4	-7	-15	-27	
47,8	114	-1	-4	-1	-4	-4	-7	-16	-29	
30,6	51	1	-2	0	-4	-4	-8	-18	-31	
14,3	13	4	0	1	-4	-4	-10	-21	-32	

Mallinnuksen tarkkuus voitiin tarkistaa lisäämällä toimintapisteen mallinnetut korjaukset mallinnettuun A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon ja vertaamalla näitä mallinnettuja äänen tehotasoja loivimman laitoskäyrän osalta mitattuihin ja muiden laitoskäyrien osalta laskettuihin. Lisäksi näistä mallinnetuista taajuuskaistakohtaisista äänen tehotasoista laskettua A-suodatettua kokonaisäänitehotasoa voitiin verrata lähötietojen perusteella laskettuun A-suodatettuun kokonaisäänitehotasoon.

Taulukossa 11 on esitetty loivimman laitoskäyrän toimintapisteiden äänen tehotasojen $L_{W,Hz}$ (dB) mallinnuksen tulos, jossa vasemmanpuoleinen A-suodatettu kokonaisäänitehotaso L_{WA} (dB(A)) on mallinnuksen äänen tehotasoista laskettu ja oikeanpuoleinen A-suodatettu kokonaisäänitehotaso on mittaustulosten avulla laskettu.

Taulukko 11. Tuloilmakanavaan aiheutuvien taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen mallinnuksen tulos loivimmalla laitoskäyrällä puhaltimen eri toimintapisteissä.

ilmavirta	tuloilma	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso
$q_{v,tulo}$	$p_{F,tulo}$	L_{W63}	L_{W125}	L_{W250}	L_{W500}	L_{W1000}	L_{W2000}	L_{W4000}	L_{W8000}	L_W	L_{WA}	L_{WA}
[dm ³ /s]	[Pa]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB(A)]	[dB(A)]
97,5	469	66	64	67	66	65	63	58	50	73	70	70
91,5	423	65	63	66	65	64	62	56	48	72	69	69
81,9	335	63	61	65	63	62	60	54	44	71	67	67
67,5	231	60	58	62	60	59	57	50	38	68	64	64
59,5	174	59	57	60	58	57	55	47	35	66	62	61
47,8	114	57	54	57	54	54	51	42	30	63	58	57
30,6	51	52	49	51	47	47	43	33	20	57	51	51
14,3	13	43	39	40	35	35	29	18	6	46	39	39

Taulukossa 11 esitetty toimintapisteiden A-suodatettu kokonaisääniteho saatiin laskettua laskemalla A-suodatetut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot logaritmisesti yhteen kaavan 36 avulla. Esimerkiksi taulukon 11 toimintapisteessä 97,5 dm³/s, 469 Pa A-suodatettu kokonaisäänitehotasoksi saadaan kaavan 36 avulla

$$L_{WA} = 10 * \lg(10^{\frac{L_{W63}+K_{A63}}{10}} + 10^{\frac{L_{W125}+K_{A125}}{10}} + 10^{\frac{L_{W250}+K_{A250}}{10}} + 10^{\frac{L_{W500}+K_{A500}}{10}} + 10^{\frac{L_{W1000}+K_{A1000}}{10}} + 10^{\frac{L_{W2000}+K_{A2000}}{10}} + 10^{\frac{L_{W4000}+K_{A4000}}{10}} + 10^{\frac{L_{W8000}+K_{A8000}}{10}})$$

$$L_{WA} = 10 * \lg(10^{\frac{66+(-26,2)}{10}} + 10^{\frac{64+(-16,1)}{10}} + 10^{\frac{67+(-8,6)}{10}} + 10^{\frac{66+(-3,2)}{10}} + 10^{\frac{65+0,0}{10}} + 10^{\frac{63+1,2}{10}} + 10^{\frac{58+1,0}{10}} + 10^{\frac{50+(-1,1)}{10}})$$

$$L_{WA} = 70 \text{ dB(A)}$$

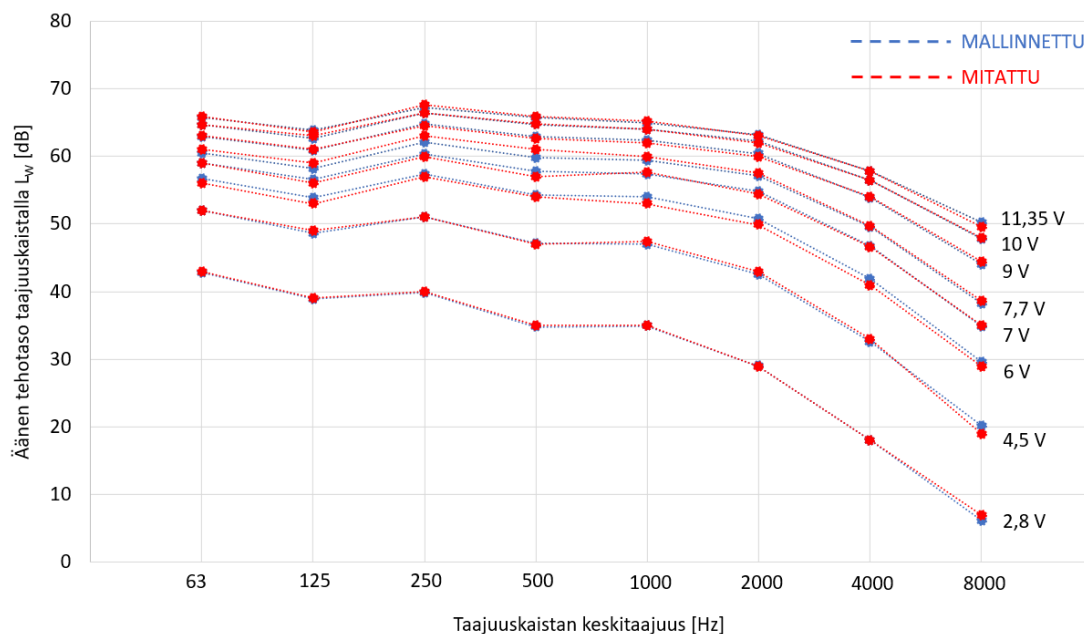
Esimerkkilaskelmasta nähdään, että A-suodatus paljastaa taajuuskaistakohtaisista äänen tehotasoista merkittävimmät taajuuskaistat, kun otetaan huomioon ihmisen melutuntumukset. Merkittävimmiksi taajuuskaistoiksi tässä tapauksessa osoittautuvat A-suodatuksen jälkeen taajuuskaistojen 500, 1000 ja 2000 äänen tehotasot.

Laskettaessa huonetilaan aiheutuvaa ääntä, eivät nämä puhaltimen toiminnasta kanavistoon aiheutuvat merkittävimmät taajuuskaistat välttämättä ole merkittävimpiä, koska eri taajuuskaistat vaimenevat muun muassa äänenvaimentimessa, kanavistossa, päätelaitteessa ja huoneessa eri tavalla. Esimerkiksi huonetilassa eri taajuuskaistojen vaimenemiseen vaikuttaa voimakkaasti huonetilan pintojen pintamateriaalit (Sandberg 2014, osa 2, 68).

Mallinnuksen tuloksesta laadittiin myös laitoskäyrän jyrkkyyden mukaan kuvaajat, joista nähdään laitoskäyrän toimintapisteissä taajuuskaistakohtaisten äänen tehotasojen mallinnuksen tarkkuus.

Kuvassa 48 on esitetty loivimman laitoskäyrän osalta kuvaaja, jossa on mallinnetut ja mitatut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot jokaisessa mitatussa toimintapisteessä. Kuvassa 48 oleva punainen kuvaaja edustaa mitattuja arvoja, joita on korjattu ennen

mallinnusta mittausraportissa esitettyjen mittauserpävarmuuksien osalta ja sininen kuvaaja edustaa näistä mittaustuloksista mallinnettuja äänen tehotasoja yllä esitetyn menetelmän avulla.



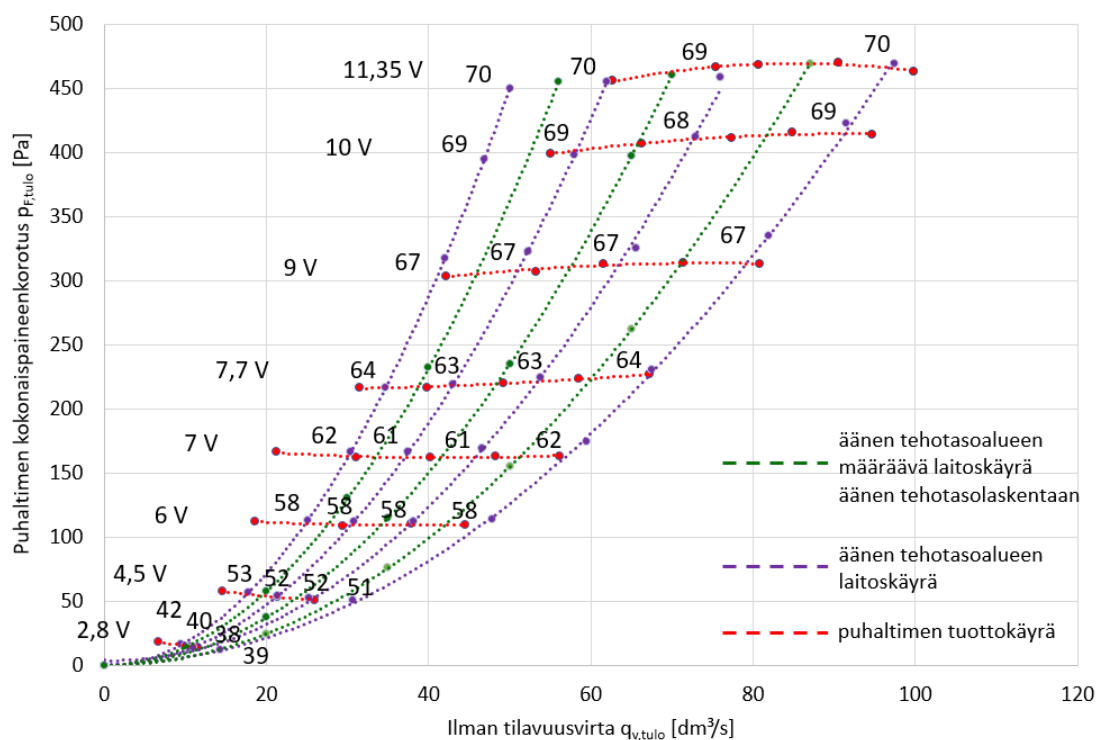
Kuva 48. Mallinnettu ja mitattu tuloilmakanavaan aiheutuva äänen tehotaso taajuuskaistakohtaisesti loivalla laitoskäyrällä puhaltimen eri toimintapisteissä.

Mallinnetut äänen tehotasojen taajuuskaistakohtaiset korjaukset ja mallinnettu A-suodatettu kokonaisääniteho lasketaan mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtötietojen avulla lasketun laitoskäyrän jyrkkyyden mukaan. Tätä varten oli mallinnettava puhaltimen tuottokäyrästä kolme laitoskäyrää, joiden välillä ja niiden ulkopuolella taajuuskaistakohtaiset korjaukset ja A-suodatettu kokonaisääniteho lasketaan.

Kuvassa 49 on esitetty tuloilmapuhaltimen tuottokäyrästä, jossa on esitetty violetilla piirretyt laitoskäyrät ja niiden eri toimintapisteissä vallitsevat mallinnetut A-suodatetut kokonaisäänitehotasot sekä laskentaa varten laitoskäyrän valinnassa käytettävät vihreällä piirretyt neliölliset laitoskäyrät, joiden perusteella valitaan violetti laitoskäyrä, jonka laskentakaavojen perusteella laskenta suoritetaan toimintapisteen mukaan.

Esimerkiksi, jos mitoitusohjelmaan syötettyjen lähtötietojen perusteella lasketun laitoskäyrän jyrkkyys on loivinta vihreää äänen tehotasoaluetta määräävää laitoskäyrää loivempi, laskenta suoritetaan tässä tapauksessa loivimman äänen tehotasoalueen laitoskäyrällä.

Jokaisella kuvassa 49 näkyvällä vihreällä laitoskäyrävälillä ja niiden ulkopuolella laskenta suoritetaan puhaltimen toimintapisteen mukaisella violetin laitoskäyrän äänen tehotasojen mallinnuksen avulla. Näistä muodostettiin ehtolauseke laskentaa varten lasketun laitoskäyrän jyrkkyyden mukaan samaan tapaan, kuten puhaltimen kokonaisyhötysuhteen laskennassa. Ehtolauseke valittavaa kaavaa varten laitoskäyrän jyrkkyydestä riippuvaisena laadittiin jokaisen taajuuskaistan korjaukselle ja A-suodatetulle kokonaisäänitehotasolle.



Kuva 49. Äänen tehotason laskennassa käytettävät laitoskäyrät.

Yllä esitetty mallinnus suoritettiin ilmanvaihtokoneesta lähtevään jokaiseen kanavaan, jotka ovat tuloilmakanavan lisäksi poisto-, ulko- ja jäteilmakanava.

Mitoitusohjelman lopputuloksena esitetään ilmanvaihtokoneesta lähtevään jokaiseen kanavaan yllä esitettyä menetelmää hyödyntäen puhaltimen toimintapistessä lasketut taajuuskaistakohtaiset äänen tehotasot ja näistä laskettu A-suodatettu kokonaisäänitehotaso, jotka saadaan mallinnetun A-suodatetun kokonaisäänitehotason ja mallinnettujen taajuuskaistakohtaisten korjausten avulla.

4.3.2 Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuva äänitaso

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien toiminnasta aiheutuu äänitaso koneen vaipan läpi asennustilaan. Koneen toiminnasta sen asennustilaan aiheutuva äänitaso aiheutuu samaan tapaan, kuten tulo- ja poistoilmapuolten painekanaaviin, mutta tilan ja puhaltimien välillä on koneen vaippa, joka toimii tässä tapauksessa äänenvaimentimena.

Ilmanvaihtokoneen toiminnasta sen vaipan läpi asennustilaan aiheutuvan äänitason osalta mitoitusohjelma esittää äänen tehotason taajuuskaistakohtaisesti ja niiden yhteenlasketun A-suodatetun kokonaisäänitehotason. Lisäksi asennustilaan aiheutuva A-suodatettu äänen painetaso esitetään huonevaimennuksella 4 dB, eli tilassa, jonka pintojen absorptioala on 10 m².

Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänitason osalta oli saatavilla mittaustulokset kahdelta jyrkkyydeltään erilaiselta laitoskäyrältä samaan tapaan, kuten kanaviston osalta, mutta koneen vaipan läpi aiheutuvan äänitehon osalta oli ilmoitettu erikseen tulo- ja jäteilmän tilavuusvirrat eri ohjausjännitteillä ja näillä tulo- ja poistoilmapuhaltimen toimintapisteillä aiheutuva äänen tehotaso taajuuskaistakohtaisesti koneen vaipan läpi asennustilaan.

Näiden mittaustulosten perusteella oli päätettävä mallinnustapa, jolla saadaan ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvasta äänitasosta laskentatulokset riippumatta puhaltimien toimintapisteistä.

Ilmanvaihtokoneen toimiessa sekä tulo- että poistoilmapuhaltimesta aiheutuu äänen tehotaso, joka siirtyy koneen vaipan läpi asennustilaan. Tulo- ja poistoilmapuhaltimen koneen sisälle aiheuttaman tehotason osalta hyödynnettiin aikaisemmin mallinnettuja tulo- ja jäteilmakanaviin aiheutuvia äänen tehotasoja.

Vaikka tulo- ja poistoilmapuhallin ovat eri kammioissa, niiden aiheuttamana äänen tehotasona ilmanvaihtokoneen sisälle käytettiin tulo- ja jäteilmakanaviin aiheutuvaa yhteistä äänen tehotasoa, koska näissä puhaltimien painekanaavissa oleva yhteinen äänen tehotaso on lähellä sitä äänen tehotasoa, joka aiheutuu ilmanvaihtokoneen vaipan

sisälle. Mahdollisesti äänen tehotaso on erilainen puhaltimien painekanavissa, mutta tällä yksinkertaistuksella saatiin lähtökohta mallinnuksen suorittamiselle.

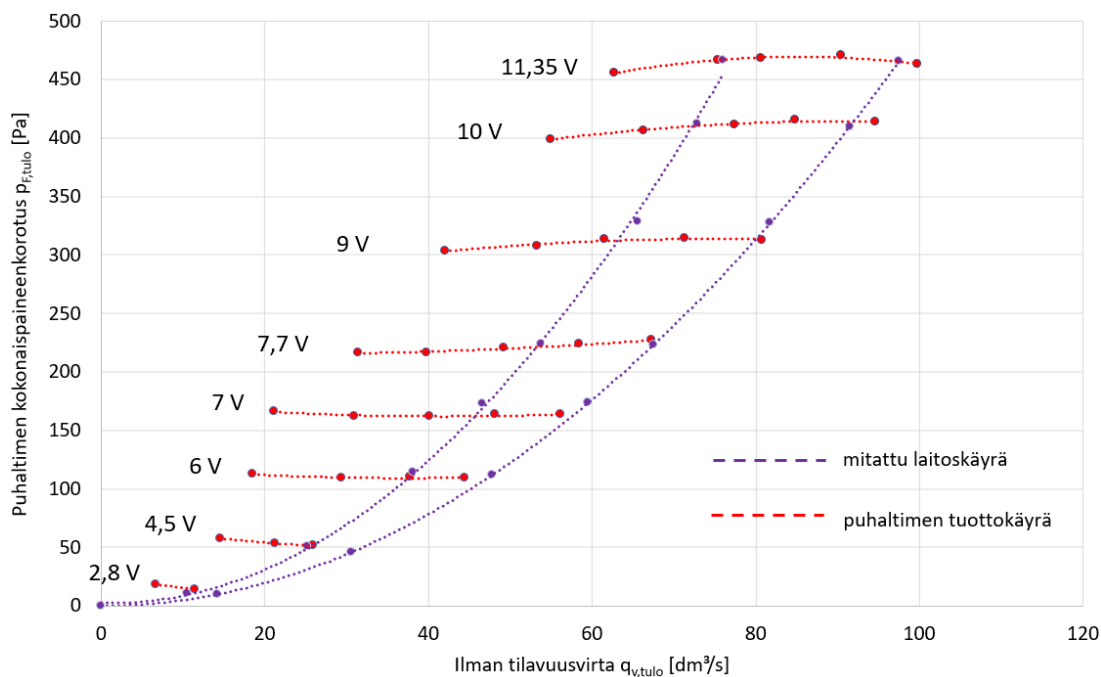
Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänitason mallintamiseksi oli selvitettävä koneen vaipan taajuuskaistakohtainen vaimennus, joka saadaan, kun vähennetään koneen vaipan sisälle aiheutuvasta äänen tehotasosta koneen ulkopuolelle siirtynyt äänen tehotaso jokaisella taajuuskaistalla erikseen. Tarkan mallinnuksen suorittamiseksi olisi todennäköisesti otettava koneen sisällä aiheutuvia äänen vaimenemiseen vaikuttavia monimutkaisia seikkoja huomioon, mutta nämä jätettiin mallinnuksessa huomioimatta, koska yksinkertaistuksen vuoksi mallinnuksen toteutus todettiin riittävän tarkaksi.

Mallinnuksen suorittamiseksi tunnettiin tulo- ja poistoilmapuhaltimen painekanaviin syöttämät äänen tehotasot mallinnuksen perusteella, mutta koneen vaipan vaimennusta koneen sisällä syntyvään äänen tehotasoon ei tunnettu.

Laboratoriomittauksissa ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvat äänen tehotasot puhaltimien toimintapisteissä oli mitattu erilaisissa puhaltimien toimintapisteissä, kuin kanavistoon aiheutuvat äänen tehotasot. Näillä koneen vaipan läpi aiheutuvan äänen tehotason toimintapisteissä kanavistoon aiheutuvat äänen tehotasot saatiin selvitettyä, kun selvitettiin aikaisemmin kehitetyn kanavistoihin aiheutuvan äänen tehotason mallinnuksen avulla tulo- ja poistoilmapuhaltimen syöttämä äänen tehotaso painekanaviin niissä toimintapisteissä, joissa koneen vaipan läpi aiheutuva äänen tehotaso oli mitattu.

Mittaustuloksissa oli esitetty tulo- ja jäteilmän tilavuusvirrat eri ohjausjännitteillä, mutta ei kanaviston painehäviöihin käytettävissä olevaa painetta. Puhaltimien toimintapisteet ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvilla äänen tehotasojen mittaustulosten toimintapisteissä voitiin määritellä aikaisemmin kehitettyjen puhaltimien tuottokäyrästä avulla, kun tunnettiin mitattu ilman tilavuusvirta ja ohjausjännite.

Kuvassa 50 on esitetty tuloilmapuhaltimen osalta tuottokäyrästä, johon on piirretty punaisella puhaltimen ohjausjännitteiden kokonaispaineenkorotuksen tuottokäyrät ja violetilla ilman tilavuusvirran osalta mitatut laitoskäyrät.



Kuva 50. Tuloilmapuhaltimen toimintapisteiden selvittämiseksi tuottokäyrästään piirretyt laitoskäyrät.

Kuvan 50 laitoskäyrien piirtämisessä lähtökohdaksi käytettiin ohjauksen 11,35 V ilman tilavuusvirran edellyttämää kokonaispaineenkorotusta. Tästä lähtökohdasta muut toimintapisteet eri ohjauksilla samalla mitatulla laitoskäyrällä saatiin, kun painehäviöt yksinkertaistettiin pienentyvän ilman tilavuusvirtojen suhteen neliöön. Tätä kokonaispaineenkorotuksen tarpeen riippuvuutta ilman tilavuusvirrasta oli korjattava muutamalla ohjauksella hieman, jotta saatiin toimintapiste riittävän tarkasti ohjauksen tuottokäyrälle.

Yllä esitetyt toimenpiteet oli suoritettava myös poistoilmapuhaltimen osalta, jotta saatiin myös poistoilmapuhaltimen toimintapisteet ilmanvaihtokoneen vaipan sisällä aiheutuvien äänen tehotasojen määrittämiseksi.

Kun kuvan 50 mukaiset ilman tilavuusvirran osalta mitatut ja kokonaispaineenkorotuksen osalta mallinnetut laitoskäyrät oli laadittu, voitiin puhaltimen toimintapisteisiin perustuen määrittää aikaisemmin laaditun mallinnuksen avulla tulo- ja jäteilmakanavaan aiheutuva taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso.

Näistä molemmista laitoskäyristä laadittiin sekä tulo- että poistoilmapuolella taulukko, jossa on kaikilla mitatuilla ohjausjännitteillä laskettu mallinnuksen avulla aiheutuva äänen tehotaso taajuuskaistakohtaisesti vallitsevassa toimintapisteessä.

Taulukossa 12 on esitetty taulukko tuloilmapuolen loivemman laitoskäyrän osalta, jossa on mallinnettu tuloilmakanavaan aiheutuva äänen tehotaso taajuuskaistakohtaisesti. Taulukossa 12 oleva $q_{v,tulo}$ on tuloilman tilavuusvirta (dm^3/s) ja $p_{F,tulo}$ on tuloilmapuhaltimen kokonaispaineenkorotus (Pa) sekä $L_{W,HZ}$ on taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso (dB) ohjausjännitteellä (V) vallitsevassa toimintapisteessä.

Taulukko 12. Tuloilmakanavaan aiheutuva mallinnettu taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso Loivemalla mitatulla laitoskäyrällä puhaltimen eri toimintapisteissä.

	ilmavirta	tuloilma	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso
SA [V]	$q_{v,tulo}$ [dm ³ /s]	$p_{F,tulo}$ [Pa]	L_{W63} [dB]	L_{W125} [dB]	L_{W250} [dB]	L_{W500} [dB]	L_{W1000} [dB]	L_{W2000} [dB]	L_{W4000} [dB]	L_{W8000} [dB]
11,35	97,5	465	66	64	67	66	65	63	58	50
10,00	91,5	410	65	63	66	65	64	62	56	48
9,00	81,8	328	63	61	65	63	62	60	54	44
7,70	67,5	223	60	58	62	60	59	57	50	38
7,00	59,5	174	59	57	60	58	57	55	47	35
6,00	47,8	112	57	54	57	54	54	51	42	30
4,50	30,6	46	52	49	51	47	47	43	33	20
2,80	14,3	10	43	39	40	35	35	29	18	6

Taulukon 12 mukaiset taulukot saatiin laadittua äänen tehotason mallinnuksen avulla, kun tunnettiin toimintapisteen laitoskäyrän jyrkkyys k-kertoimen perusteella, jolloin saatiin määrättyä kaavat jokaisen taajuuskaistan äänen tehotason korjauksen ja A-suodatetun kokonaisäänitehotason laskentaan aikaisemmin esitetyllä periaatteella.

Kun taulukon 12 mukaiset taulukot oltiin laadittu molempien jyrkkyydeltään erilaisten laitoskäyrien osalta sekä tulo- että poistoilmapuolella, voitiin ilmanvaihtokoneen vaiipan läpi aiheutuvan äänen mittauspisteissä syntyvät mallinnetut tulo- ja jäteilmakanaviin aiheutuvat äänen tehotasot laskea logaritmisesti yhteen jokaisessa tulo- ja poistoilmapuhaltimen yhteisessä toimintapisteessä jokaisella taajuuskaistalla (Kaava 39) (Sandberg 2014, osa 2, 56).

$$L_{W,HZ} = 10 * \lg\left(10^{\frac{L_{W,HZ,tulo}}{10}} + 10^{\frac{L_{W,HZ,poisto}}{10}}\right) \quad (39)$$

- $L_{W,Hz}$ = tulo- ja poistoilmapuhaltimen aiheuttama yhteenlaskettu äänen tehotaso taajuuskaistalla, dB
- $L_{W,Hz,tulo}$ = tuloilmapuhaltimen aiheuttama äänen tehotaso taajuuskaistalla, dB
- $L_{W,Hz,poisto}$ = poistoilmapuhaltimen aiheuttama äänen tehotaso taajuuskaistalla, dB

Esimerkiksi loivemmalla laitoskäyrällä tuloilmapuhaltimen 11,35 V toimintapisteessä aiheutuu taajuuskaistalla 63 Hz 66 dB äänen tehotaso tuloilmakanavaan ja vastaavasti poistoilmapuolella 68 dB äänen tehotaso jäteilmakanavaan. Kun nämä lasketaan kaavan 39 avulla logaritmisesti yhteen, saadaan

$$L_{W63} = 10 * \lg \left(10^{\frac{66}{10}} + 10^{\frac{68}{10}} \right) = 70 \text{ dB}$$

Kokonaislukuina tarkasteltuna lisäykseksi suurempaan äänen tehotasoon saatiin yllä esitettyssä esimerkissä 2 dB. Kaavan 39 avulla äänen tehotaso voi maksimissaan nousta 3 dB, kun lasketaan kaksi yhtä suurta äänen tehotasoa yhteen ja esimerkiksi äänen tehotasojen aritmeettisen erotuksen ollessa 6 dB, on lisäys suurempaan äänen tehotasoon 1 dB. Lisäys suurempaan äänen tehotasoon pienenee, kun yhteen laskettavien äänen tehotasojen aritmeettinen erotus suurenee (Sandberg 2014, osa 2, 57).

Tulo- ja poistoilmapuolella äänen tehotasot laskettiin jokaisessa tulo- ja poistoilmapuhaltimen toimintapisteessä yhteen, joissa oli suoritettu ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänitason mittausta. Näistä yhteenlasketuista mallinnetuista äänen tehotasoista laadittiin taulukot molemman mitatun laitoskäyrän jokaisella ohjausjännitteellä, jossa äänen tehotasot on laskettu taajuuskaistakohtaisesti yhteen.

Taulukossa 13 on esitetty ilmanvaihtokoneen vaipan sisälle aiheutuvan taajuuskaistakohtaisen äänen tehotason osalta taulukko loivemman laitoskäyrän osalta, jossa $L_{W,Hz}$ on kaavan 39 avulla yhteenlaskettu taajuuskaistakohtainen tulo- ja poistoilmapuhaltimen aiheuttama äänen tehotaso ilmanvaihtokoneen sisälle (dB) mitatussa ohjausjännitteen toimintapisteessä (V).

Taulukko 13. Mallinnettu ilmanvaihtokoneen sisälle aiheutuva taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso tulo- ja poistoilmapuhaltimen eri toimintapisteissä loivemmalla laitoskäyrällä.

	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	tehotaso	
	L_{W63}	L_{W125}	L_{W250}	L_{W500}	L_{W1000}	L_{W2000}	L_{W4000}	L_{W8000}
SA [V]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
11,35	70	66	69	68	69	68	61	53
10,00	69	65	68	67	68	66	59	50
9,00	67	62	66	65	66	64	57	46
7,70	64	59	64	62	63	60	52	40
7,00	62	58	62	60	61	58	49	37
6,00	59	55	59	57	57	53	44	33
4,50	53	49	52	50	50	44	34	26
2,80	43	39	41	38	37	30	19	17

Ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus koneen sisällä syntyvään taajuuskaistakohtaiseen äänen tehotasoon saatiin, kun vähennettiin aritmeettisesti mallinnetusta koneen vaipan sisällä syntyvästä äänen tehotasosta mitattu koneen ulkopuolelle siirtyvä äänen tehotaso (Kaava 40).

$$\Delta L_{IVK,Hz} = L_{W,IVK,sisä,Hz} - L_{W,IVK,ulko,Hz} \quad (40)$$

$\Delta L_{IVK,Hz}$ = ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus äänen tehotasoon taajuuskaistalla, dB

$L_{W,IVK,sisä,Hz}$ = ilmanvaihtokoneen sisällä syntyvä äänen tehotaso taajuuskaistalla, dB

$L_{W,IVK,ulko,Hz}$ = ilmanvaihtokoneen ulkopuolelle siirtyvä äänen tehotaso taajuuskaistalla, dB

Ilmanvaihtokoneen vaippa vaimentaa ääntä samalla tavalla, kuten esimerkiksi kanavistoon sijoitettava äänen vaimennin, eli koneen vaipan vaimennus ulkopuolelle siirtyvään äänen tehotasoon pitäisi olla taajuuskaistakohtaisesti vakio riippumatta koneen vaipan sisälle syntyvästä äänen tehotasosta.

Kummankin mitatun laitoskäyrän osalta laadittiin taulukko, joissa laskettiin kaavan 40 avulla ilmanvaihtokoneen vaipan sisällä syntyvän ja ulkopuolelle siirtyvän äänen tehotason aritmeettisena erotuksena saatu koneen vaipan vaimennus äänen tehotasoon taajuuskaistalla.

Taulukossa 14 on esitetty loivemman mitatun laitoskäyrän osalta taulukko ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennuksen määrittämiseksi, jossa vaimennus $\Delta L_{IVK,HZ}$ on kaavan 40 avulla laskettu äänen tehotasojen aritmeettinen erotus taajuuskaistalla (dB) ohjauksen jännitteen (V) toimintapisteessä.

Taulukko 14. Laskentatulokset loivemmalla laitoskäyrällä tulo- ja poistoilmapuhaltimen eri toimintapisteissä ilmanvaihtokoneen taajuuskaistakohtaisen vaipan vaimennuksen määrittämiseksi.

	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus
	$\Delta L_{IVK,63Hz}$	$\Delta L_{IVK,125Hz}$	$\Delta L_{IVK,250Hz}$	$\Delta L_{IVK,500Hz}$	$\Delta L_{IVK,1kHz}$	$\Delta L_{IVK,2kHz}$	$\Delta L_{IVK,4kHz}$	$\Delta L_{IVK,8kHz}$
SA [V]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
11,35	5	7	16	21	24	24	31	29
10,00	5	7	16	21	24	23	30	27
9,00	4	7	17	21	24	24	30	23
7,70	3	8	18	21	24	23	28	18
7,00	6	8	19	22	24	23	27	15
6,00	3	9	19	21	24	22	24	10
4,50	5	10	19	17	24	21	17	4
2,80	5	7	14	16	21	16	2	-5

Taulukosta 14 nähdään se, että ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus asennustilaan aiheutuvaan äänen tehotasoon ei ole kaikkien ohjauksen jännitteiden toimintapisteissä aivan sama. Alla on tehty johtopäätökset tästä tilanteesta taulukkoon 14 väritettyjen taajuuskaista-alueiden osalta perustuen siihen, että vaimennuksen pitäisi olla taajuuskaistakohtaisesti vakio riippumatta puhaltimien toimintapisteistä.

- Vaalean ruskealla merkityissä 63 Hz ja 125 Hz sarakkeissa vaipan läpi aiheutuva äänen tehotason mittauksessa taustameluvaatimus oli täyttynyt. Matalien taajuuksien osalta mittaustulosta korjataan standardin mukaan, koska äänenpaineen jakaumaa ei saada täysin tasaiseksi (Halme & Seppänen 2002, 41). Matalimpien taajuuksien mittaaminen on hankalin suorittaa sekä korjausten suorittaminen ei välttämättä anna juuri oikeaa lopputulosta ja tästä syystä oli odotettavissa, että matalimmilla taajuuksilla saatava ilmanvaihtokoneen vaimennuksen lukuarvo vaihtelee puhaltimien toimintapisteissä äänen tehotasojen mallinnuksen epätarkkuudesta huolimatta. Taulukon 14 mukaisista mitattujen laitoskäyrien lasketuista ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennuksen laskentatuloksista otettiin kaikkien laskettujen tulosten osalta keskiarvo ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennuksen määrittämiseksi.

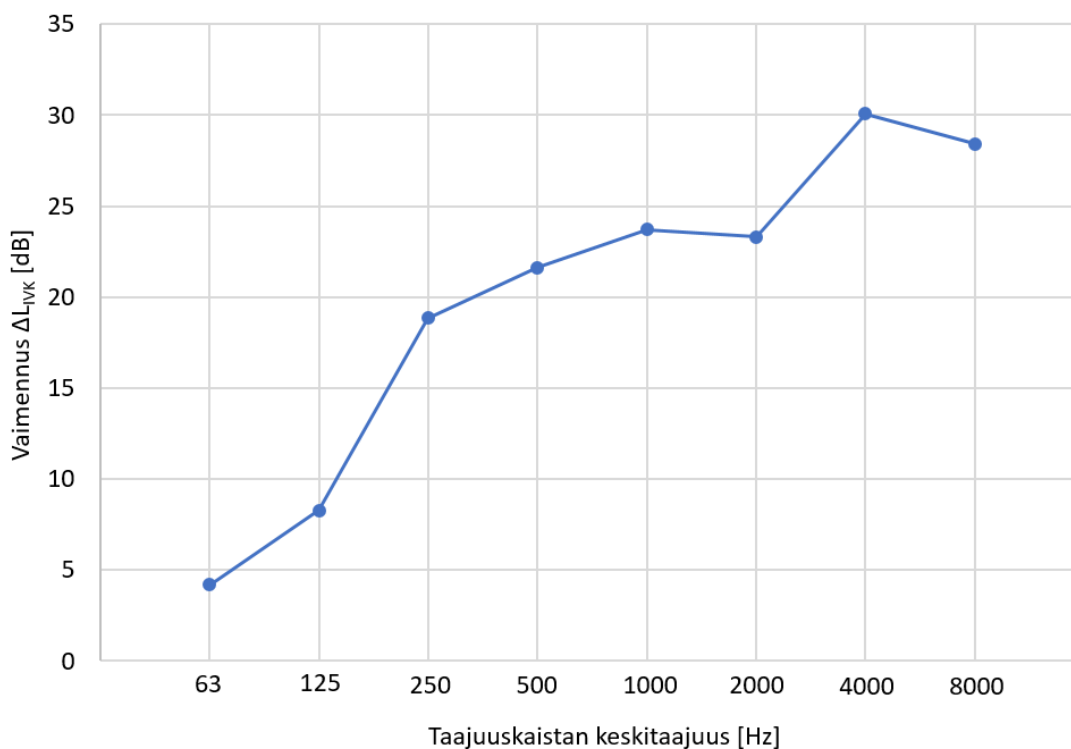
- Vaalean sinisellä merkityissä 250...2000 Hz sarakkeissa vaipan läpi aiheutu-
vassa äänen tehotason mittauksessa taustameluvaatimus oli pääosin täyttynyt,
mutta pienimmällä ohjausjännitteellä vaipan läpi aiheutuva äänen tehotason
mittauksen osalta taustameluvaatimus ei ollut täyttynyt. Tämä ilmenee ohjaus-
jännitteen 2,8 V rivillä pienempänä vaimennuksena. Näillä vaalean sinisellä
merkityillä taajuuskaistoilla otettiin vaipan vaimennuksen määrittämiseksi
keskiarvo molempien laitoskäyrien osalta niistä laskentatuloksista, jotka eivät
eronneet huomattavasti toisistaan, eli laskennan ulkopuolelle jätettiin 2,8 V oh-
jausjännitteen laskentatulokset.
- Harmaalla merkityissä 4000 Hz ja 8000 Hz sarakkeissa vaipan läpi aiheutu-
vassa äänen tehotason mittauksessa taustameluvaatimus oli täyttynyt ainoas-
taan jyrkemmän laitoskäyrän 4000 Hz mittauksessa. Puhaltimien kuormituk-
sen ollessa suurimmillaan suurimmilla ohjausjännitteillä, on myös ilmanvaihtokoneen sisään aiheutuva äänen tehotaso suurimmillaan. Tästä syystä vaipan vaimennuksen määrittämiseksi on perusteltua käyttää suurimpien ohjausjännitteiden laskenta-arvoja, koska pienemmällä ohjausjännitteillä vaimennus on ollut todennäköisesti suurempi, mutta näin pieniä äänen tehotasoja on käytännössä hankala mitata taustamelun vuoksi. Taajuuskaistalla 4000 Hz vaipan vaimennuksen määrittämiseen otettiin keskiarvo molempien laitoskäyrien kolmen suurimman ohjausjännitteen laskentatuloksista ja taajuuskaistalla 8000 Hz vastaavasti kahden suurimman ohjausjännitteen laskentatuloksista.

Ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus äänen tehotasoon taajuuskaistakohtaisesti voitiin määrittää, kun otettiin yllä mainitut taajuuskaista-aluekohtaiset yksityiskohdat huomioon. Taulukkoon 15 on laskettu ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus äänen tehotasoon taajuuskaistakohtaisesti ottaen huomioon molempien mitattujen laitoskäyrien toimintapisteissä lasketut koneen vaipan vaimennukset. Taulukossa 15 $\Delta L_{IVK,Hz}$ on yllä esitetyn periaatteen mukaisesti laskettu koneen vaipan vaimennus koneen sisällä aiheutuvaan äänen tehotasoon taajuuskaistalla (dB).

Taulukko 15. Mallinnettu ilmanvaihtokoneen taajuuskaistakohtainen vaipan vaimennus ilmanvaihtokoneen sisällä aiheutuvaan äänen tehotasoon.

vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus	vaimennus
$\Delta L_{IVK,63\text{Hz}}$	$\Delta L_{IVK,125\text{Hz}}$	$\Delta L_{IVK,250\text{Hz}}$	$\Delta L_{IVK,500\text{Hz}}$	$\Delta L_{IVK,1\text{kHz}}$	$\Delta L_{IVK,2\text{kHz}}$	$\Delta L_{IVK,4\text{kHz}}$	$\Delta L_{IVK,8\text{kHz}}$
[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
4	8	19	22	24	23	30	28

Ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennuksesta laadittiin kuvaaja, joka havainnollistaa äänen tehotason vaimenemisen jakautumista eri taajuuskaistoille (Kuva 51). Kuvasta 51 nähdään se, että matalilla taajuuksilla ääni vaimenee vähemmän verrattuna korkeampiin taajuuksiin samaan tapaan, kuten äänenvaimentimillakin.

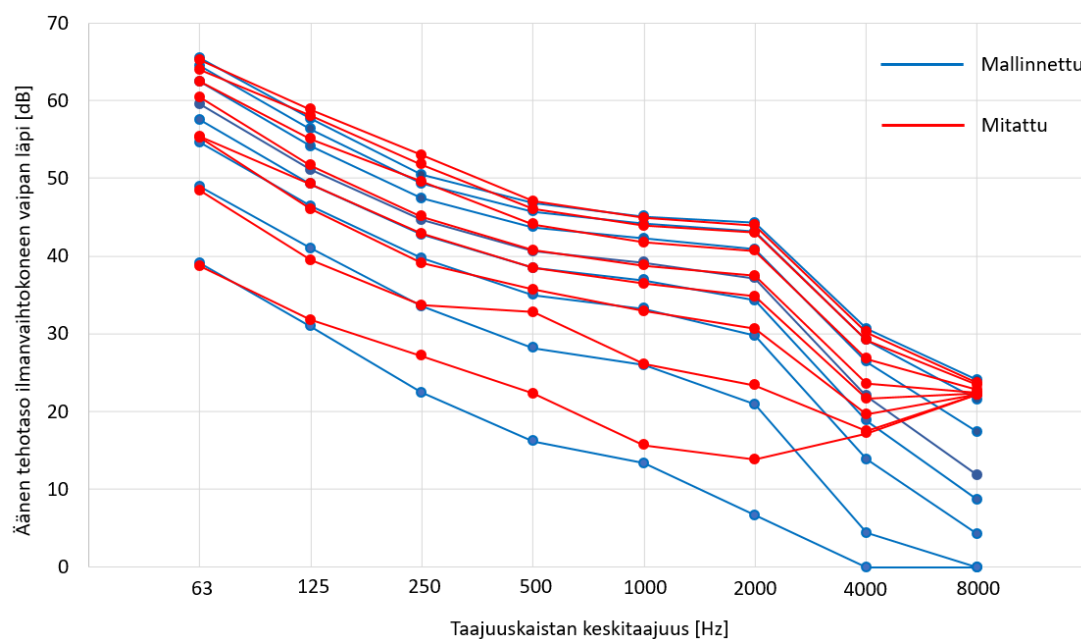


Kuva 51. Mallinnettu ilmanvaihtokoneen taajuuskaistakohtainen vaipan vaimennus ilmanvaihtokoneen sisällä aiheutuvaan äänen tehotasoon.

Ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennuksen avulla voidaan laskea koneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuva taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso, kun ollaan ensin laskettu mallinnuksen avulla tulo- ja jäteilmakanaviin aiheutuvat äänen tehotasot ja laskettu nämä logaritmisesti jokaisella taajuuskaistalla yhteen.

Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänen tehotason mallinnuksen tarkkuus voitiin tarkastella vertaamalla mitattuja mallinnettuihin tuloksiin. Tarkastelun suorittamiseksi mallinnetuista koneen vaipan sisällä syntyvistä äänen tehotasoista vähennettiin aritmeettisesti taajuuskaistoittain määritetty koneen vaipan vaimennus. Mallinnus- ja mittaustuloksista laadittiin yhdistetty kaavio, johon kuvattiin eri ohjausjännitteillä koneen vaipan läpi aiheutuva taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso.

Kuvassa 52 on esitetty loivemman laitoskäyrän osalta kaavio, jossa on esitetty mitatuilla ohjausjännitteillä ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvan äänen tehotason (dB) jakauma taajuuskaistoille. Kuvan 52 kaaviossa olevat siniset kuvaajat ovat mallinnettuja ohjausjännitekohtaisia kuvaajia ja punaiset kuvaajat ovat mitattuja. Mikäli mallinnus ja mittaus vastaisivat täydellisesti toisiaan vallitsevalla ohjausjännitteellä, tulisi mallinnettu ja mitattu kuvaaja olla päällekkäin.



Kuva 52. Mallinnettu ja mitattu ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuva taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso tulo- ja poistoilmapuhaltimen eri toimintapisteissä loivemmalla laitoskäyrällä.

Kuvan 52 kaaviosta nähdään se, että taajuuskaistoilla 63...2000 Hz mallinnus vastaa pääosin hyvin mitattua jokaisella ohjausjännitteellä. Taajuuskaistoilla 4000 Hz ja 8000 Hz mitatut äänen tehotasot ovat suhteellisen suuria etenkin pienillä ohjausjännitteillä, koska näissä taustamelu on todennäköisesti ollut suurempi, kuin koneen vaipan läpi aiheutuva äänen tehotaso. Taajuuskaistoilla 4000 Hz ja 8000 Hz mallinnus vastaa to-

dennäköisesti paremmin äänen tehotasoa, joka läpäisee koneen vaipan, koska vaimennus pitäisi olla taajuuskaistakohtaisesti sama riippumatta aiheutuvasta äänen tehotasosta. Lisäksi kuvan 52 kaaviosta nähdään se, että pienimmillä ohjauksjännitteillä korkeimmat taajuudet vaimenevat kokonaan koneen vaipan vaimennuksen vuoksi, jolloin koneen vaipan läpäisevä äänen tehotaso korkeimmilla taajuuksilla on 0 dB.

Yllä esitetyn mallinnustavan havainnollistamiseksi tätä mallinnustapaa olisi ollut mahdollista hyödyntää myös kanavistoon aiheutuvan äänen tehotason mallinnuksessa, koska puhaltimesta aiheutuu eri kuormitustilanteissa taajuuskaistakohtainen äänen tehotaso, joka siirtyy puhaltimen imu- ja painepuolelle.

Ilmanvaihtokoneen ilmankäsittelyosissa kussakin tapahtuu vaimennus (Halme & Sepänen 2002, 86 - 87). Ilmankäsittelyosien vaimennusta voidaan hyödyntää myös kanavistoon aiheutuvan äänen tehotason laskennassa samaan tapaan, kuten yllä ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuvassa äänen tehotason laskennassa esitettiin.

Yllä esitetty mallinnustapa olisi voitu suorittaa kanavistoon aiheutuvan äänen osalta siten, että oltaisiin esimerkiksi mallinnettu tulo- ja poistopuolella painekanaviin aiheutuva äänen tehotaso taajuuskaistakohtaisesti, kuten aikaisemmin esitettiin tuloilmakanavan osalta. Tämän jälkeen oltaisiin määritetty mallinnuksen avulla ilmankäsittelyosien vaimennus tulo- ja poistoilmapuolella imukanavaan aiheutuvaan äänen tehotasoon taajuuskaistakohtaisesti vertailemalla mallinnettuja painekanavaan ja mitattuja imukanavaan aiheutuvia äänen tehotasoja samassa puhaltimen toimintapisteessä.

Ilmankäsittelyosien vaimennusta hyödyntävällä mallinnustavalla lopputuloksena ilmoitettavat imukanaviin aiheutuvat äänen tehotasot laskettaisiin aritmeettisesti vähentämällä ilmankäsittelyosissa tapahtuva vaimennus painekanavaan aiheutuvasta äänen tehotasosta.

Mitoitusohjelma esittää lopputuloksena taajuuskaistakohtaiset ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuvat äänen tehotasot (dB), jotka lasketaan kaavan 39 avulla yhteenlasketusta tulo- ja poistoilmapuhaltimien painekanaviin aiheuttamista mallinnetuista taajuuskaistakohtaisista äänen tehotasoista, joista vähennetään yllä esitetty taajuuskaistakohtainen ilmanvaihtokoneen vaipan vaimennus.

Lopputuloksena esitetään myös ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso (dB(A)), jonka osalta laskentamenetelmä on esitetty kaavassa 36.

Lisäksi mitoitusohjelma esittää ilmanvaihtokoneen asennustilaan aiheutuvan A-suodatetun äänen painetason (dB(A)) huonevaimennuksella 4 dB, joka vastaa 10 m² koneen asennustilan pintamateriaalien absorptioalaa.

Huonevaimennuksella saavutettavissa oleva A-suodatettu äänen painetaso saadaan, kun lasketaan yhteen ilmanvaihtokoneen vaipan läpi aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso ja huonetilan absorptioalan vaikutus (Kaava 41) (Halme & Seppänen 2002, 16).

$$L_{pA} = L_{WA} + 10 * \lg(4/A) \quad (41)$$

L_{pA} = ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuva A-suodatettu äänen painetaso, dB(A)

L_{WA} = ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso, dB(A)

A = asennustilan absorptioala, m²

Yleensä ilmanvaihtokoneiden asennustilaan aiheuttama A-suodatettu äänen painetaso ilmoitetaan samaan tapaan, kuten esimerkiksi ilmanvaihdon päätelaitteiden vastaava suure, eli niin sanotussa normaalihuoneessa, jonka huonevaimennus on 4 dB. Näin ilmoitettuna A-suodatettu kokonaisäänitehotaso on 4 dB suurempi, kuin A-suodatettu äänen painetaso. (Halme & Seppänen 2002, 54.)

Ilmanvaihtokoneiden valmistajat ilmoittavat yleensä ilmanvaihtokoneen vaipan läpi asennustilaan aiheutuvan A-suodatetun äänen painetason huonevaimennuksella 4 dB, joten A-suodatetun äänen painetason ilmoittaminen samalla tavalla on perusteltua, jotta ilmanvaihtokoneet ovat helposti vertailtavissa.

A-suodatetussa äänen painetasossa on huomattava se, että ilmoitettu huonevaimennus 4 dB on voimassa vain silloin, kun ilmanvaihtokoneen asennustilan pintojen yhteenlaskettu absorptioala on 10 m² ja tähän vaikuttaa esimerkiksi eri taajuuskaistoilla valitseva asennustilan pintojen absorptiokerroin.

Esimerkiksi asuinkerrostaloissa ilmanvaihtokone saatetaan sijoittaa ilman ääntä vaimentavaa koteloita laatoitettuun tilaan, joka toimii sekä WC-tilana että pesuhuoneena. Tässä tilassa huonevaimennus saattaa keskimääräisellä kalustuksella olla +7 dB (LVI 30-10333 2002, 2). Tämä merkitsee sitä, että A-suodatettu äänen painetaso on 7 dB korkeampi, kuin huonetilaan aiheutuva A-suodatettu kokonaisäänitehotaso. Laatoituissa huonetiloissa onkin todennäköistä, että koneen vaipan läpi aiheutuva A-suodatettu äänen painetaso on suurempi, kuin ilmoitettu A-suodatettu kokonaisäänitehotaso.

Ohjeiden mukaan asuinhuoneistokohtainen ilmanvaihtokone olisi ensisijaisesti sijoitettava erilliseen ääniteknisesti osastoituun huonetilaan, jotta välttyttäisiin koneesta ympäristöön aiheutuvalta melulta (LVI 30-10333 2002, 13). Käytännössä tämä on useimmiten eri tekijöistä, kuten asuntojen pienestä koosta ja rakennusneliöiden tehokkaasta hyödyntämisestä johtuen ratkaisu, jota ei voida toteuttaa.

Toisaalta esimerkiksi pesuhuoneessa voidaan sietää ilmanvaihtokoneesta aiheutuvaa ääntä, mutta haasteelliseksi tilanteen tekee se, että useimmiten siirtoilmareitti pesuhuoneeseen järjestetään oviraon avulla, jolloin koneen vaipan läpi aiheutuva äänitaso siirtyy osittain oviraon kautta myös muihin asunnon huonetiloihin.

5 KEHITYSTYÖN TULOS

Kehitystyössä kehitettiin ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman esivalinta- ja mitoitus-työkalua varten laskennan teknisen perustan sisältävät Excel-laskentataulukot, joiden perusteella ohjelmistoyrityksen toimesta laadittavan Internet-selainpohjaisen ilmanvaihtokoneen mitoitusohjelman on tarkoitus suorittaa laskenta mitoitusohjelman käyttäjän syöttämien lähtöarvojen avulla.

Ohjelmistoyritys työsti tämän työn aikana mitoitusohjelmaa. Kehitetyt laskentataulukot tulivat valmistuessaan työn toimeksiantajan lisäksi ohjelmistoyrityksen käyttöön ohjelmointia varten.

Laskentataulukko laadittiin erikseen ilmanvaihtokoneen esivalintaa, puhaltimien sähköhontarvetta ja -energiankulutusta, ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta, ilmanvaihdon lämpöenergiankulutusta ja äänilaskentaa varten.

Erillisten laskentataulukoiden laatiminen erityyppisille laskentatuloksille oli perusteltua, jotta laskentataulukot olisivat loogisesti erillään, jolloin halutun laskentataulukon laskenta ja tekninen perusta voidaan helposti paikantaa.

Kehitysprosessin aikana laskentataulukot pyrittiin laatimaan mahdollisimman havainnollisiksi. Tämän vuoksi laskentaa ja laskentataulukkoa pyrittiin osittelemaan loogisesti ja laskentataulukon yhteyteen pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman paljon kommentteja sekä laskentataulukon soluihin että soluihin sisälle sijoitettaviin ”kommentti”-osioihin. Lisäksi laskentataulukoissa käytettiin eri ilmanvaihtojärjestelmäosuuksille tunnusomaisia värejä, kuten esimerkiksi tuloilmalle punaista ja poistoilmalle keltaista.

Havainnollisuuden ja helppouden vuoksi laskentataulukoiden laskentatulokset, oleelliset mallinnustulokset ja havainnollistavat kuvaajat sijoitettiin keskeisesti yhteen paikkaan, jolloin laskentatulosten ja mallinnusten numeerinen tarkastelu sekä kaavioiden visuaalinen tarkastelu helpottuvat.

Laskentataulukoihin pyrittiin laatimaan mahdollisimman paljon tarpeellisia kuvaajia, joilla havainnollistetaan laskentaa sekä laskennan ja mallinnusten tuloksia. Nämä kuvaajat muuttuvat, kun kuvaajan lähtöarvoja muutetaan. Kuvaajan avulla voidaan nähdä laskennan tilanne, kun muutetaan valitulla ilmanvaihtokoneella laskentaa vaikuttavia arvoja sekä nähdään tilanne, kun muutetaan mittaustulokset toisen koneen mittaustuloksiksi. Esimerkiksi kuvaajan avulla voidaan tarkastella mallinnuksen tarkkuus verraten mallinnettuja mitattuihin arvoihin ja tämän perusteella voidaan tehdä johtopäätökset mallinnuksen onnistumisesta.

Laskentataulukot laadittiin yhdelle välilehdelle. Jokaisen laskentataulukon toiselle välilehdelle laadittiin selostusta ja opastusta antava osio, jossa kerrotaan laskentataulukon osalta laskentatuloksista ja niiden määrittämiseen liittyvästä teknisestä perustasta.

Laskentataulukot oli tarkoitus laatia sellaiseen muotoon, että ne ovat muunneltavissa muidenkin ilmanvaihtokoneiden laskentaa. Tämä seikka toteutettiin siten, että laskentataulukoissa on alueet, joihin mittaustulokset tai mitoitusohjelman käyttäjän syöttämät arvot sijoitetaan. Näiden lähtöarvojen syöttämisen jälkeen laskentataulukoiden on tarkoitus toimia siten, että lähtöarvot ovat viitattuina kaikkiin soluihin, joissa niitä tarvitaan, eli näin laskentatyökalun käyttäjän tarvitsee syöttää lähtöarvot vain kerran yhteen soluun ja sen jälkeen ne viitataan automaattisesti jokaiseen soluun, joissa niitä tarvitaan laskennan ja mallinnusten suorittamiseen.

Näin työn toimeksiantaja voi keskittyä mitoitusohjelman laskentataulukoiden valmiuteen saattamisessa jokaisen ilmanvaihtokoneen osalta olennaiseen, eli laskennan lähtöarvoina toimivien mittaustulosten syöttämiseen laskentataulukoon ja näiden perusteella tuotettujen laskenta- ja mallinnustulosten arviointiin.

Työn aikana laadittu kirjallinen teknisen perusta on tarkoitus toimia ohjeistuksena työn toimeksiantajan henkilöstölle, jotta laskenta voidaan ymmärtää yksityiskohtaisesti. Lisäksi kirjallinen tekninen perusta toimii tiedonlähteenä kaikille, jotka ovat kiinnostuneita asuntoilmanvaihtokoneiden teknisten suoritusarvojen määrittämisestä ja tekniisiin suoritusarvoihin liittyvistä teknisistä perusteista.

6 KEHITYSTYÖN ARVIOINTI

Kehitystyön tuloksena laaditut laskentataulukot laskevat työn toimeksiantajan toivomat laskenta-arvot ja nämä laskentataulukot ovat käytetyn Excel-taulukkolaskentatyökalun joustavuuden puitteissa muuntojoustavia työn toimeksiantajan valmistamille ilmanvaihtokoneille. Suurelta osin Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen teknisten suoritusarvojen perusteella laaditut laskentataulukot voidaan muokata kunkin koneen osalta mitoitusohjelman suorittamaan laskentaan soveltuvaksi muuttamalla laskentataulukoon koneen osalta mittauksissa mitatut arvot ja näin laskentataulukko tulee antamaan valitulla koneella mitoitusohjelmassa esitettävät laskenta-arvot.

Työn aikana laaditut laskentataulukot tulivat kukin valmistuessaan välittömästi työn toimeksiantajan lisäksi ohjelmistoyrityksen käyttöön mahdollistaen mitoitusohjelman toteuttamisen aloituksen ripeällä aikataululla. Kehitystyöllä ollut tarve motivoi saavuttamaan tuloksia, jotta mitoitusohjelma saataisiin ripeästi toteutukseen.

Työn aikana kehitettyjen mallinnusten tarkkuutta tarkasteltiin vertaamalla mallinnettuja tuloksia mitattuihin. Mallinnusten tarkastelu suoritettiin sijoittamalla samaan kaavioon sekä mallinnetut että mitatut tulokset ja näiden avulla oli todennettavissa se, että mallinnukset vastasivat pääsääntöisesti erittäin tarkasti mittaustuloksia ja niiden muuttumisen trendiä, kun esimerkiksi puhaltimen toimintapiste tuottokäyrästöllä muuttuu. Kaaviota tarkastelemalla oli myös mahdollista havaita mahdolliset puutteet mallinnuksessa ja näin ryhtyä mahdollisesti toimenpiteisiin, jotta saataisiin mallinnus tarpeenmukaiselle tarkkuustasolle.

Mallinnusta varten laaditut kuvaajat osoittautuivat erittäin havainnollistaviksi ja hyödyllisiksi. Erityisesti mallinnuksen ja mittauksen vertailu tekee kuvaajista hyödyllisiä apuvälineitä kehitystyöhön. Lisäksi kuvaajan graafisen esityksen avulla voidaan tarkastella teknisen suoritusarvon trendi ja se, että vastaako tämä trendi sitä mitä sen todennäköisesti tulisi vastata. Mikäli kuvaajasta havaitaan poikkeava trendi, voidaan ryhtyä toimenpiteisiin mahdollisen virheen vuoksi. Mallinnuksen suorittamisen kannalta kuvaajat osoittautuivat välttämättömiksi, koska kuvaajasta saadaan mallinnusta varten matemaattinen esitys, jota hyväksikäyttäen voidaan yleistää haluttu suure.

Työssä käytetyt lähtötiedot olivat pääsääntöisesti kattavat. Työn aikana ilmeni ne seikat, joista olisi hyvä olla mittausdataa, jotta voitaisiin olla varmempia mitoitusohjelman antamista laskentatuloksista. Laajempi mittaustulosten saatavuus olisi myös mahdollistanut mittaustulosten mallintamiseen voimakkaamman keskittymisen ja tämä olisi voinut parantaa tuloksen laatua.

Laskentataulukot ja tekninen perusta laadittiin voimassa oleviin määräyksiin, ohjeisiin ja kaavoihin perustuen. Mitoitusohjelmaa varten kehitettyjä laskentataulukkoja tulisi päivittää työn toimeksiantajan toimesta määräysten ja ohjeiden muuttuessa niiden laskenta-arvojen osalta, joihin nämä muutokset vaikuttavat. Laskentataulukoiden päivittäminen on suositeltavaa, jotta laskenta pysyy vallitsevan ajanhetken määräysten ja ohjeiden mukaisena.

6.1 Ilmanvaihtokoneen esivalintatyökalu

Kehitystyössä laadittu työn toimeksiantajan ilmanvaihtokoneiden esivalinnan suorittava laskentataulukko tulee olemaan sellaisenaan mitoitusohjelmaa varten käyttökelpoinen jokaiselle koneelle.

Laskentataulukkoon määritettiin kertoimet, joiden avulla saadaan koneen peruskäyttötilanteen maksimi mitoitusulkoilmavirta koneen esivalintaa varten. Tarvittaessa työn toimeksiantaja voi muuttaa näitä kertoimia, jolloin voidaan vaikuttaa koneiden esivalintaan koneilta sallittavan maksimi mitoitusulkoilmavirran avulla.

6.2 Puhaltimien sähkötehtarve ja sähköenergiankulutus

Ilmanvaihtokoneen puhaltimien sähkötehtarpeen ja -energiankulutuksen laskentataulukon osalta työn toimeksiantajan on todennäköisesti määritettävä konekohtaisesti koneessa aiheutuva painehäviö ilman tilavuusvirran funktiona ja puhaltimien kokonaishyötysuhde sekä tulo- että poistoilmapuolella. Tämä aiheutuu siitä, että nämä laskentaan vaikuttavat arvot ovat mallinnettuja ja nämä arvot todennäköisesti vaihtelevat konekohtaisesti.

Laskentataulukolle tehtävät konekohtaiset muokkaukset ovat todennäköiset koneiden erilaisuuden sekä sen vuoksi, että mallinnus ja laskenta perustuvat puhaltimen sähkön ottotehoon, joka saadaan puhaltimen kokonaispaineenkorotuksen ja kokonaishyötysuhteen avulla. Konekohtaisista muokkauksista aiheutuu se, että työn toimeksiantajan on kirjoitettava koneen painehäviön ja puhaltimen kokonaishyötysuhteen mallinnuksista saatavat kaavat uudelleen laskentataulukossa oleviin niille varattuihin soluihin, jolloin laskentataulukko tulee laskemaan sähkötehotarpeen ja -energiankulutuksen valitun koneen teknisten suoritusarvojen perusteella.

Ilmanvaihtokoneen painehäviötä sekä tulo- ja poistoilmapuolella ei oltu mittauksissa mitattu, vaan nämä oli mallinnettava työn aikana puhallinvalmistajan puhallinohjelmaa hyväksikäyttäen.

Työn toimeksiantajalle annettiin suositus siitä, että koneen painehäviö tulee mitata sekä poisto- että tuloilmapuolella riittävän monessa toimintapisteessä, jotta koneen painehäviön mallinnus olisi konekohtaisesti helppoa. Mittauksiin perustuva mallinnus mahdollistaa koneen painehäviön määrittämisen siten, että mallinnus vastaa mittauksin todennettua tilannetta. Koneen painehäviön mittaus helpottaa laskentataulukoiden muokkaamista konekohtaisesti laskentaan soveltuvaksi.

Työn aikana todettiin se, että puhaltimien sähkön ottoteho tulisi mitata puhallinkohtaisesti. Työn lähtötietoina puhaltimien sähkön ottoteho oli ilmoitettu molempien puhaltimien toimintapisteissä niiden yhteisenä sähkön ottotehona. Puhallinkohtaisen sähkön ottotehon tunteminen helpottaa mallinnusta ja tuo siihen tarkkuutta.

Työn toimeksiantajalle annettiin suositus puhallinkohtaisesta sähkön ottotehon mittauksesta. Mittaussuositus vaikuttaa mallinnuksessa puhaltimien kokonaishyötysuhteeseen ja ei siten ole puhaltimien sähkötehotarpeen ja -energiankulutuksen laskentataulukon jatkokehityksen kannalta ehdoton suositus.

6.3 Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutus

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskennan suorittavan laskentataulukon osalta työn toimeksiantajan on tarkistettava ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jäätymissuojauksen toiminta, joka saattaa toimia muilla koneilla eri tavalla.

Lämmöntalteenoton toiminta vaikuttaa poistoilmasta talteenotettavaan lämpöenergiämäärään ja lämmöntalteenoton toimintaan vaikuttaa ilmanvaihtokoneen automatiikka ja sen asetusarvot. Koneen lämmöntalteenoton toimintaan vaikuttavat asiat voidaan laskentataulukoissa ottaa huomioon muokkaamalla määritettyjä ilmavirran lämpötiloja tietyissä pisteissä ja laskentakaavojen ehtoina olevia lämpötiloja, jolloin lämmöntalteenoton toiminta tulee huomioonotetuksi koneen toiminnan mukaan. Lämpöenergiankulutuksen laskentataulukko on myös päivitettävä konekohtainen jälkilämmityspatterin maksimiteho.

Lisäksi ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen ja ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen määrittämisen kannalta työn toimeksiantajan on määritettävä konekohtaisesti mitattu tuloilman lämpötilahyötysuhde tulo- ja poistoilman massavirtojen ollessa yhtä suuret. Tämä on konekohtainen mitattu ominaisuus, jonka mallintaminen tuloilman tilavuusvirran funktiona onnistuu, kun ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskentataulukko sijoitetaan oikeaan paikkaan mittauksissa mitatut tuloilman lämpötilahyötysuhteet vallitsevalla tuloilman tilavuusvirralla. Tämän jälkeen kaaviosta saatu mallinnuksen tulos on päivitettävä laskentataulukoihin, jotta mitattu tuloilman lämpötilahyötysuhde määritetään valitulla koneella tuloilman tilavuusvirran funktiona oikein.

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskentataulukko kehitettiin vuositason laskentaa varten TRY2012 testivuoden tuntikohtaisiin ulkoilman lämpötilatietoihin perustuen.

Kehitetty laskentataulukko laskee ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen testivuoden jokaisesta tunnista ja tämä tekee laskentataulukon laskennasta tarkan, kun ei oteta huomioon vuotuista vaihtelevaa ulkoilman lämpötilaa. Mitoitusohjelman kehityksen

aikana ei ollut tietoa muiden olemassa olevien mitoitusohjelmien vuotuisen lämpöenergiankulutuksen laskennan perusteista. Laskentatulokset kehitettiin kuvaamaan samaa kulutustietoa, jotta mitoitusohjelmista saatavat tulokset ovat vertailukelpoisia.

Ilmanvaihdon lämpöenergiankulutuksen laskennassa oli tehtävä yksinkertaistus ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton lämmönsiirtimen huurteensulatuksen osalta, koska huurteensulatuksen toiminnan mallintaminen riittävällä tarkkuudella koettiin kehitystyön puitteissa hankalaksi. Tämä vaikuttaa laskennalliseen lämpöenergiankulutukseen vähentävästi, joka määrältään on haastava arvioida, koska huurteensulatusjaksojen määrään vaikuttaa ulkolämpötilan lisäksi asunnossa aiheutuva kosteuskuoritus.

Huurteensulatuksen mallintamisesta syntyi kehitystyön aikana ideoita, joiden avulla huurteensulatuksen toiminta voisi olla mallinnettavissa kohtuullisella tarkkuudella ja näin lämpöenergianlaskenta voitaisiin saada tarkemmaksi. Huurteensulatuksen mallinnuksen myötä myös ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin vuotuinen lämpöenergiankulutus tarkentuisi, koska huurteensulatuksen toiminta ja huurteensulatusjaksojen määrä vaikuttavat jälkilämmityspatterin huipputehontarpeeseen ja lämpöenergiankulutukseen.

Huurteensulatuksen mallintamisesta ja sen huomioon ottamisesta tehtiin työn toimeksiantajalle ehdotus, jota hyödyntäen laskentataulukon laskentaa voidaan tarkentaa.

6.4 Ilmanvaihtokoneesta aiheutuva äänitaso

Laskentataulukoiden muuntojoustavuus toteutuu yleisesti hyvin, mutta äänilaskentataulukko oli haastava laatia helposti muunneltavaksi. Äänilaskenta edellyttää muihin laskentataulukoihin verrattuna raskaan mallinnuksen ja tästä johtuen mallinnuksessa tarvittavia kaavoja tarvitsee mahdollisesti kirjoittaa konekohtaisesti uudelleen, jotta laskentataulukko laskee valitulla koneella äänitiedot siten, että nämä tulokset kuvaavat valitun koneen suorituskykyä.

Toisaalta äänilaskennan suorittamiseksi ei ollut kehitystyön aikana löydettävissä vaivattomampaa tapaa mallintaa koneen äänitekniisiä suoritusarvoja, joten tämä poikkeus muuntojoustavuuteen oli hyväksyttävä.

Äänilaskentataulukon osalta työn toimeksiantajan on suoritettava jokaisen ilmanvaihtokoneen osalta sovitus koneen suoritusarvoihin, jotta laskentataulukko saadaan sovitetuksi valitulle koneelle.

Kehitetyillä mallinnusmenetelmillä teknisten suoritusarvojen yleistyksen tulivat kuvaamaan haluttua teknistä suoritusarvoa pääasiallisesti suurella tarkkuudella. Äänitekniisten suoritusarvojen yleistäminen mallinnuksen avulla oli haastavaa ja lisäksi niiden mittaaminenkin on haastavaa. Tästä johtuen mitoitusohjelman avulla annettaviin äänitekniisiin suoritusarvoihin on suhtauduttava kriittisesti, koska todellinen ilmanvaihtokoneen äänitekniinen suoritusarvo saattaa olla ilmoitettua suurempi tai pienempi. Mallinnusten maltillisen epätarkkuuden lisäksi äänitekniiset laboratoriomittaustulokset edustavat mittaustuloksen ylärajaa, joten itse mittaustulos saattaa olla liian suuri.

Koneen aiheuttama äänen tehotaso sekä kanaviin että koneen vaipan läpi huonetilaan oli mitattu jyrkkyydeltään kahdella erilaisella laitoskäyrällä. Työn aikana todettiin se, että äänen tehotaso tulee olla mitattuna mielellään neljällä jyrkkyydeltään erilaisella laitoskäyrällä, jotta äänen tehotason muuttumiselle on mahdollista kehittää luotettava trendi kanaviston virtausvastusten muuttuessa.

Äänen tehotasojen kattavammasta mittauksesta annettiin työn toimeksiantajalle suositus, koska kattavien mittaustulosten avulla konekohtaiset muokkaukset voidaan suorittaa mahdollisimman vaivattomasti mittauksiin perustuen. Kehitystyössä äänen tehotasojen muuttumisen trendi virtausvastusten muuttuessa mallinnettiin puhallinvalmistajan puhallinohjelmaa hyväksikäyttäen. Kattavammat äänen tehotasojen mittaukset mahdollistavat sen, että äänen tehotasojen muuttumisen trendi voidaan mallintaa vain mittauksiin perustuen ja näin saavutetaan mallinnukselle suurempi tarkkuus ja vaivattomuus jatkekehityksen aikana.

LÄHTEET

Antson, A., Kukkonen, P., Nyman, M. & Saari, M. Energiatehokkaan pientalon ilmanvaihto-opas. 2014. Espoo; VTT Expert Services Oy.

CASA-äänenvaimentimen tekniset tiedot. 2016. Kaarina: Swegon ILTO Oy. Viitattu 31.10.2017. <http://www.swegon.com/fi/>

Enervent Oy:n www-sivut. Viitattu 20.8.2017. <https://www.enervent.com/fi/>

Halme, A. & Seppänen, O. 2002. Ilmastoinnin äänitekniikka. Helsinki: Suomen LVI-liitto SuLVI ry.

Ilmanvaihtokäsikirja. 2017. Kaarina: Swegon ILTO Oy. Viitattu 20.8.2017. http://www.swegon.com/Global/PDFs/Home%20ventilation/General/_fi/Swegon_Handbook_FI.pdf

Iloxair-laskentaohjelma (versio 1.72). 2014. Raisio: Iloxair Oy.

Iloxair Oy:n www-sivut. Viitattu 20.8.2017. <http://www.iloxair.fi/>

Kalliomäki, P. 2017. Asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitus. Esitys RakMK D2:n (2012) ilmanvaihtomäärien päivitystyöpajassa 21.8.2017.

Komission asetus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta. 2014. Komission asetus (EU) N:o 1253/2014.

KTS ja KTSS tuloilmaventtiilien tekniset tiedot. 2017. Turku: Fläkt Woods Oy. Viitattu 31.10.2017. <http://www.flaktwoods.fi/>

Kurnitski, J. 2007. Pientalojen ilmanvaihto ja ilmanpitävyys. Teoksessa Rakennustieto (toim.) Rakentajain kalenteri. Helsinki: Rakennustieto, 415 - 424.

Luonnos YMa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2017. <http://www.ym.fi/lahesnollaenergiarakentaminen>

LVI 30-10333. Ilmanvaihtolaitteiden äänitekniinen suunnittelu ja äänenvaimennus asuinrakennuksissa. 2002. Helsinki: Rakennustieto.

LVI 30-10529. Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho SFP. 2013. Helsinki: Rakennustieto.

MyVallox-ilmanvaihtokoneen ohje. 2017. Loimaa: Vallox Oy. Viitattu 1.9.2017. <https://www.vallox.com/>

Rakennusten energialaskennan testivuodet 2012. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu 7.9.2017. <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>

Sandberg, E. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, Ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus, Ilmastointitekniikka osa 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Seppänen, O. 2017. Asuntojen ilmanvaihto-ohje, erityisesti kerrostaloasuntojen osalta. Esitys RakMK D2:n (2012) ilmanvaihtomäärien päivitystyöpajassa 21.8.2017.

SFP-opas. 2009. 3. painos. Helsinki: LVI-talotekniikkateollisuus ry. Viitattu 1.9.2017. <https://www.energiakoulutus.fi/images/stories/archive/rakm/sfp-opas-painos3-v2009-heinakuu.pdf>

Suomen LVI-liitto SuLVI ry:n www-sivut. Viitattu 26.8.2017. <https://www.sulvi.fi/>

Suomen RakMK C1. 1998. Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.

Suomen RakMK D2. 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Suomen RakMK D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Suomen RakMK D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.

Suomen RakMK D5. 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Suomen RakMK G1. 2005. Asuntosuunnittelu. Määräykset ja ohjeet 2005. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.

Swegon ILTO Oy:n www-sivut. Viitattu 20.8.2017. <http://www.swegon.com/fi/>

Tasauslaskentaopas 2012. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu 7.9.2017. <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>

Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen ohje. 2017. Loimaa: Vallox Oy. Viitattu 3.9.2017. <https://www.vallox.com/>

Vallox 096 MC -ilmanvaihtokoneen virtaus-, lämpö- ja äänitekniisten suoritusarvojen mittausraportit. 2013. Espoo; VTT Expert Services Oy.

Vallox 121 MC -ilmanvaihtokoneen käyttö-, huolto- ja tekniset ohjeet. 2013. Loimaa: Vallox Oy. Viitattu 1.9.2017. <https://www.vallox.com/>

Vallox Capto PTC EC -sädinkuvun ohje. 2017. Loimaa: Vallox Oy. Viitattu 3.9.2017. <https://www.vallox.com/>

Vallox Oy:n www-sivut. Viitattu 19.8.2017. <https://www.vallox.com/>

Valtion ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Viitattu 21.8.2017. <http://www.ymparisto.fi/fi-FI>