



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

EERIK MÄKITALO
ENERGIATEHOKKUUDEN JA SISÄILMASTON MITTAUKSIA
OLEMASSA OLEVISSA KOULURAKENNUKSISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Timo Kalema
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden ja ympäristötekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 5. lokakuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö – ja energiatekniikan koulutusohjelma

MÄKITALO, EERIK: Energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksia olemassa olevissa koulurakennuksissa

Diplomityö, 102 sivua, 12 liitesivua

Tammikuu 2012

Pääaine: Talotekniikka

Tarkastaja: professori Timo Kalema

Avainsanat: Energiatehokkuus, energiankulutus, koulu, langaton mittaus, mittaus, sisäilmasto

Tämä diplomityö on osa Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksen projektia ”Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen”. Työn päätavoitteina on tutkia, mitä mittauksia vaaditaan, että saataisiin kohtalaisen hyvin selvitettyä koulurakennusten energiatehokkuus ja sisäilmaston taso. Lisäksi keskeisenä osana on saada selville yksityiskohtaista tietoa kahden lämmönkulutukseltaan poikkeavan koulurakennuksen energiatehokkuudesta ja sisäilmastosta erilaisilla energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksilla. Taustalla on vaikuttanut myös riittävien lähtötietojen saaminen koulurakennusten energiankulutusta paremmin kuvaavien laskentamallien taustalle, jotka ovat osa projektia, mutta eivät kuulu tähän diplomityöhön.

Työssä on painotettu energiatehokkuuden osalta erityisesti lämmönkulutusta, koska siinä on huomattu edellisten tutkimusten perusteella olevan suuri hajonta. Koulurakennusten lämmönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat ulkovaipan lämmöneristävyys ja ilmanpitävyys, ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmät, rakennusautomaatio ja sen taso sekä koulun kiinteistöhoitajat ja käyttäjät. Koulurakennusten lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät eivät ole siis pelkästään teknisiä. Energiatehokkuus ei saisi koskaan mennä ihmisten terveyden edelle, minkä johdosta työssä on tarkasteltu myös sisäilmaston tasoa mittauskohteissa. Sisäilmastoon liittyviä asioita ovat muun muassa lämpötila, veto ja ilmanlaatu.

Edellä mainittuihin lämmönkulutuksen osatekijöihin liittyviä mittauksia on tehty kahdessa koulussa, joista käytetään tunnuksia A ja B. Koulu A on lämmönkulutukseltaan vähän kuluttava koulu ja koulu B on paljon kuluttava. Lämpötilaolosuhteita ja ilmanlaatua on mitattu kouluissa laajoilla langattomilla mittausverkoilla. Lisäksi kohteissa on tehty lämpökamerakuvaus sekä määritetty ilmavirrat. Koulussa A on myös suoritettu ilmanpitävyyden mittaus ja määritetty ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton hyötysuhteet.

Tehtyjen mittausten perusteella koulujen A ja B välillä on jonkin verran teknisiä eroja, esim. ilmanvaihdon lämmön talteenotossa, jotka vaikuttavat lämmönkulutuksen eroihin. Työn aikana on kuitenkin käynyt selville, että syyt eivät ole pelkästään rakenteisiin ja järjestelmiin liittyviä. Myös kiinteistöhoitajilla ja ylemmillä kiinteistöistä vastaavilla henkilöillä on iso vaikutuksensa rakennusten energiatehokkuuteen. Kuitenkin sisäilman lämpötilojen, hiilidioksidipitoisuuksien ja ilmavirtojen mittaus antaa arvokasta energiankulutusta selittävää tietoa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

MÄKITALO, EERIK: Energy Efficiency and Indoor Environment Measurements in Existing School Buildings

Master of Science Thesis, 102 pages, 12 Appendix pages

January 2012

Major: Building Services Engineering

Examiner: Professor Timo Kalema

Keywords: Energy efficiency, energy consumption, indoor environment, school, measurement, wireless measurement

This diploma thesis is the part of a research "Improving the energy efficiency of public buildings" that is been carried out at Department of Mechanics and Design in Tampere University of Technology. The main goal of this thesis is to study what kinds of measurements are needed in order that the energy efficiency and indoor environment of school buildings could be evaluated well enough. In addition, one central stage is to find out a detailed energy efficiency and indoor environment knowledge from two schools that have small or big heat consumption with using various energy efficiency and indoor environment measurements. On background is also to get satisfactory initial data related to a building energy model that could represent better energy consumption of school buildings. The building energy model is not part of this thesis.

In this thesis it has been concentrated especially on heat consumption because previous investigations have showed a big dispersion in heat consumption of school buildings. The elements which have an influence to heat consumption of school buildings are the thermal resistance of the envelope and the air-tightness of a house, the ventilation and heating system, the building automation system, real estate managers and users of school. Thus, the elements are not only technical items. The energy efficiency is not ever allowed to be more important than the health of people. That is why in this thesis it is also concentrated to the indoor environment. It handles for example temperature, draught and air quality.

Measurements are done in two schools, school A and B related to the foregoing elements of heat consumption. The school A has big heat consumption and the school B has small heat consumption. Temperature conditions and air quality have measured in schools with wide wireless networks. In addition, it has been done infrared photography with an infrared camera and air flow measurements in schools. In school A it has also done air-tightness measurement and measurements related to heat recovery efficiency of air supply units.

Based on measurements there are technical items that have an influence to heat consumption of schools A and B. During the research it has come out that reasons are not only related to building constructions and systems. Real estate managers and higher people who are responsible for buildings have also a big influence on energy efficiency of buildings. However, indoor temperature, CO₂- and air flow measurements give valuable information for evaluating the energy efficiency of school buildings.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksella osana tutkimusprojektia Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen.

Haluan kiittää erityisesti työn tarkastajana ja ohjaajana toiminutta professori Timo Kalemaa, mutta myös lähintä esimiestäni diplomi-insinööri Jari Rintamäkeä ja ulkomaille töihin siirtynyttä lähes juuri valmistunutta diplomi-insinööri Erkkä Harju-Sänttiä arvokkaista neuvoista diplomityöhöni liittyen sekä kaikesta muusta diplomityötäni edistäneestä tuesta.

Haluan myös kiittää vanhempiani, sisaruksiani ja ystäviäni saamastani tuesta. Erityinen kiitos Tampereen teknillisellä yliopistolla työskenteleville ystävilleni tekniikan kandidaatti Toni Yleniukselle ja tekniikan kandidaatti Markus Fager-Pintilälle saamistani vinkeistä diplomityöhöni liittyen ja erityisesti virvoittavista kahvi- ja ruokailuhetkistä työnteon lomassa.

Toivon, että diplomityöni tuloksista on mahdollisimman paljon hyötyä.

Tampereella 15. päivänä joulukuuta 2011

SISÄLLYS

1.	Johdanto	1
1.1.	Tutkimuksen tausta	1
1.2.	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	1
1.3.	Tutkimuksen suoritus, menetelmät ja rakenne	2
2.	Koulurakennusten energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä	3
2.1.	Rakennusten energiatehokkuuden määritelmä	3
2.2.	Lämmönkulutus	4
2.2.1.	Lämmönkulutuksen jakautuminen	4
2.2.2.	Ulkovaipan lämmöneristävyys	6
2.2.3.	Ulkovaipan ilmanpitävyys	9
2.2.4.	Ilmanvaihto	11
2.2.5.	Lämmitysjärjestelmät	21
2.2.6.	Rakennusautomaatio	24
2.3.	Sähkönkulutus	24
2.4.	Kiinteistönhoitajat ja käyttäjät	26
3.	Koulurakennusten sisäilmastoon vaikuttavia tekijöitä	28
3.1.	Sisäilmaston määritelmä	28
3.2.	Koulurakennusten sisäilmastoon vaikuttavia tekijöitä	29
3.2.1.	Termiset olosuhteet	29
3.2.2.	Ilmanlaatu	30
4.	Koulurakennusten energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksia	32
4.1.	Langaton mittausteknologia	32
4.1.1.	Langattoman mittausverkon toiminta	32
4.1.2.	Langattomat mittalaitteet	34
4.2.	Lämpökameramittaukset	37
4.3.	Ilmanpitävyysmittaukset	40
4.3.1.	Ilmanpitävyyden määrittäminen painekoemenetelmällä	40
4.3.2.	Ilmanpitävyyden määrittäminen merkkiainemenetelmällä	41
4.4.	Ilmanvaihtokanavan – ja venttiilien ilmavirtojen mittaus	44
4.4.1.	Ilmavirtausmittauksiin liittyviä mittalaitteita	44
4.4.2.	Putkivirtauksen ominaisuuksien asettamat rajoitukset	50
4.4.3.	Ilmavirtojen mittaus ilmanvaihtokanavasta	52
4.4.4.	Ilmavirtojen mittaus tulo- ja poistoilmalaitteelta	54
4.5.	Energiankulutusmittaukset	55
5.	Esimerkkikoulut	56
5.1.	Koulujen valinta	56
5.2.	Pienen lämmönkulutuksen omaava koulu A	58
5.3.	Suuren lämmönkulutuksen omaava koulu B	59
6.	Koulujen mittausjärjestelyt	61
6.1.	Koulujen A ja B langaton mittausjärjestely	61

6.2. Koulujen A ja B lämpökamerakuvaus	63
6.3. Koulujen A ja B ilmanvaihtokanavien ja – venttiilien mittaus	64
6.4. Koulun A ilmanpitävyyden mittaus	65
7. Koulujen mittaustuloksia ja niiden tarkastelu	67
7.1. Koulun A mittaustuloksia	67
7.1.1. Lämpötilaolosuhteet.....	67
7.1.2. Ilmanlaatu	70
7.1.3. Ilmanpitävyyden mittaus ja lämpökamerakuvaus.....	71
7.1.4. Ilmanvaihtokanavien ja – venttiilien ilmavirtojen mittaus	72
7.1.5. Lämmön talteenoton mittaukset.....	74
7.1.6. Pieneen lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät.....	75
7.2. Koulun B mittaustuloksia.....	76
7.2.1. Lämpötilaolosuhteet.....	76
7.2.2. Ilmanlaatu	80
7.2.3. Lämpökamerakuvaus	82
7.2.4. Ilmanvaihtokanavien ja – venttiilien ilmavirtojen mittaus	83
7.2.5. Suureen lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät	85
7.3. Suurimmat erottavat tekijät koulujen välillä.....	86
8. Mittausjärjestely rakennuksen energiatehokkuuden ja sisäilmaston arviointiin.....	90
9. Yhteenveto ja johtopäätökset	94
Lähteet.....	97
Liite 1: Sisäilmastoluokat S1-S3	103
Liite 2: Koulun A numeroidut pohjapiirustukset	104
Liite 3: Koulun B numeroidut pohjapiirustukset	105
Liite 4: Koulun A ensimmäisen ja toisen kerroksen langaton mittausjärjestely	108
Liite 5: Koulun B ensimmäisen ja toisen kerroksen langaton mittausjärjestely	109
Liite 6: Koulun A ilmanpitävyydsmittausten mittausjärjestelyä.....	111
Liite 7: Koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimi- ja maksimilämpötilat.....	112
Liite 8: Ilmanvaihtokoneiden käyntiaikojen määrittäminen koulussa A.....	113
Liite 9: Koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimi- ja maksimilämpötilat.....	114

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A_E	Rakennuksen ulkovaipan pinta-ala (m ²) (SFS-EN 13829 2000, s.18).
A_{ivk}	Ilmanvaihtokanavan poikkipinta-ala (m ²).
a	Päätelaitteen aukeama (mm).
a_L	Suorakaiteen muotoisen ilmanvaihtokanavan leveys (m).
b_L	Suorakaiteen muotoisen ilmanvaihtokanavan korkeus (m).
C_0	Merkkiainepitoisuus tilassa, kun $t = 0$ (ppm) (Seppänen 1988, s.324).
C_C	Merkkiaineen kokonaispitoisuus tilassa (ppm) (NT VVS 019 1988, Annex 1).
C_i	Merkkiaineen taustapitoisuus (ppm) (Seppänen 1988, s.324).
D	Pyöreän ilmanvaihtokanavan halkaisija (m).
d	Rakenteen yksittäisen rakennekerroksen paksuus (m).
k	Päätelaittekohtainen säätöarvo (tulo- ja poistoilmalaitteet).
k_2	Paikkakuntakohtainen korjauskerroin Jyväskylään (Motiva 2011a).
N_1	Suojaetäisyyskerroin virtaussuunnassa ennen ilmavirtojen mittauskohtaa (SFS 5512 1989, s.4).
N_2	Suojaetäisyyskerroin virtaussuunnassa ilmavirtojen mittauskohdan jälkeen (SFS 5512 1989, s.4).
n	Ilmanvaihtokerroin (1/h) (D2 2008, s.3).
n_{50}	Rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla ulkoilmaan nähden (1/h) (D5 2007, s.5).
$n_{vuotoilma}$	Rakennuksen vuotoilmakerroin (1/h) (D5 2007, s.5).
p_d	Dynaaminen paine (Pa).
p_s	Staattinen paine (Pa).
p_t	Kokonaispaine (Pa).
Q_{kok}	Rakennuksen kaikki lämmitysenergiankulutus yhteensä (kWh, kWh/m ² , kWh/m ³ , ...) (Motiva 2011a).
$Q_{lämmin\ käyttövesi}$	Lämpimän käyttöveden lämmittämiseen menevä lämmitysenergia (kWh, kWh/m ² , kWh/m ³ , ...) (Motiva 2011a).
Q_{norm}	Rakennuksen normitettu lämmitysenergian kulutus (kWh, kWh/m ² , kWh/m ³ , ...) (Motiva 2011a).
$Q_{toteutunut}$	Rakennuksen tilojen lämmitykseen kuluva energia (kWh, kWh/m ² , kWh/m ³ , ...) (Motiva 2011a).
q_{pLTO}	Poistoilmavirta lämmön talteenoton kautta (dm ³ /s) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.15).
q_{tLTO}	Tuloilmavirta lämmön talteenoton kautta (dm ³ /s) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.15).

$Q_{v,kok}$	Rakennukseen tai tilaan tuleva kokonaisilmavirta (m^3/s) (D5 2007, s.20).
$Q_{v,tulo}$	Rakennuksen tuloilmaventtiilien ja ulkovaipan virallisten korvausilmareittien kautta sisään tuleva ilmavirta (m^3/s).
$Q_{v,vuotoilma}$	Rakennuksen vaipan vuotokohtien kautta sisään tuleva vuotoilmavirta (m^3/s).
R	Rakenteen kokonaisvastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
R_b	Maan lämmönvastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
Re	Reynolds'in luku.
R_g	Ohuen ainekerroksen lämmönvastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
R_{LTO}	Tuloilmavirran q_{tLTO} suhde poistoilmavirtaan q_{pLTO} (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.15).
R_q	Rakennuskerroksessa olevan ilmakerroksen lämmönvastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
R_{se}	Rakenteen ulkopuolinen pintavastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
R_{si}	Rakenteen sisäpuolinen pintavastus (m^2K/W) (C4 2002, s.5).
S_N vpkunta	Normaalivuoden tai – kuukauden (1971–2000) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla (Motiva 2011a).
$S_{toteutunut}$ kunta	Vuoden tai kuukauden toteutunut lämmitystarveluku tarkastelussa olevassa kunnassa (Motiva 2011a).
$S_{toteutunut}$ vpkunta	Vuoden tai kuukauden toteutunut lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla (Motiva 2011a).
TI	Lämpötilaindeksi (%) (Ratu 1213-S 2005, s.2).
T_i	Sisäilman lämpötila ($^{\circ}C$) (Ratu 1213-S 2005, s.2).
T_j	Jäteilman lämpötila ($^{\circ}C$) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
T_o	Ulkoilman lämpötila ($^{\circ}C$) (Ratu 1213-S 2005, s.2).
T_{sp}	Sisäpinnan lämpötila ($^{\circ}C$) (Ratu 1213-S 2005, s.2).
T_s	Sisäilman lämpötila ($^{\circ}C$) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
T_{tLTO}	Tuloilman lämpötila lämmön talteenoton jälkeen ($^{\circ}C$) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
T_u	Ulkoilman lämpötila ($^{\circ}C$) (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
U	Rakenneosan lämmönläpäisykerroin (W/m^2K).
V	Rakennuksen tai tilan sisätilavuus (m^3) (SFS-EN 13829 2000, s.18; D5 2007, s.20).
\dot{V}_{50}	Painekoemenetelmässä 50 Pa paine-erolla puhaltimen kautta siirtyvä tilavuusvirta (m^3/h) (SFS-EN 13829 2000, s.18).

v_i	Ilman virtausnopeus (m/s).
η_p	Poistoilman lämpötilasuhde (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
η_t	Tuloilman lämpötilasuhde (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).
λ	Rakenteen yksittäisen rakennekerroksen/materiaalin lämmönjohtavuus (W/mK).
ρ_i	Ilman tiheys (kg/m ³).
τ_n	Nimellinen aikavakio (h).

Bruttoala (brm²): rakennuksen kaikkien kerrostasojen kerrostasoalojen summa riippumatta siitä onko tila lämmin vai kylmä (D5 2007, s.4).

Emissiivisyys (emittanssi, emissiokerroin): Todellisen pinnan oman lämpötilansa perusteella lähettämän lämpösäteilyn, emission, suhde mustan kappaleen ideaalisen pinnan vastaavassa lämpötilassa lähettämään säteilyyn (Mills 1999, s.15).

Energian ominaiskulutus, energiatehokkuusindikaattori: energiankulutus tiettyä palvelua tai tuoteyksikköä kohden, esimerkiksi rakennuksen bruttoalaa kohden.

Gateway-laite: Langattoman mittausverkon laite, joka välittää mittausdatan Internetiin.

Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä: rakennuksessa on useampia ilmanvaihtokoneita, esimerkiksi luokkahuoneittain on oma ilmanvaihtokone.

Ilmanvaihto: huoneilman laadun ylläpitämistä ja parantamista huoneen ilmaa vaihtamalla (D2 2008, s.3).

Ilmanvaihdon lämmön talteenotto: rakennuksesta poistuvasta poistoilmasta otetaan lämpöä talteen, joka siirretään yleensä ilmanvaihtolaitteelle tulevaan ulkoilmaan lämmönsiirtimen kautta.

Kerrostasoala (m²): kerrostason ala, joka rajoittuu kerrostasoa ympäröivien ulkoseini- en ulkopintoihin tai ulkoseinän ajateltuun jatkumiseen aukkojen ja koristeosien osalta (D5 2007, s.4).

Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä: kaikki rakennukseen tuleva ja sieltä lähtevä ilma menevät iv-konehuoneissa olevien ilmanvaihtokoneiden kautta, missä tapahtuu lämmön talteenotto poistoilmasta tuloilmaan.

Konvektio: Kaasun tai nesteen liikkeen johdosta tapahtuva lämmön- tai aineensiirto (Mills 1999, s.17).

Kylmäsilta: rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtava rakenneosana, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvissa olosuhteissa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi (C4 2002, s.3).

Lämmitetty nettoala (m^2): lämmitettyjen kerrostasoalojen summa kerrostasoja ympäröivien ulkoseinien sisäpintojen mukaan laskettuna (D3 2011).

Lämmitysenergian kulutuksen normitus: rakennusten lämmitysenergiankulutusta korjataan lämmitystarveluvulla, jotta voitaisiin vertailla saman rakennuksen kulutuksia eri kuukausina tai vuosina sekä eri kunnissa sijaitsevien rakennusten ominaiskulutuksia (Motiva 2011a).

Lämmitystarveluku: sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksen aikaintegraali (Motiva 2011a).

Lämmitystarveluku S17: sisälämpötilan $+17\text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötilan erotuksen aikaintegraali (Motiva 2011a).

Lämmön ostoenergia (kWh): rakennuksen todellinen lämmönkulutus, joka voidaan mitata.

Lämpösäteily: Kappaleen oman lämpötilansa perusteella lähettämää sähkömagneettista säteilyä (Mills 1999, s.13).

Lämpötilaindeksi: Seinän sisäpinnan dimensioton lämpötila kuvaa rakennuksen vaipan lämpöteknistä toimintaa.

Mittauksen toistuvuus: suureen saman arvon peräkkäisten mittaustulosten yhtäpitävyys, kun yksittäiset mittaukset suoritetaan lyhyin aikavälein, samalla menetelmällä, saman havaittajan toimesta, samoilla mittalaitteilla, samassa paikassa ja olosuhteissa (Sirén 1995, s.21).

Mittauslaitteen ajautuma: mittauslaitteen mittaussuurensuurensien muutos tietyn (pitkähkön) ajanjakson kuluessa normaaleissa käyttöolosuhteissa (Sirén 1995, s.21).

Mittauslaitteen hystereesi: mittaussuureen muuttumisen viivästyminen niin, että hetkellinen suureen arvo ei riipu ainoastaan mittaushetkellä vaikuttavista tekijöistä, vaan myös suureen aikaisemmasta kehityksestä. Mittausarvo on siis tietyn todellisen mittaussuureen kohdalla erilainen riippuen siitä onko mittaussuureen muutossuunta kasvava vai vähenevä (Aumala 1999, s.160).

Mittauslaitteen stabiilius: mittauslaitteen kyky säilyttää mittausominaisuutensa (Sirén 1995, s.78).

Mittauslaitteen tarkkuus: mittauslaitteen kyky antaa virheettömiä tuloksia (Sirén 1995, s.21).

Mittausresoluutio (erottelukyky, erottelukynnys): anturin kyky erottaa toisistaan lähellä olevia mittaussuureen arvoja eli kuinka pienet erot näkyvät mitattavan suureen arvossa. (Aumala 1999, s.160).

Nettolämpöenergia (kWh): Lämmöntuottotavan hyötysuhteella kerrottu lämmityksen ostoenergia tai rakennuksen energiankulutuksen laskennassa tilojen, käyttöveden ja ilmanvaihdon nettolämmityksen vaatima energia.

Oleskeluvyöhyke: huonetilan osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta 1,8 m:n korkeudelle lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydelle seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista (Sisäilmastoluokitus 2008, s.5).

Operatiivinen lämpötila (°C): Sen tasalämpöisen tilan lämpötila, jossa kehon lämmönsiirto on sama kuin tarkasteltavassa tilassa (Kalema 2008). Kuvaa sisäilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen (D2 2008, s.3).

Palautusilma: ilma, missä on kahden tai useamman eri huonetilan poistoilmaa (D2 2008, s.4).

Rakennuksen ilmatilavuus (m³): huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan laskettu pinta-alan ja huonekorkeuden tulo, johon huomioidaan väliseinät, mutta ei välipohjia (D5 2007, s.4).

Rakennuksen ulkovaippa: rakennuksen rakenteet, jotka erottavat sisä- ja ulkoilman toisistaan eli alapohja, ulkoseinät, ovet ja ikkunat sekä yläpohja.

Rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyys (ilmatiiviys, tiiviys): ulkovaipan ominaisuus estää ilmavuotoja rakennuksen sisä- ja ulkoilmaston välillä.

Rakennustilavuus (rak-m³ tai m³): tila, jota rajoittavat alapohjan alapinta, ulkoseinien ulkopinnat ja yläpohjan yläpinta (D5 2007, s.4).

Regeneratiivinen lämmönsiirrin: lämpöä varastoiva lämmönsiirrin, missä tulo- ja poistoilma virtaavat lämpöä varaavan massan läpi (Alanne 2010).

Rekuperatiivinen lämmönsiirrin: levylämmönsiirrin, missä tulo- ja poistoilmavirta eivät sekoitu toisiinsa ja lämpö siirtyy lämpöpinnan läpi lämpimältä puolelta kylmälle puolelle (Alanne 2010).

Sekoittava ilmanjako: ilmanjakotapa, missä on tavoitteena saada sekoitettua tuloilma nopeasti ja tasaisesti huoneilmaan yleensä suurehkolla nopeudella huoneen yläosista (Seppänen & Seppänen 1996, s.193).

Syrjäyttävä ilmanjako: ilmanjakotapa, missä viileä tuloilma tuodaan oleskeluvyöhykkeelle hiljaisella nopeudella syrjäyttäen lämmin ja likainen ilma (Seppänen & Seppänen 1996, s.193).

Terminen viihtyvyys: ihmisen aistima yksilöstä riippuva viihtyisyys sisäilman termisiin olosuhteisiin eli lämpötiloihin sekä ilman virtausnopeuteen ja kosteuteen.

Tilan tai huoneen ilmatilavuus (m^3): huoneen sisäpintojen rajoittaman tilakappaleen tilavuus (D5 2007, s.4).

Vuotoilmanvaihto (1/h): vaipan läpi tapahtuva hallitsematon ilmanvaihto.

1. JOHDANTO

1.1. Tutkimuksen tausta

Kevään 2008 aikana toteutettiin teemaan ”Energiatehokkuuden huomioon ottaminen julkisella sektorilla” liittyen esiselvitys, jonka perusteella oli tarkoitus käynnistää laajempia tutkimuksia vuoden 2009 aikana. Esiselvityksen taustalla vaikutti sekä Euroopan Unionin asettamat tavoitteet ja määräykset, ilmastonmuutoksen hidastaminen, että julkisen sektorin velvollisuus toimia esimerkkinä energiatehokkuuden huomioimisessa. Yhtenä teemaan liittyneenä osa-alueena oli julkisen sektorin rakennusten energiatehokkuus. Esiselvityksessä tutkittiin Suomen kuntien koulujen, päiväkotien, terveydenhoito- ja asuinrakennusten lämmön- ja sähkönkulutuksia sekä kyseisten rakennusten kulutusten hajontaa. Koulut olivat tehdyn esiselvityksen perusteella suurin absoluuttisen lämmön- ja sähkönkulutuksen omaava ryhmä sadan kunnan otoksesta. Esiselvityksessä myös havaittiin, että eri rakennustyyppien välillä ja lisäksi saman rakennustyyppin sisällä lämmön- ja sähkönkulutuksessa oli havaittavissa suurta hajontaa. Lämmönkulutuksen hajonta oli tehdyn esiselvityksen mukaan erityisen suurta. (Kalema & Sahakari 2008)

Tehdyn esiselvityksen perusteella aiheeseen liittyen käynnistyi laajempi tutkimus ”Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen” Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitoksella syksyllä 2009. Tutkimus ulottui vuoden 2011 loppuun asti ja tutkimuksen teemana on ollut julkisen sektorin rakennusten energiatehokkuuden nykyisen tilan tarkka selvittäminen, luotettavien energiatehokkuusindikaattoreiden sekä energiatehokkuuden analysointityökalujen kehittäminen ja niiden tuominen alan päättäjien ja toimijoiden käyttöön. Projektin yhtenä keskeisimpänä osa-alueena on ollut rakennusten kalibroidun energiankulutuksen laskentamallin kehitys. Kalibroidulla energiankulutuksen laskentamallilla tarkoitetaan sitä, että rakennukselle ennen korjausta tai rakentamista tehtävä energiankulutuksen arvio olisi mahdollisimman lähellä toteutunutta energiankulutusta, mikä rakennuksella on korjauksen tai rakentamisen jälkeen. Nykyään laskentamallit antavat usein liian pieniä kulutuksia verrattuna toteutuneisiin kulutuksiin (Kalema & Sahakari 2008, s.58). Jotta kalibroidusta energiankulutuksen laskentamallista saataisiin riittävä tarkka, niin laskentamallin kehitykseen liittyen on tehtävä riittävän yksityiskohtaisia mittauksia.

1.2. Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämä diplomityö on osa Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksella käynnissä olevaa projektia ”Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen”. Kalibroitu energiankulutuksen laskentamalli vaatii tuekseen riittävän tarkat mittaukset. Tämän työn päätavoitteena on tutkia, mitä mittauksia laskentamallin kehitykseen vaaditaan sekä saada selville yksityiskohtaista tietoa muutaman yksittäisen julkisen ra-

kennuksen energiatehokkuudesta ja sisäilmastosta. Työhön liittyen on valittu yksityiskohtaiseen mittaukseen kaksi koulua. Koulurakennukset on valittu tarkempaan mittaukseen sen tähden, koska ne ovat eniten lämpöä kuluttava rakennusryhmä kuntien rakennuskannasta. Mittauskohteiden valinnassa on painotettu erityisesti lämmönkulutusta, koska siinä esiintyi esiselvityksen perusteella suurin hajonta (Kalema & Sahakari 2008). Toinen kouluista on lämmönkulutukseltaan vähän kuluttava kohde ja toinen paljon kuluttava kohde. Kohteissa on tarkoitus selvittää sisäilman lämpötilat, ilmanvaihtomäärät ja muita kohteiden energiatehokkuuden sekä laskentamallin kehityksen kannalta oleellisia mittauksia. Sisäilmaan liittyvillä mittauksilla on pyritty selvittämään ilmanvaihdon riittävyttä mittauksen kohteena olevissa kouluissa.

Päätuloksina työstä pyritään saamaan yksityiskohtaista tietoa mittauskohteiden energiatehokkuuden ja sisäilmaston tilasta sekä samalla pohjatietoa kalibroidun energiankulutuksen laskentamallin kehitykseen. Tarkoituksena on myös pohtia, ovatko tehdyt mittaukset riittävän yksinkertaisia laskentamallin vaatimien lähtötietojen selvittämiseksi ja rakennusten energiatehokkuuden arvioinnissa yleisesti. Mittaukset pitäisi kyetä tekemään mahdollisimman edullisesti ja mieluiten automatisoidusti.

1.3. Tutkimuksen suoritus, menetelmät ja rakenne

Tutkimus on aloitettu suorittamalla ensin riittävän lähtöselvityksen jälkeen energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittaukset kahdessa koulurakennuksessa. Koulurakennukset on valittu mittaukseen lämmönkulutuksen perusteella tutkimuksen aikana käytössä olleesta tietokannasta. Tehdyistä mittauksista on tehty kaksi tutkimusraporttia, joita on hyödynnetty myös tässä diplomityössä.

Tutkimukseen on kuulunut oleellisena osana mittausmenetelmien taustalla valitsevaan teoriaan syventyminen. Ensin on käsitelty yleisellä tasolla energiatehokkuuden ja sisäilmastoon vaikuttavia tekijöitä kuten esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmiä. Yleiskuvan saaminen on välttämätöntä mittausmenetelmien ymmärtämiseksi. Vastatämän jälkeen on paneuduttu tarkemmin itse mittausmenetelmiin. Käytettyjä mittausmenetelmiä voi myös hyödyntää muissakin kuin olemassa olevissa koulurakennuksissa.

2. KOULURAKENNUSTEN ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

2.1. Rakennusten energiatehokkuuden määritelmä

Energiatehokkuus voidaan erottaa osittain energiansäästöstä, mutta ei täysin. Energiansäästöllä tarkoitetaan useimmiten energiankäytön absoluuttista vähentämistä. Energiatehokkuus taas tarkoittaa suuremman tuoton aikaansaamista tiettyä panosta vastaan. Kulluttajien hankkiessa enemmän hyödykkeitä elintason noustessa kasvaa usein samaan aikaan sekä energiatehokkuus että energiankulutus. Hyödykkeitä on enemmän, mutta ne ovat energiatehokkaampia kuin aikaisemmin. (Energiatehokkuus ja parhaat käytännöt 2011, s.4).

Energiatehokkuuden mitaksi on kehitetty erilaisia energiatehokkuusindikaattoreita, joilla voidaan kuvata energiatehokkuutta. Suomessa käytetään rakennusten energiatehokkuuden mittarina energian ominaiskulutusta, jolla tarkoitetaan energiankulutusta tiettyä palvelua tai tuoteyksikköä kohti laskettuna (TEM 2011). Rakennusten osalta virallinen energiatehokkuusindikaattori on Suomessa tällä hetkellä kWh/bruttoala eli kWh/bruttoala, jonka mukaan on määritetty erilaisille rakennustyypeille energiatehokkuusluokat A-G siten, että vuoden 2009 jälkeen rakennusten energiatehokkuusluokituksessa on täytynyt vähentää lämmittämättömät tilat bruttoalasta (Energiatodistusopas 2007, s.2). Bruttoalan (brm^2) virallisella määrittelyllä tarkoitetaan rakennuksen kaikkien kerrostasojen kerrostasoalojen summaa riippumatta siitä onko tila lämmin vai kylmä. Kerrostasoala on taas kerrostason ala, joka rajoittuu kerrostasoa ympäröivien ulkoseinien ulkopintoihin tai ulkoseinän ajateltuun jatkumiseen aukkojen ja koristeosien osalta. (D5 2007, s.4). Rakennuksen energiatehokkuus siis paranee, jos rakennuksen absoluuttinen energiankulutus pienenee ja/tai rakennuksen bruttoala kasvaa.

Virallisen energiatehokkuusindikaattorin lisäksi yleisesti Suomessa käytössä oleva energiatehokkuusindikaattori on kWh/rakennustilavuus (kWh/rak-m^3 tai kWh/m^3). Rakennustilavuudella tarkoitetaan tilaa, jota rajoittavat alapohjan alapinta, ulkoseinien ulkopinnat ja yläpohjan yläpinta (D5 2007, s.4). Vuonna 2012 voimaan astuvien uusien rakentamismääräysten myötä uudeksi viralliseksi energiatehokkuusindikaattoriksi tulee kWh/lämmitetty nettoala eli kWh/m^2 . Lämmitetyllä nettoalalla tarkoitetaan lämmitettyjen kerrostasoalojen summaa kerrostasoja ympäröivien ulkoseinien sisäpintojen mukaan laskettuna (D3 2011). Näin ollen seinän läpimitan kasvattaminen ei enää kasvata energiatehokkuutta. Energiatehokkuusindikaattoreina voidaan lisäksi käyttää myös monia muita indikaattoreita.

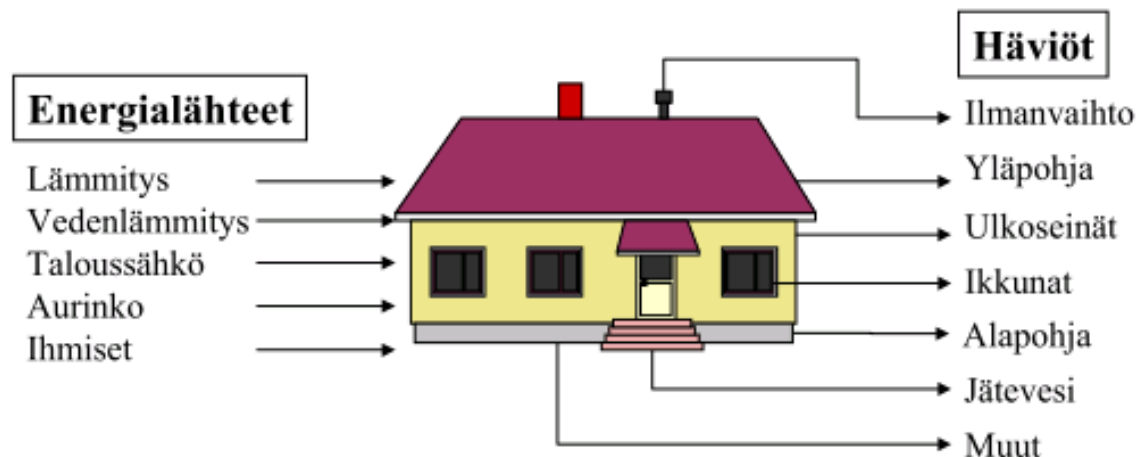
Rakennuksen energiatehokkuus riippuu siis absoluuttisen energiankulutuksen lisäksi paljon siitä, mitä energiatehokkuusindikaattoria käytetään. Toisella energiatehokkuusindikaattorilla rakennus saattaa näyttää hyvin energiatehokkaalta ja taas toisella indikaattorilla hyvinkin energiatehottomalta. Esimerkiksi korkeita tiloja sisältävä raken-

nus omaa paljon rakennustilavuutta suhteessa bruttoalaan, jolloin sen energiatehokkuus indikaattorilla kWh/m³ voi olla erittäin hyvä. Energiatehokkuus indikaattorilla kWh/brm² voi olla taas huono, vaikka kohteen absoluuttinen energiankulutus ei olisi-kaan kovin suuri. Tässä diplomityössä on energiatehokkuusindikaattoreiden yhteydessä käytetty molempia energiatehokkuusindikaattoreita kWh/brm² ja kWh/m³, jotta indikaattoreiden aiheuttama vääristymä on saatu kompensoitua.

2.2. Lämmönkulutus

2.2.1. Lämmönkulutuksen jakautuminen

Kuvassa 2.1 on esitettyä rakennukseen tulevat ja siitä poistuvat energiavirrat. Sähköenergiaa lukuun ottamatta kaikki muu liittyy lämmönkulutukseen. Lämpöenergiaa tulee rakennukseen lämmityksen, vedenlämmityksen, sähkölaitteiden aiheuttaman lämpökuorman, auringon säteilyn ja ihmisten lämpökuorman vaikutuksesta. Lämpöenergiaa taas häviää pääasiassa ilmanvaihdon lämmitykseen, johtumishäviöiden kattamiseen rakennuksen vaipan eri osissa sekä jäteveden mukana lämmitetyn käyttöveden muodossa. Koulurakennusten lämmönkulutus jakautuu siis karkeasti rakennuksen lämmitykseen, ilmanvaihtoon ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen. Rakennuksen lämmitys pyrkii kattamaan rakennuksen vaipan läpi johtumisella ja vuotoilmanvaihdon kautta tapahtuvat lämpöhäviöt ja koneellisen ilmanvaihdon lämmityksen. Vuotoilmanvaihto on vaipan läpi tapahtuvaa hallitsematonta ilmanvaihtoa.



Kuva 2.1. Rakennukseen tulevat ja siitä poistuvat energiavirrat (Hemmilä & Saarni 2002, s.61).

Lämmönkulutuksen suhteellinen jakautuminen riippuu siis ilmanvaihdosta, ulkovaipan lämmöneristävytydestä ja ilmanpitävyydestä, lämpimän käyttöveden kulutuksesta, taloteknisten järjestelmien tehokkuudesta (lämpökuormat laitteista) sekä tilan käyttöasteesta (lämpökuormat ihmisistä). Ilmanvaihdon lämmittämiseen kuluvan lämpöenergian suuruuteen voidaan paljolti vaikuttaa ilmanvaihdon lämmön talteenotolla. Ilmanvaihdon lämmön talteenotolla tarkoitetaan sitä, että rakennuksesta poistuvasta

poistoilmasta siirretään lämpöä ulkoa tulevaan ulkoilmaan lämmönsiirtimen kautta. Ulkovaipalla tarkoitetaan rakennuksen rakenteita, jotka erottavat sisä- ja ulkoilman toisistaan. Näitä sisä- ja ulkoilman toisistaan erottavia rakennuksen rakenteita ovat alapohja, ulkoseinät, ovet ja ikkunat sekä yläpohja. Kyseiset rakenteet toimivat lämpöä eristävinä kerroksina sisä- ja ulkoilman välillä. Vaipan ilmanpitävyys (ilmatiivyys, tiiviys) kuvaa taas ulkovaipan ominaisuutta estää ilmavuotoja rakennuksen sisä- ja ulkoilmaston välillä.

Lämmitysenergian kulutuksen osalta on myös huomioitava, että Pohjois-Suomessa sijaitseva koulurakennus kuluttaa luonnollisesti enemmän lämpöenergiaa kuin Etelä-Suomessa sijaitseva johtuen kylmemmistä sääolosuhteista. Jotta sääolosuhteiltaan erilaisilla alueilla sijaitsevia rakennuksia voisi vertailla keskenään, rakennusten lämmönkulutukset on normitettava. Lämmitysenergian kulutuksen normitus tarkoittaa, että rakennusten lämmitysenergiankulutusta korjataan lämmitystarveluvulla, jotta voitaisiin vertailla saman rakennuksen kulutuksia eri kuukausina tai vuosina sekä eri kunnissa sijaitsevien rakennusten ominaiskulutuksia.

Lämmitystarvelukujen käyttö normituksessa perustuu siihen, että rakennuksen lämmitysenergiankulutus on lähes verrannollinen sisä- ja ulkolämpötilojen erotukseen eli lämmitystarveluku saadaan laskemalla yhteen kuukauden jokaisen vuorokauden sisä- ja ulkolämpötilan erotus. Useimmiten käytetään lämmitystarvelukua S17 eli sisälämpötilana käytetään + 17 °C. Rakennuksen lämmitysenergian tarvetta pienentävien auringon säteilyn ja sisäisten lämpökuormien kuten esimerkiksi valaistuksesta, ihmisistä ja laitteista tilojen lämmityksen hyödyksi saatavan energian oletetaan kattavan sisälämpötilan + 17 °C ja todellisen sisälämpötilan eron. Lämmitystarveluvun laskennassa ei oteta huomioon päiviä, joiden osalta vuorokautinen keskilämpötila on keväällä yli + 10 °C ja syksyllä yli 12 °C. Ilmatieteen laitos laskee normitukseen tarvittavat lämmitystarveluvut kuukausi- ja vuositasolla 16 vertailupaikkakunnalle (Motiva Oy 2011a; Ilmatieteen laitos 2011). Normituksessa käytetään myös hyväksi vertailukautta eli normaalivuotta perustuen vuosien 1971–2000 lämmitystarvelukuihin. Vuonna 2011 pitäisi ilmestyä vuosiin 1981–2010 perustuva normaalivuosi.

Jos halutaan laskea esimerkiksi saman rakennuksen normitettu energiankulutus eri ajanjaksoina, niin käytetään seuraava yhtälöä (Motiva 2011a).

$$Q_{norm} = \frac{S_N \text{ vpkunta}}{S_{toteutunut} \text{ vpkunta}} Q_{toteutunut} + Q_{lämmin käyttövesi}, \quad (1)$$

missä Q_{norm} on rakennuksen normitettu lämmitysenergian kulutus, $Q_{toteutunut}$ rakennuksen tilojen lämmitykseen kuluva energia ($Q_{kok} - Q_{lämmin käyttövesi}$), Q_{kok} rakennuksen lämmitysenergiankulutus yhteensä, $Q_{lämmin käyttövesi}$ lämpimän käyttöveden lämmittämiseen menevä lämmitysenergia, $S_N \text{ vpkunta}$ normaalivuoden tai – kuukauden (1971–2000) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla ja $S_{toteutunut} \text{ kunta}$ on vuoden tai kuukauden toteutunut lämmitystarveluku kyseessä olevassa kunnassa. On tärkeää valita oikea vertai-

lupaikkakunta. Käytettävä normitusyhtälö riippuu siitä halutaanko verrata vain saman rakennuksen eri vuosien tai kuukausien kulutuksia keskenään tai eri rakennuksia keskenään, jotka voivat sijaita samalla vertailupaikkakunnalla tai eri puolilla Suomea. Näihin on tarjolla erilaisia laskentayhtälöitä. Eri puolilla maata olevia rakennuksia voidaan verrata keskenään, jos ne on normitettu yhtälön 2 mukaisesti (Motiva Oy 2011a).

$$Q_{norm} = k_2 \frac{S_N \text{ vpkunta}}{S_{toteutunut} \text{ vpkunta}} Q_{toteutunut} + Q_{\text{lämmin käyttövesi}}, \quad (2)$$

missä k_2 on paikkakunta-kohtainen korjauskerroin Jyväskylään ja $S_{toteutunut}$ vpkunta on vuoden tai kuukauden toteutunut lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin lämmönkulutuksen osa-alueisiin eli lämmitykseen, ilmanvaihtoon ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen vaikuttavia tekijöitä. Luvuissa käsitellään koulurakennuksiin liittyen lämmöneristävyys, ilmanpitävyys, lämmitysjärjestelmät, ilmanvaihto, lämmin käyttövesi ja rakennusautomaatio. Myöhemmin käsitellään myös koulurakennusten kiinteistöhoitohenkilöstö ja käyttäjät, sillä heillä on myös paljon merkitystä rakennusten energiatehokkuuteen.

2.2.2. Ulkovaipan lämmöneristävyys

Koulurakennusten lämmöneristys on seurannut yleisiä lämmöneristysmääräyksiä, missä on määritetty lämmöneristystä kuvaava lämmönläpäisykerroin eli U-arvo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). Rakenteen U-arvo määräytyy seuraavan yhtälön mukaisesti

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{se} + d_1 / \lambda_1 + \dots + d_n / \lambda_n + R_{si}}, \quad (3)$$

missä R on rakenteen kokonaisvastus, R_{se} rakenteen ulkopuolinen pintavastus ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$), R_{si} rakenteen sisäpuolinen pintavastus ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$), d rakenteen yksittäisen rakennekerroksen paksuus (m) ja λ rakenteen yksittäisen rakennekerroksen lämmönjohtavuus (W/mK). Tapauksesta riippuen yhtälöön voidaan lisätä myös maan lämmönvastus R_b , ohuiden ainekerroksen lämmönvastuksia R_g ja rakennuskerroksessa olevien ilmakerrosten lämmönvastuksia R_q . Materiaalin lämmönjohtavuus λ on aineominaisuus. (C4 2002, s.5). Mitä pienempi on rakenteen U-arvo, sitä parempi on rakenteen lämmöneristävyys. Jotta rakenteen lämmöneristys olisi mahdollisimman hyvä, niin materiaalin lämmönjohtavuuden on oltava mahdollisimman pieni ja/tai rakenteen mahdollisimman paksu.

Rakenteiden lämmöneristykseen liittyvät ensimmäiset varsinaiset lämmöneristysnormit ilmestyivät Suomessa vuonna 1962 Rakennusinsinööriyhdistyksen normina numerolla RIY A43. Normit annettiin nimellä ”Asuinrakennusten lämmöneristysnormit”, mutta ne koskivat asuinrakennuksia ja vastaavia rakennuksia eli niitä voitiin hyödyntää myös koulurakennuksiin. Rakennusten ulkoseinille, ala- ja yläpohjille asetettiin taulukon 2.1 mukaiset suurimmat sallitut lämmönläpäisykerroimet jaettuna kahteen

vyöhykkeeseen, Pohjois- ja Etelä-Suomeen. Vyöhykkeiden raja kulki kaupunkien Oulu, Kajaani ja Kuhmo eteläpuolelta. (Mäkiö et al. 1994, s.264).

Taulukko 2.1. Suurimmat sallitut lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot (W/m^2K) eri rakennusosille vuoden 1962 asuinrakennusten lämmöneristysnormeissa (Mäkiö et al., s.264).

Rakennusosa	Vyöhyke I (Pohjois-Suomi)	Vyöhyke II (Etelä-Suomi)
Seinä ulkoilmaa tai lämmittämätöntä tilaa vasten		
yksinomaan poltetuista tiilistä tehty seinä	0,93	1,05
normaalinen vaatimus	0,70	0,81
seinälle, joka on kevyempi kuin 100 kg/m^2	0,41	0,47
Katto ulkoilmaa tai lämmittämätöntä tilaa vasten		
tarkastava viranomainen voi sallia erityistapauksessa	0,58	0,58
normaalinen vaatimus pääasiassa kiviaineiselle katolle	0,47	0,47
normaalinen vaatimus puukatolle	0,41	0,41
Lattia		
osittain lämmitettyä tilaa vasten	0,70	0,70
lämmittämätöntä tilaa vasten	0,47	0,47
ulkoilmaa vasten	0,41	0,41

Vuonna 1969 astuivat voimaan taulukon 2.2 mukaiset uusitut ”Asuinrakennusten lämmöneristysnormit” niin ikään asuinrakennuksille ja vastaaville rakennuksille. Normit pysyivät pääasiassa samoina, mutta ikkunoiden osalta tuli lämmöneristysvaatimuksia. Ikkunoiden lämmöneristysvaatimukset riippuivat ikkunapinta-alan suhteesta seinäpinta-alaan. (RIL 66 1969).

Taulukko 2.2. Suurimmat sallitut lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot (W/m^2K) eri rakennusosille vuoden 1962 asuinrakennusten lämmöneristysnormeissa (RIL 66 1969).

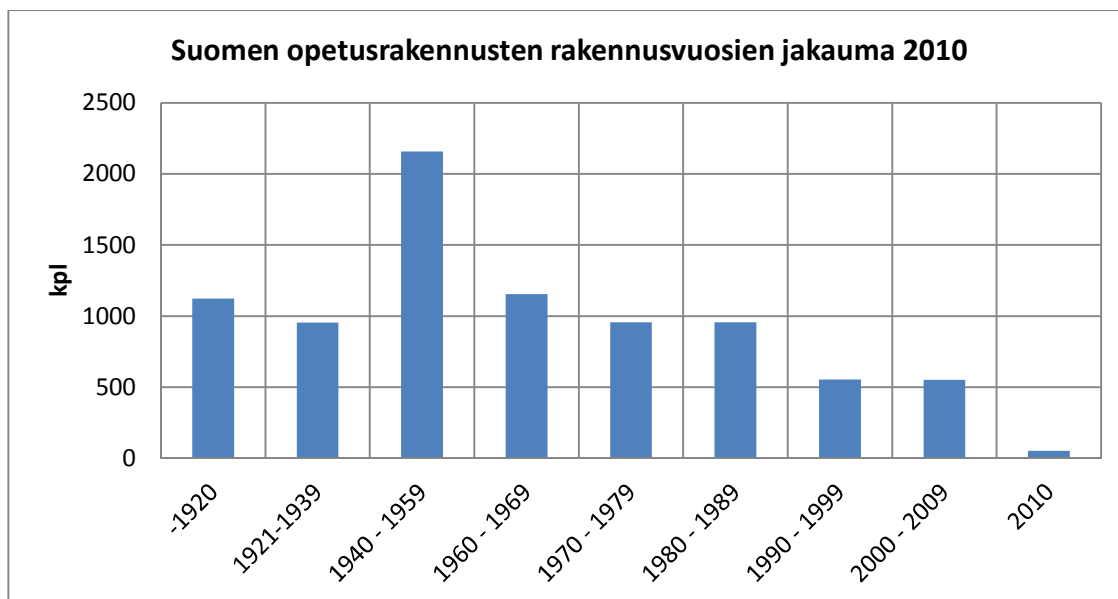
Rakennusosa	Vyöhyke I (Pohjois-Suomi)	Vyöhyke II (Etelä-Suomi)
Seinä ulkoilmaa tai lämmittämätöntä tilaa vasten		
yksinomaan poltetuista tiilistä tehty seinä	0,93	1,05
normaalinen vaatimus	0,70	0,81
seinälle, joka on kevyempi kuin 100 kg/m^2	0,41	0,47
Katto ulkoilmaa tai lämmittämätöntä tilaa vasten		
normaalinen vaatimus pääasiassa kiviaineiselle katolle	0,47	0,47
normaalinen vaatimus puukatolle	0,35	0,41
Lattia		
osittain lämmitettyä tilaa vasten	0,70	0,70
lämmittämätöntä tilaa vasten	0,47	0,47
ulkoilmaa vasten	0,35	0,35
lämmittämätön maanvarainen	0,47	0,47
Ikkunoiden ja ovien lasipinnat		
ikkunapinta-ala/seinäpinta-ala $\leq 0,3$	3,14	3,14
ikkunapinta-ala/seinäpinta-ala $> 0,3$ ja $< 0,6$	2,67	3,14
ikkunapinta-ala/seinäpinta-ala $\geq 0,6$	2,44	2,44

Vuonna 1976 ilmestyivät ensimmäiset lämmöneristysmääräykset ja sen jälkeen ne ovat uusiutuneet vuosina 1978, 1985, 2003, 2007 ja viimeksi 2010 (Kouhia et al. 2010, s.9). Näiden vuonna 1976 ja sen jälkeen julkaistujen rakentamismääräysten pääpiirteet on esitettyä taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3. Vuosina 1976–2010 julkaistujen rakentamismääräysten pääkohdat (Kouhia et al. 2010, s.9).

	1976	1978	1985	2003	2007	2010
Ulkoseinä U (W/m^2K)	0,40	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17
Yläpohja U (W/m^2K)	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09
Alapohja U (W/m^2K)	0,40	0,40	0,36	0,25	0,24	0,16
Ikkuna U (W/m^2K)	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0
Ovi U (W/m^2K)	-	-	-	1,4	1,4	1,0
Ilmanvuotoluku n_{50} (1/h)	6	6	6	4	4	2
Lämmön talteenoton hyötysuhde (%)	0	0	0	30	30	45

Koulurakennuksen lämmöneristystaso riippuu siis paljolti siitä milloin se on rakennettu. Lämmöneristystasossa voi olla suuriakin eroja eri vuosikymmeninä rakennettujen koulurakennusten osalta. Alla on esitettyä kuva Suomen opetusrakennusten rakennusvuosien jakaumasta vuonna 2010. Kuvassa vuosi 2010 ei ole kokonaan mukana.



Kuva 2.2. Suomen opetusrakennusten rakennusvuosien jakauma kymmenvuosittain vuonna 2010. Vuosi 2010 ei ole kokonaan tilastossa mukana (SVT 2011).

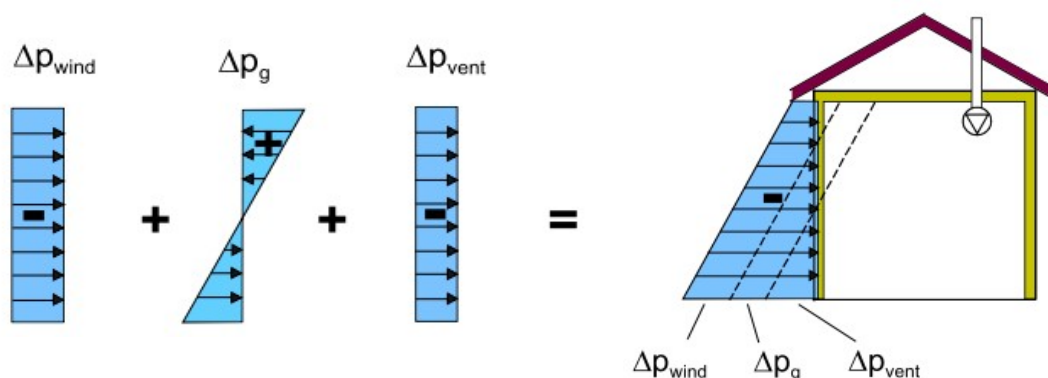
Kuvasta 2.2 nähdään, että moni opetusrakennus on rakennettu jo ennen ensimmäisiä rakentamismääräyksiä eli ennen vuotta 1962. Osa on siis rakennettu aikana, jolloin ei ole ollut minkäänlaisia lämmöneristysvaatimuksia ja osa taas huomattavan kireiden lämmöneristysvaatimuksien aikakaudella viimeisten vuosien aikana. 2000-luvulla rakennettujen opetusrakennusten lukumäärä näyttää kuitenkin hyvin pientä osaa kaikista opetusrakennuksista.

2.2.3. Ulkovaipan ilmanpitävyys

Rakenteiden läpi kulkeva vuotoilmavirta syntyy tuulen, rakennuksen sisä- ja ulkoilmas-
ton lämpötilaerojen sekä ilmanvaihtojärjestelmän synnyttämistä paine-eroista. Vaipassa
olevia vuotokohtia voivat olla esimerkiksi ovien ja ikkunoiden saumat, rakenteiden lii-
tokset sekä ulkovaipan läpi menevien taloteknisten järjestelmien läpivientikohdat kuten
sähköjohdot, ilmanvaihtokanavat ja tuuletusviemärit. Vaipan kautta tapahtuva vuoto on
siis hallitsematonta ilmanvaihtoa, joka voi aiheuttaa vedon tunnetta käyttäjille, kosteu-
den virtausta vaipparakenteisiin, vaipparakenteiden sisäpintojen jäähtymistä ulkoa tule-
vien ilmavirtausten myötä, erilaisten haitallisten aineiden ja mikrobien virtausta sisäil-
maan sekä lämmitysenergian kulutuksen kasvua ilmavirtojen ohittaessa rakennuksen
ilmanvaihdon lämmön talteenottojärjestelmän (Pentti 2010).

Vaipan ilmapuotoihin vaikuttava kokonaispaine-ero rakennuksen ulkovaipan yli
aiheutuu siis kolmesta osa-tekijästä: tuulen paineen aiheuttamasta paine-erosta, ulko- ja
sisäilman lämpötilaerojen aiheuttamasta hydrostaattisesta paine-erosta sekä ilmanvaiht-
tojärjestelmän aiheuttamasta paine-erosta kuvan 2.3 mukaisesti. Miinusmerkki kuvassa
tarkoittaa, että rakennus on alipaineinen ulkoilmaan nähden kuvassa esiintyvän seinän
osalta eli ilmavirta on rakennuksen ulkoilmasta sisäilmaan. Plusmerkki tarkoittaa vas-

taavasti, että rakennus on ylipaineinen ulkoilmaan nähden kuvassa esiintyvän seinän osalta eli ilmavirta on rakennuksen sisäilmasta ulkoilmaan.



Kuva 2.3. Rakennuksen ulkovaipan yli syntyvä kokonaispaine-ero on tuulen paineen, ulko- ja sisäilman lämpötilaerojen sekä ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamien paine-erojen summa. Kuva on esimerkki paine-eron jakautumisesta rakennuksen ulkoseinän yli. (Vinha 2011, s.398).

Rakennuksen alipaineisuus on tavoiteltu olotila normaaleissa rakennuksissa Suomessa, koska talvella ylipaineisesta rakennuksesta ulospäin virtaava ilma jäähtyy aiheuttaen suhteellisen kosteuden nousemista ja näin ollen kondensoitumisriskin rakenteille. Jos rakennus on alipaineinen talvella, niin sisäänpäin virtaava ilmavirta lämpenee aiheuttaen suhteellisen kosteuden laskemista, jolloin kondenssiriskiä ei synny. Kuva 2.3 on vain periaatteellinen, sillä painekuvion muodostuminen riippuu tuulen nopeudesta ja suunnasta, ulko- ja sisäilmaston lämpötilaeron suuruudesta sekä ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamasta paineisuudesta ja sen suuruudesta. (Pentti 2010; Vinha 2011, s.398).

Kuvan 2.3 mukaisesti tuuli aiheuttaa tuulen puoleiselle seinälle alipaineen ja vastakkaiselle seinälle ylipaineen rakennuksen sisällä. Ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron aiheuttama paine-ero syntyy hydrostaattisena paineena eli lämpötilaeron aiheuttama nosteena ulkoseinän yli, koska rakennuksen sisäilma omaa lämpimämpänä ilmaa pienemmän tiheyden ja näin ollen myös pienemmän paineen. Tavallisesti monikerroksisissa rakennuksissa rakennuksen alaosaan muodostuu alipainetta ja yläosaan ylipainetta. Neutraaliakselin eli ali- ja ylipaineen rajakohdan paikkaan voidaan paljon vaikuttaa ilmanvaihtojärjestelmän avulla.

Ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa myös rakennuksen ulkovaipan läpi tapahtuviin ilmapuotoihin, kuten edellä on mainittu (D5 2007, s.21). Tavallisesti rakennus suunnitellaan ulkoilmaan nähden alipaineiseksi ilmanvaihtojärjestelmän avulla, jotta voitaisiin estää kosteuden kondensoituminen rakenteisiin sekä sen seurauksena aiheutuvat mikrobin aiheuttamat terveysriskit. Rakennus tehdään alipaineiseksi ilmanvaihtojärjestelmän poistoilmavirran ollessa tavallisesti (5-10) % tuloilmavirtaa suurempi (Keski-Opas 2010). Rakennuksen alipaine ei saisi kuitenkaan olla suurempi kuin 30 Pa (D2 2008, s.19). Alipaineisuuden suuruus riippuu myös ilmanvaihtojärjestelmän tyypistä, mistä lisää luvussa Ilmanvaihto.

Lainsäädäntö asettaa myös ohjeita rakennuksien ilmanpitävyyksille, sillä Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C2 mukaan ”Sisäilman vesihöyryn haitallisen konvektion estämiseksi tulee rakennuksen vaipan ja sen yksityiskohtien olla niin tiiviitä läpi kulkevien ilmapuotojen suhteen, että syntyy edellytykset pitää rakennus pääsääntöisesti alipaineisena” (C2 1998, s.4). Rakennuksen ilmanpitävyyden mittauksen tullessa mahdolliseksi, rakennuksen ilmanpitävyyttä alettiin myös rajoittaa rakentamismääräyksillä. Ilmanpitävyyden mittana toimii rakennuksen ilmapuotoluku n_{50} , joka kuvaa kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnin aikana rakennuksen ulkovaipassa olevien puotokohtien kautta, kun sisä- ja ulkoilman välillä on 50 Pa paine-ero. Rakennuksen ilmatilavuudella tarkoitetaan huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan lasketun pinta-alan tuloa, johon ei ole huomioitu välipohjia mukaan (D5 2007, s.4).

Tiiviysmittauksia aloitettaessa yli 30 vuotta sitten ilmapuotoluvut olivat välillä (6-7) 1/h pientaloissa. 2000-luvun alussa ilmapuotoluvut ovat olleet pientaloissa tyyppillisesti välillä (2-4) 1/h, mutta viime vuosien aikana ilmapuotoluvut ovat tasaisesti parantuneet kiristyneiden viranomaismääräysten ja energiatodistusten myötä. Laskelmien mukaan yhden yksikön lisäys ilmapuotoluvussa kasvattaa lämmitysenergian kulutusta noin kuusi prosenttia. (Kauppinen et al. 2009). Uusimmissa rakentamismääräyksissä laskelmien perustana käytetään ilmapuotolukua $n_{50} = 2$ 1/h mutta jos ilmanpitävyyttä ei voida osoittaa mittaamalla tai jollakin muulla menettelyllä, käytetään ilmapuotolukuna 4 1/h (D3 2008, s.11). Vanhempien rakentamismääräysten asettamat ilmapuotoluvut on nähtävissä taulukossa 2.3. Laskennassa käytettävä rakennuksen puotoilmakerroin on yhtälön (4) mukainen

$$n_{\text{puotoilma}} = n_{50}/25, \quad (4)$$

missä $n_{\text{puotoilma}}$ on rakennuksen puotoilmakerroin (1/h) ja n_{50} rakennuksen ilmapuotoluku 50 Pa paine-erolla (1/h) (D5 2007, s.21).

2.2.4. Ilmanvaihto

Ilmanvaihdolla tarkoitetaan huoneilman laadun ylläpitämistä ja parantamista huoneen ilmaa vaihtamalla (D2 2008, s.3). Huoneilmaa joudutaan vaihtamaan epäpuhtauksien takia, jotka ovat peräisin ihmisten aineenvaihdunnasta, rakennuksessa tapahtuvista eri toiminnoista, rakennus- ja sisustusmateriaaleista, ulkoilmasta sekä joissakin tapauksissa maaperän radonista. Koulurakennuksissa ilmanvaihdon suurin mitoittava tekijä on ihmisistä syntyvä hiilidioksidi, jonka pitoisuus indikoi myös muiden ihmisperäisten hajujen ja epäpuhtauksien tuottoa.

Rakentamismääräyskokoelman osassa D2 on määritetty, että sisäilman hiilidioksidin pitoisuus tavanomaisissa sääoloissa ja huonetilan käyttöaikana ei saisi ylittää pitoisuutta 1200 ppm (D2 2008, s.7). Kyseinen raja-arvo on myös määritetty tyydyttävän sisäilmaston rajaksi ilman laadun osalta Sisäilmastoyhdistys ry:n Sisäilmastoluokituk-

nessa 2008, joka on tarkoitettu sisäilmastotavoitteiden asettamiseen rakennettaessa uudiskohteita ja peruskorjatessa vanhoja rakennuksia (Sisäilmastoluokitus 2008, s.11). On huomioitava, että Sisäilmastoluokitusta ei ole tarkoitettu käytettäväksi rakennuksen terveellisuuden arviointiin (Sisäilmastoluokitus 2008, s.6). Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeessa, jota voi hyödyntää soveltuvin osin myös muissa kuin asuinrakennuksissa, on asetettu korkeimmaksi mahdolliseksi terveysturvallisuuden vaatimukset täyttäväksi hiilidioksidipitoisuudeksi 1500 ppm (Asumisterveysohje 2003, s.22). Jos hiilidioksidipitoisuus ylittää kyseisen raja-arvon, niin tilan sisäilma ei ole terveydensuojelulain mukainen. Huonetiloissa tulee siis olla sellainen ilmanvaihto, että käyttöaikana taattaisiin terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu (D2 2008, s.10). Ilmanvaihdon määrälle onkin asetettu seuraavan taulukon mukaisia ohjearvoja oppilaitoksien ilmanvaihdon mitoittamiseen.

Taulukko 2.4. Rakentamismääräyskokoelman D2 asettamat ohjearvot oppilaitosten eri tilojen ilmavirroille (D2 2008, s.29).

Tila/käyttötarkoitus	Ulkoilmavirta (dm ³ /s)/hlö	Ulkoilmavirta (dm ³ /s)/m ²	Poistoilmavirta (dm ³ /s)/m ²
Opetustilat	6	3	-
Käytävät/Aulat	-	4	-
Liikuntasali:	-	-	-
- liikuntasalikäyttö	-	2	-
- juhlasalikäyttö	-	6	-
Luentosali	8	6	-
Ryhmätyötila	8	4	-
Ruokala	6	5	-
Varastot	-	-	0,35

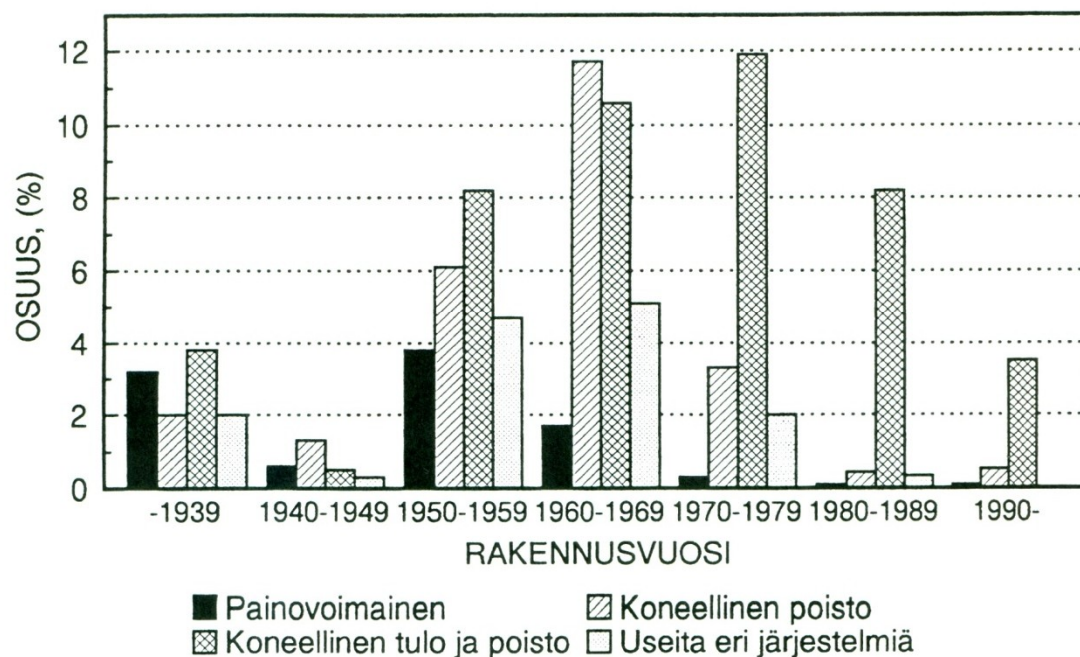
Taulukon 2.4 mukaan ilmavirtojen ohjearvot on asetettu yksiköillä kuutiodesimetriä (dm³) eli litraa (l) per sekunti (s) henkilöä (hlö) tai lattianeliötä (m²) kohden. Riippuen kumpaa ohje-arvoa käytetään, saadaan hiukan erilaisia arvoja. Ulkoilmavirtojen mitoittamisessa tulisi kuitenkin ensisijaisesti käyttää henkilöperusteista ilmavirran ohjearvoa. Jos henkilöperusteisen ilmavirran mitoitukselle ei löydetä perusteita, voidaan käyttää pinta-alaperusteista ilmavirran ohjearvoa. (D2 2008, s.10). Lisäksi rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan opetustilojen, luentosalien ja ryhmätyötilojen ilmavirtojen on oltava ohjattavissa tarpeen mukaan (D2 2008, s.29).

On myös huomioita, että rakennus tulee alipaineiseksi ulkoilmaan nähden säätämällä poistoilmavirta tuloilmavirtaa suuremmaksi. Tavoitteellisia paine-eroja ulkoilmaan nähden erilaisilla ilmanvaihtojärjestelmillä on esitetty taulukossa 2.5. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän osalta paine-ero ulkoilmaan nähden saattaa nousta jopa 20 Pascaliin riippuen ulkoilman tuulesta ja lämpötilasta. Rakentamismääräyskokoelman osan D2 asettama maksimipaine-ero ulkoilmaan nähden on 30 Pa (D2 2008, s.19). Tosin jo tätä pienemmällä alipaineella saattaa tulla rakennukseen liian suuria vetohaittoja talviaikaan.

Taulukko 2.5. Tavoitteelliset paine-erot rakennuksen sisä -ja ulkovaipan välillä. Miinusmerkki tarkoittaa, että ilmanpaine on sisällä pienempi kuin ulkona eli tila on alipaineinen (Asumisterveysopas 2005, s.60).

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0... -5 Pa ulkoilmaan	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5... -20 Pa ulkoilmaan	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, ilmanvaihtolämmitys	0... -2 Pa ulkoilmaan	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan

Kuvassa 2.4 on esitettyä koulurakennusten ilmanvaihtojärjestelmät koulurakennusten rakennusvuoden mukaan vuonna 1996 perustuen Teknillisen korkeakoulun teettämään kyselyyn (Kurnitski et al. 1996). Kyselyyn vastasi 1264 rehtoria. Painovoimainen ilmanvaihto oli 10 %:ssa koulurakennuksista, koneellinen poistoilmanvaihto 26 %:ssa sekä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto 48 %:ssa koulurakennuksista. On myös koulurakennuksia varsinkin 1950–1970 -luvulta, joissa on ollut paljon käytössä useamman ilmanvaihtojärjestelmän yhdistelmiä eli kaksi tai useampi ilmanvaihtojärjestelmää (15 %). Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän osuus koulurakennuksissa on alkanut vähenemään merkittävästi 1960-luvulla. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä on alkanut vähenemään voimakkaasti vastaavasti 1970-luvulla, jonka jälkeen kouluihin on tehty pääasiassa koneellisia tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmiä. (Kurnitski et al. 1996, s.23–25).



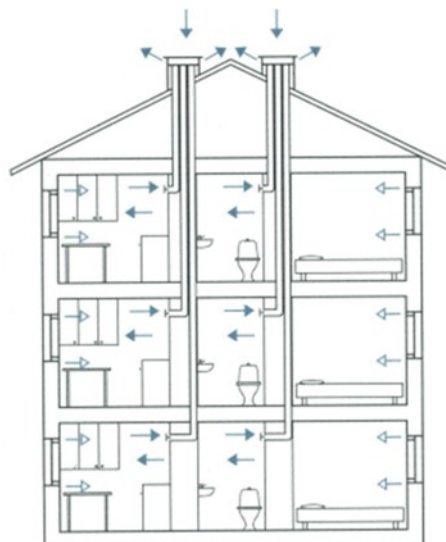
Kuva 2.4. Koulurakennusten ilmanvaihtojärjestelmät koulurakennusten rakennusvuoden mukaan vuonna 1996 (Kurnitski et al. 1996, s.24).

On huomioitava, että kuva 2.4 esittää tilannetta vuonna 1996. Tutkimuksen julkaisemisesta on siis jo 15 vuotta aikaa. Monia painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän sisältäviä vanhoja kyläkouluja on lakkautettu sekä moniin kouluihin on rakennettu koneellisia tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmiä tänä aikana peruskorjausten yhteydessä. Painovoimaisen ilmanvaihdon omaavien koulurakennusten osuus on siis merkittävästi vähentynyt ja vastaavasti koneellisten tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmien osuus noussut.

Seuraavaksi tarkastellaan tarkemmin kouluissa esiintyviä ilmanvaihtojärjestelmiä. Käydään läpi painovoimainen ilmanvaihto-, koneellinen poistoilmanvaihto- ja koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Ilmanvaihtojärjestelmät on esitelty erillisinä alalukuina alla, joissa on esitelty ilmanvaihtojärjestelmien periaatteet. Luvuissa on jonkin verran käsitelty myös ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuutta.

Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä

Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän koulurakennukset alkavat olla harvinaisia nyky-Suomessa, koska kyseisellä ilmanvaihtojärjestelmällä ei saada tyydyttäviä sisäilman olosuhteita koulurakennuksiin. Vuonna 1996 tehdyn tutkimuksen mukaan niitä oli 10 % Suomen koulurakennuksista (Kurnitski et al. 1996, s.25), mutta määrä on vähentynyt vielä viimeisen 15 vuoden aikana vanhojen kyläkoulujen lakkauttamisen ja ilmanvaihtoon liittyvien peruskorjausten myötä. Painovoimainen ilmanvaihto perustuu ulko- ja sisäilman välisten lämpötila-erojen synnyttämiin paine-eroihin sekä tuulen vaikutukseen aiheuttaman paine-eron myötä. Ilmavirtojen suuruus vaihtelee siis voimakkaasti sääolosuhteiden mukaan. Kuvassa 2.5 on esitetty periaatekuva painovoimaisen ilmanvaihdon toiminnasta. Kuvassa on esitetty asuinkeuhkalo, mutta periaate on samanlainen koulurakennuksissa. (Seppänen & Seppänen 1996, s.166–168).



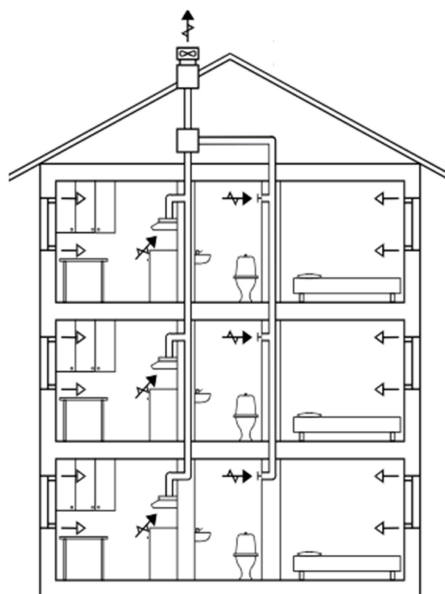
Kuva 2.5. Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän periaatekuva (Seppänen & Seppänen 1996, s.167). Hormin päässä oleva sisääntulonpuoli tarkoittaa, että painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilma voi kulkea myös rakennuksen ulkoa sisäänpäin riippuen painesuhteista.

Kuvan 2.5 mukaisesti ulkoilmavirta tuodaan rakennukseen seinässä olevien korvausilmaventtiilien, korvausilmareikien ja vaipassa olevien vuotokohtien kautta. Ilma poistuu rakennuksesta poistoilmahormien kautta. Jokaisella venttiilillä on oltava oma poistoilmahorminsa katolle, jotta estettäisiin ilman siirtyminen tilasta toiseen. Poistoilmahormeihin ei voi myöskään tehdä kovin paljon mutkia tai vaakasuoria siirtymiä johtuen pienistä paine-eroista rakennuksen poistoilmaventtiilien ja ulkona sijaitsevan jäteilmaventtiilin välillä. Ilma siirtyy ulos poistoilmahormien kautta edellyttäen, että paine-ero on riittävän suuri eli sisä- ja ulkoilman välillä on riittävä lämpötilaero ja/tai ulkona tuulee. Ilmanvaihto jää siis rakennuksessa puutteelliseksi, jos ulkoiset olosuhteet ovat ilmanvaihtojärjestelmän kannalta huonot eikä ikkunatuuletuksella voida tehostaa ilmanvaihtoa. Talviaikaan painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä toimii hyvin sisä- ja ulkolämpötilojen välisen lämpötilaeron johdosta, mutta lämpiminä aikoina ilmavirta voi olla mitätön. Pahimmillaan ilmavirta voi virrata ulkoilmasta sisäilmaan poistoilmahormien kautta, jos ulkolämpötila nousee sisäilman lämpötilaa korkeammaksi. Tämä voi aiheuttaa hygieenisiä haittoja sisäilman laatuun. (Seppänen & Seppänen 1996, s.166–168).

Painovoimaisella ilmanvaihtojärjestelmällä ei saada riittävää ilmanvaihtoa koulurakennuksiin. Kyseinen ilmanvaihtojärjestelmä ei ole myöskään energiatehokas, koska ilmanvaihto on lähes hallitsematonta johtuen sääolosuhteiden merkittävästä vaikutuksesta ilmavirtojen määrään. Ilmavirroista ei voida myöskään ottaa lämpöä talteen, mikä nostaa lämmönkulutusta. Sisään tuleva lämmittämätön ilmavirta aiheuttaa myös helposti vetoa rakennuksen käyttäjille.

Koneellinen poistoilmavaihtojärjestelmä

Koneellinen poistoilmavaihtojärjestelmä on myös alkanut väistyä koneellisen tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmän tieltä koulurakennuksissa. Vuonna 1996 tehdyn tutkimuksen mukaan niitä oli 26 % Suomen koulurakennuksista (Kurnitski et al. 1996, s.25), mutta määrä on saattanut vähentyä viimeisen 15 vuoden aikana vanhojen kyläkoulujen lakkauttamisen ja ilmanvaihtoon liittyvien peruskorjausten myötä. Vielä on kuitenkin monia vanhoja koulurakennuksia Suomessa, joista löytyy koneellinen poistoilmavaihtojärjestelmä. Koneellisen poistoilmavaihtojärjestelmän periaatekuva on esitettyä kuvassa 2.6.



Kuva 2.6. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän periaatekuva (Seppänen & Seppänen 1996, s.170).

Kuvan 2.6 mukaisesti ulkoilmavirta tulee rakennukseen koneellisessa poistoilmavaihtojärjestelmässä samalla tavoin kuin painovoimaisessa ilmanvaihdossa eli seinässä olevien korvausilmaventtiilien, korvausilmareikien ja vaipassa olevien vuotokohtien kautta. Poistoilma poistetaan poistoilmakanavien kautta käyttäen apuna katolla olevia huippuimureita tai rakennuksen sisällä olevia erillisiä poistoilmakoneita. Koneellisen ilmanpoiston tuottaman suuremman paine-eron johdosta poistoilmahormit voidaan tehdä huomattavasti pienemmiksi verrattuna painovoimaiseen ilmanvaihtojärjestelmään. Niihin voidaan tehdä mutkia ja vaakasuoria siirtymiä sekä poistoilmaventtiilit voidaan yhdistää samaan poistoilmaputkeen ilman pelkoa siitä, että ilmavirrat sekoittuisivat tilojen kesken. Erityisten likaisten tilojen kuten esimerkiksi koulukeittiöiden liesituulettimien poistoilma hoidetaan yleensä erillispoistona siten, että samaan kanavaan ei liitetä puhtaampien tilojen poistoilmaventtiilejä. (Seppänen & Seppänen 1996, s.169–171).

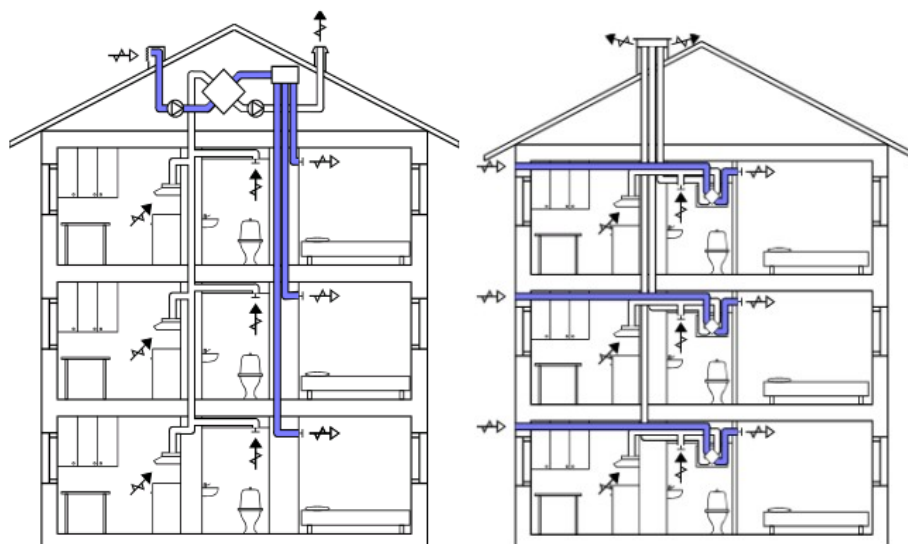
Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa on varmistettava, että ilma pääsee liikkumaan tilasta toiseen siirtoilman kulkiessa poistoilmaventtiileille. Koulujen poistoilmavaihtojärjestelmissä jokaisessa luokkatilassa on usein omat poistoilmaventtiilit, jotka on usein yhdistetty omaan yhteiskanavaan. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän toiminta ei riipu kovin paljoa sääolosuhteista. Ongelmana on kuitenkin myös sisään tuleva lämmittämätön ilmavirta, joka aiheuttaa helposti vetoa rakennuksen käyttäjille. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä ei yleensä sisällä myöskään lämmön talteenottoa poistoilmasta, mikä nostaa lämmönkulutusta. Poistoilmalämpöpumpun avulla voidaan kuitenkin ottaa lämpöä talteen koneellisissa poistoilmanvaihtojärjestelmissä.

Koneellisten tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä on yleisin ilmanvaihtojärjestelmä Suomen koulurakennuksissa. Vuonna 1996 tehdyn tutkimuksen mukaan niitä oli 48 % Suomen koulurakennuksista (Kurnitski et al. 1996, s.25), mutta määrä on noussut viimeisen 15 vuoden aikana vanhojen koulujen ilmanvaihtoon liittyvien peruskorjausten myötä. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä tuodaan ilma koneellisesti rakennukseen koneellisen poiston lisäksi. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä voidaan tehdä erillisillä tulo- ja poistoilmakoneilla sekä huippuimureilla, mutta tällöin lämpöä ei saada poistoilmasta talteen, jos sitä varten ei ole tehty erillistä järjestelmää. Useimmiten koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä rakennuksen tai huoneen tulo- ja poistoilma tulevat samalle ilmanvaihtokoneelle, missä poistoilmasta siirretään lämpöä tuloilmaan. Poikkeuksena ovat erityisen likaiset tilat kuten valmistuskeittiöt, joista saattaa olla erillispoisto huippuimurin avulla suoraan ulos ilmanvaihtokoneen likaantumisvaaran vuoksi.

Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä sisältää monia etuja. Rakennuksen vaippa voidaan tehdä tiiviiksi, kun tuloilma johdetaan koneellisesti rakennukseen. Jokaiseen tilaan saadaan myös suunniteltu ilmavirta ja ilmanvaihto sääolosuhteista riippumatta. Tuloilmaa ei johdeta lämmittämättömänä sisäilmaan kuten painovoimaisessa ja koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä, vaan se lämmitetään. Tuloilman lämmityksessä hyödynnetään yleensä poistoilman lämpöä lämmön talteenottojärjestelmän kautta, mikä parantaa järjestelmän energiataloutta. Lisäksi käytetään tuloilman jälkilämmityspatteria, jolla saadaan lämmitettyä tuloilma haluttuun sisäänpuhalluslämpötilaan. Jälkilämmitys hoidetaan joko sähkö- tai vesilämmityspatterin avulla. Jos järjestelmä ei sisällä lämmön talteenottojärjestelmää, tuloilma lämmitetään pelkästään tuloilmapattereiden avulla.

Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa ilmanvaihtojärjestelmä voidaan jakaa myös keskitettyyn ja hajautettuun ilmanvaihtojärjestelmään riippuen kuinka monen tilan muodostama kokonaisuutta ilmanvaihtokoneet palvelevat. Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä kaikki rakennukseen tuleva ja sieltä lähtevä ilma menevät iv-konehuoneissa olevien ilmanvaihtokoneiden kautta, missä tapahtuu lämmön talteenotto poistoilmasta tuloilmaan. Hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä rakennuksessa on useampia ilmanvaihtokoneita, esimerkiksi luokkahuoneittain oma ilmanvaihtokone. Hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän säädettävyys on huomattavasti parempi kuin keskitetyn. Käyttäjä tai automatiikka voi säätää tilan ilmanvaihdon määrää käyttötärpeen mukaan, jolloin ilmavirta voi olla käytön aikana suurempi ja muuna aikana pienempi. Tämä on etu varsinkin niissä koulurakennuksissa, missä eri luokkahuoneiden käyttöajat vaihtelevat toisiinsa nähden. Alla olevassa kuvassa 2.7 on esitetty koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän periaate sekä keskitettynä että hajautettuna järjestelmänä sisältäen ilmanvaihdon lämmön talteenottojärjestelmän.



Kuva 2.7. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän periaatekuva. Vasemmal-
la on keskitetty ja oikealla hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä. (Seppänen & Seppänen
1996, s.173).

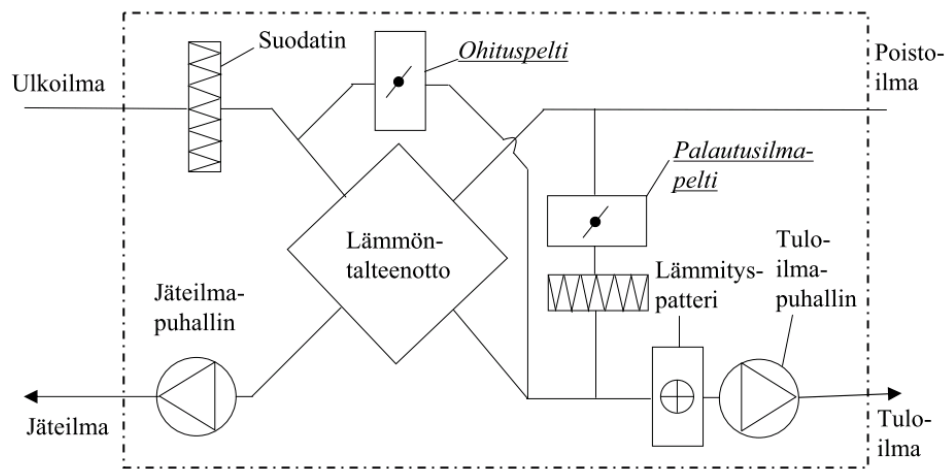
Kuvan 2.7 mukaisesti asuinrakennuksissa tuloilma johdetaan niin sanottuihin puhtaisiin tiloihin eli makuu- ja olohuoneisiin sekä poistetaan niin sanotuista likaisista tiloista eli wc:stä, kylpyhuoneesta, keittiöstä ja vaatehuoneesta. Koulurakennuksissa ilmaa poistetaan myös niin sanotuista likaisista tiloista eli wc:stä, pesuhuoneista, keittiöistä sekä arkistointi- ja varastotiloista. Koulukeittiön, luokkahuoneiden, liikuntasalin, ruokasalin, käytävien, henkilökunnan tilojen ja monien muiden koulurakennusten tilojen osalta tiloihin tyypillisesti johdetaan tuloilma, mutta myös viedään poistoilma ilmanvaihtokoneelle samasta tilasta.

Koulurakennusten koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto voidaan jakaa myös ilmanjakotavan mukaan. Koulurakennuksissa käytettäviä ilmanjakotapoja ovat sekoittava ja syrjäyttävä ilmanjako. Sekoittavassa ilmanjakotavassa on tavoitteena saada sekoitettua tuloilma nopeasti ja tasaisesti huoneilmaan yleensä suureholla nopeudella huoneen yläosista. Se on ilmanjakotapana huomattavasti yleisempi. Syrjäyttävässä ilmanjakotavassa viileä tuloilma tuodaan oleskeluvyöhykkeelle hiljaisella nopeudella. Syrjäyttävä ilmanjakotapa syrjäyttää siis lämpimän ja likaisen ilman, joka nousee ylöspäin aiheuttaen huoneeseen lämpötila – ja konsentraatioeroja. (Seppänen & Seppänen 1996, s.193).

Tyypillisen koneellisen tulo- ja poistoilmajärjestelmän ilmanvaihtokoneen peruskenttä on esitetty kuvassa 2.8. Ulkoilma tulee suodattimen kautta ilmanvaihtokoneen lämmön talteenottoon, missä poistoilmasta siirretään lämpöä ulkoilmaan. Tämän jälkeen lämmön talteenotossa lämmennyt ulkoilma eli tuloilma johdetaan lämmityspatterilla, missä tuloilma lämpiää haluttuun tuloilman lämpötilan asetusarvoon, jos lämmön talteenotossa ei ole saavutettu riittävän korkeata lämpötilaa. Tuloilmapuhallin huolehtii riittävästä paineentuotosta, jotta tuloilma saadaan johdettua kaikille rakennuksessa oleville tuloilmaventtiileille. Poistoilmavirran siirtämisestä huolehtii poistoilma-

puhallin, joka johtaa poistoilmanvirran ilmanvaihtokoneen lämmön talteenottokeinoon. Lämmön talteenottokeinoon jälkeen jäähtynyt poistoilma eli jäteilma johdetaan ulos rakennuksesta.

Kuvassa 2.8 on esitetty myös ohitus- ja palautusilmapelti. Ohituspellin tarkoitus on ohittaa lämmön talteenotto, kun ulkoilman lämpötila alkaa olla suurempi kuin tavoiteltu sisälämpötila. Palautusilmapeltiä käytetään joissakin koneellisissa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä ja sen tarkoituksena on käyttää osa poistoilmasta uudelleen tuloilmana suodatuksen jälkeen. Palautusilma on siis ilmaa, missä on kahden tai useamman eri huonetilan poistoilmaa (D2 2008, s.4). Palautusilman tarkoituksena on parantaa järjestelmän energiatehokkuutta, jolloin tosin sisäilman laatu saattaa huonontua.



Kuva 2.8. Tyypillisen koneellisen tulo- ja poistoilmajärjestelmän ilmanvaihtokoneen peruskäytöntä (Alanne 2010).

Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan uusissa rakennuksissa on otettava poistoilmasta talteen lämpömäärä, joka vastaa vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpömäärästä (D2 2008, s.23). Ensimmäinen määräys ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhteelle tuli vuonna 2003 (katso taulukko 2.3). Lämmön talteenoton hyötysuhde voi olla myös huonompi, mutta tällöin vastaava lämpömäärä on kompensoitava muilla toimenpiteillä (D2 2008, s.23).

Rakentamismääräyskokoelman osassa D5 on esitetty jonkin verran erilaisia ilmanvaihdon lämmön talteenoton lämmönsiirtimien tuloilman lämpötilasuhteita η_t eli kyseisten lämmönsiirtimien lämmön talteenoton hyötysuhteita. Hyötysuhteet ovat jonkin verran parantuneet neljän vuoden aikana, mutta suuria muutoksia ei ole tapahtunut. Tuloilman lämpötilasuhteen η_t laskennassa voidaan käyttää yhtälöä (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14).

$$\eta_t = \frac{(T_{tLTO} - T_u)}{(T_s - T_u)}, \quad (5)$$

missä T_{tLTO} on tuloilman lämpötila lämmön talteenoton jälkeen, T_u ulkoilman lämpötila ja T_s sisäilman lämpötila. Tuloilman lämpötilasuhteita voidaan myös laskea poistoilman

lämpötilasuhteen η_p kautta yhtälön (6) mukaisesti, jos voidaan laskea yhtälön (8) mukainen poistoilman lämpötilasuhte. (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.14–15).

$$\eta_p = \eta_t R_{LTO} \Rightarrow \eta_t = \frac{\eta_p}{R_{LTO}}, \quad (6)$$

missä R_{LTO} on lämmön talteenoton kautta menevän tuloilmavirran q_{tLTO} suhde lämmön talteenoton kautta menevään poistoilmavirtaan q_{pLTO} yhtälön (7) mukaisesti (Ilmanvaihdon lämmön talteenotto 2003, s.15).

$$R_{LTO} = \frac{q_{tLTO}}{q_{pLTO}} \quad (7)$$

$$\eta_p = \frac{(T_s - T_j)}{(T_s - T_u)}, \quad (8)$$

missä T_j on jäteilman lämpötila. Eri lämmönsiirintyyppien lämmön talteenoton hyötysuhteita on esitetty taulukossa 2.6. Laskettaessa koko rakennuksen lämmön talteenoton hyötysuhde tulisi huomioida myös erillispoistot, jotka ohittavat lämmön talteenoton lämmönsiirtimet. Koko rakennuksen keskimääräinen lämmön talteenoton hyötysuhde lasketaan tällöin painottaen ilmanvaihtokoneiden, huippuimureiden ja/tai erillisten tulo- ja poistoilmakoneiden käyttöajoilla ja ilmavirroilla. Lämmön talteenoton kiertävien laitteiden lämmön talteenoton hyötysuhde asetetaan 0 %.

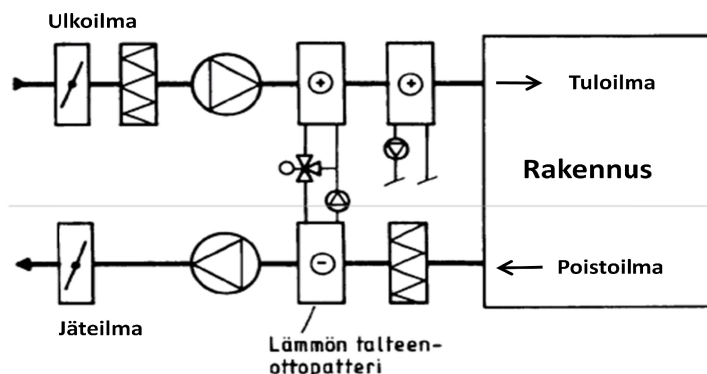
Taulukko 2.6. Ilmanvaihdon lämmön talteenoton lämmönsiirtimien tuloilman lämpötilasuhteen η_t arvoja, joita voi käyttää lämmön talteenoton vuosihyötysuhteen laskennassa (D5 2007, s.23).

Lämmönsiirintyyppi	Lämpötilasuhte η_t
Nestekiertoisen lämmönsiirrin	0,45
Ristivirtalevylämmönsiirrin	0,55
Vastavirtalevylämmönsiirrin	0,70
Regeneratiivinen lämmönsiirrin	0,75

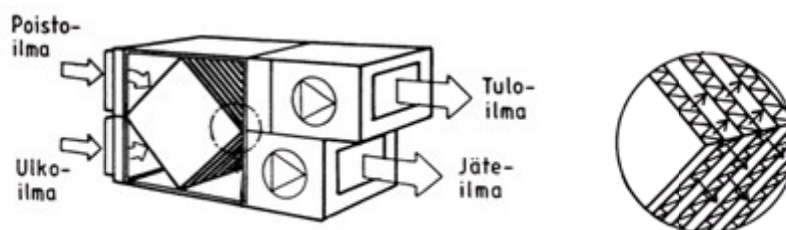
Nestekiertoisessa lämmönsiirtimessä lämpöä siirretään poistoilmasta tuloilmaan esimerkiksi vesi-glykolipatterin kautta. Tulo- ja poistoilma virtaavat siis lämmön talteenottopattereiden eli tavallisten lamellipattereiden läpi, joiden kautta pattereissa kiertävä jäätymätön lämmönsiirtoneste siirtää lämpöä. Kuvassa 2.9 on esitetty kuva nestekiertoisesta lämmönsiirtimestä. Ristivirta- ja vastavirtalevylämmönsiirrin ovat rekuperatiivisia lämmönsiirtimiä eli levylämmönsiirtimiä, joissa tulo- ja poistoilmavirta menevät toisiinsa nähden joko ristiin tai vastatusten sekoittumatta toisiinsa. Lämpö siirtyy lämmönsiirtimessä olevien levyjen läpi. Kuvassa 2.10 on esitetty ristivirtalevylämmönsiirrin.

Regeneratiivinen eli lämpöä varastoiva lämmönsiirrin on kuvan 2.11 mukainen lämmönsiirrin, missä tulo- ja poistoilma virtaavat lämpöä varaavan massan läpi. Tämä

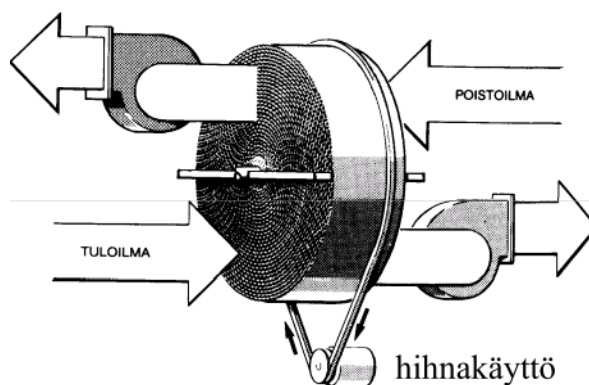
lämpöä varaava massa on tyypillisesti kuvan mukainen pyörivä kiekko, joka pystyy siirtämään myös kosteutta poistoilmasta tuloilmaan. Myös hajujen ja epäpuhtauksien siirtyminen on mahdollista, jolloin kyseistä lämmönsiirintä ei voida käyttää likaisissa tiloissa kuten keittiöissä. Regeneratiivisella lämmönsiirtimellä on parhain hyötysuhde ja se ylittää nykypäivänä jopa 80 %:n lämmön talteenoton hyötysuhteeseen. (Alanne 2010)



Kuva 2.9. Nestekiertoinen lämmönsiirrin (muokattu lähteestä Alanne 2010).



Kuva 2.10. Ristivirtalevyllämmönsiirrin (muokattu lähteestä Seppänen & Seppänen 1996, s.188).

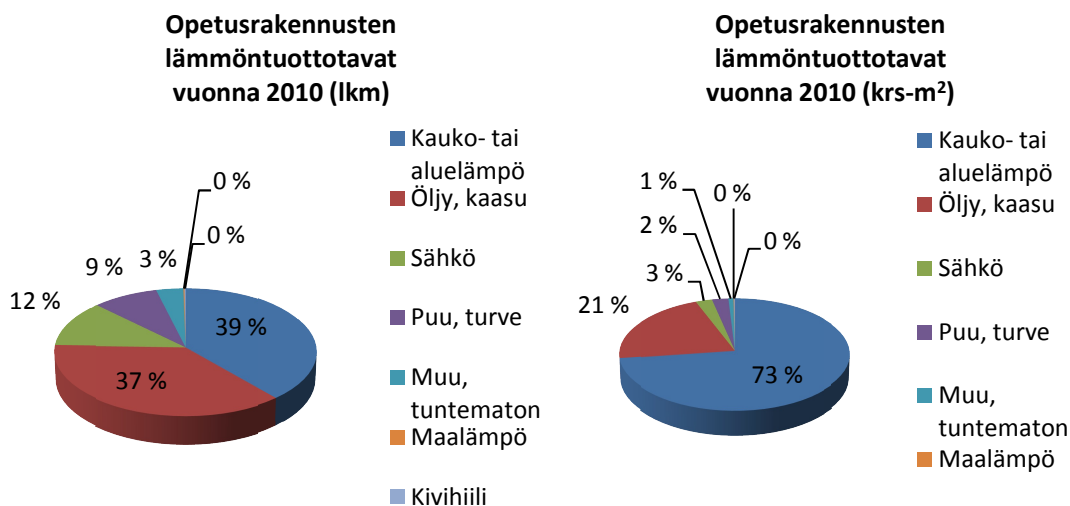


Kuva 2.11. Regeneratiivinen lämmönsiirrin (Alanne 2010).

2.2.5. Lämmitysjärjestelmät

Koulurakennusten lämmitystavat voidaan jakaa monella eri tavalla. Tässä on käytetty jakoperusteina lämmöntuottotapaa ja lämmönjakotapaa. Kuvassa 2.12 on esitettyä opetusrakennusten lämmöntuottotavat suhteessa opetusrakennusten lukumäärään ja kersosalaan. Kuvista nähdään, että kauko- tai aluelämpö on ylivoimaisesti suurin lämmön-

tuottotapa opetusrakennusten kerrosalaan suhteutettuna. Kauko- tai aluelämmön lisäksi käytetään suhteellisen paljon öljy- ja kaasulämmitystä ja jonkin verran puuta, turvetta ja sähköä lämmityksessä. Maalämmön ja kivihiilen osuus on hyvin pieni muihin lämmitysmuotoihin verrattuna. Lämmönjakotapoina koulurakennuksissa toimivat pääasiassa vesikiertoiset lämmityspatterit johtuen kauko- ja aluelämmön suuresta osuudesta lämmöntuottotapana. Jonkin verran on myös sähkölämmityspattereilla ja ilmalämmityksellä toteutettua lämmönjakotapaa.



Kuva 2.12. Opetusrakennusten lämmöntuottotavat vuonna 2010 opetusrakennusten lukumäärän ja kerrosalan suhteen (SVT 2011).

Erilaisten lämmöntuottotapojen lämmöntuottotehokkuus eli hyötysuhde vaihtelee. Rakennuksen todellista lämmönkulutusta eli lämmön ostoenergiaa voidaan mitata. Hyötysuhteen avulla saadaan selville rakennuksen nettolämpöenergian kulutus, joka ei huomioi lämmöntuoton häviöitä. Rakentamismääräyskokoelman osassa D5 on määritetty hyötysuhteita erilaisille lämmöntuottotavoille. Erilaisten lämmöntuottotapojen vuosihyötysuhteita rakennuksissa on esitettyinä taulukossa 2.7. Öljykattiloiden osalta käytetään tyypillisesti vuosihyötysuhdetta 0,90, vaikka erilaisille öljykattiloille ja kattiloiden tehoille on asetettu erilaisia hyötysuhteita. Käytettäessä taulukon 2.7 arvoja saadaan siis rakennuksen nettolämmöntarve (esim. pattereilla tuotava teho) siten, että lämmöntuottotavalla ei ole merkitystä tulokseen. Lämmöntuottotapojen hyötysuhteiden lisäksi on myös tiedettävä lämmitykseen käytettävien polttoaineiden lämpöarvot, jotta saadaan määritettyä rakennuksen nettolämmönkulutus. Kevyelle polttoöljylle käytetään tehollisena lämpöarvona tyypillisesti 10 kWh/dm³ ja maakaasulle 10,0 kWh/m³n. Muille polttoaineille on lämpöarvoja esitettyinä Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukossa 3.2 (D5 2007, s.14)

Taulukko 2.7. Erilaisten lämmöntuottotapojen vuosihyötysuhteita rakennuksissa (D5 2007, s.14).

Lämmöntuottotapa	Vuosihyötysuhde $\eta_{\text{lämmitys}}$
Kaukolämpö	1,0
Sähkölämmitys	1,0
Öljy- ja kaasukattilat, enintään 35 kW	
tavanomainen kattila	0,87
matalalämpötilakattila	0,90
kaasukäyttöinen kondenssikattila	0,93
Öljy- ja kaasukattilat, yli 35 kW	
tavanomainen kattila	0,89
matalalämpötilakattila	0,91
kaasukäyttöinen kondenssikattila	0,94
Kaksoispesäkattilat	
öljylämmitys	0,80
puulämmitys	0,70
Puupolttoaineita käyttävät lämmöntuottolaitteet	
Pellettikattilat	0,80
Hakekattilat	0,80
Pilkekattilat	0,70
Lämpöpumput	
Maalämpöpumppu	2,5

Rakentamismääräyskokoelman osassa D5 on esitettyä myös lämpöhäviöenergioita erilaisille lämmönjakotavoille riippuen esimerkiksi meno- ja paluuveden lämpötiloista, jakojohdojen, alapohjan ja välipohjan eristystasosta (D5 2007, s.29). Häviöt on jaettu kehitys-, jakelu-, luovutus-, säätö- ja varaajahäviöihin. Lämmönjakojärjestelmän häviöitä ei vähennetä rakennuksen lämmönkulutuksesta laskettaessa rakennuksen kuluttama lämpöenergia, kuten voidaan tehdä lämmöntuottotavan hyötysuhteen osalta.

Kuten edellä jo mainittiin, niin lämmönjakotapana vesikiertoinen patterilämmitys on yleisin koulurakennuksissa. Lämmönjakotavan hyvä toiminta vaikuttaa myös suhteellisen paljon lämmitysenergiankulutukseen. Vesikiertoisen patterilämmityksen osalta merkittäviä tekijöitä ovat lämmityspattereiden tasapainoisuus toisiinsa ja tilojen lämmitystarpeeseen nähden sekä lämmityksen säätökäyrän ja termostaattisten patteriventtiilien toimivuus. Lämmitysverkoston perussäädöllä voidaan tasapainottaa lämmityspatterit ja näin pienentää huoneiden välisiä lämpötilaeroja. Asunnoissa lämmitysenergian säästö voi olla jopa 10-15 % tehtäessä pattereiden perussäätö (Motiva Oy 2011b).

Rakennuksen lämmityksen lisäksi energiaa menee myös lämpimän käyttöveden lämmitykseen koulurakennuksissa. Koulurakennusten lämpimän käyttöveden kulutukseen kuluva energia on yleensä alle 10 % koko lämmitysenergian kulutuksesta (Mäkitalo 2010). Laskelmien oletuksena on oletettu, että lämpimän käyttöveden osuuden olevan

30 % koko käyttöveden kulutuksesta kuten Motiva neuvoo käyttämään muissa kuin asuinrakennuksissa (Motiva Oy 2011c). Lämpimän käyttöveden kulutukseen vaikuttaa koulurakennuksissa paljolti se, että millaisia tiloja ja toimintoja koulurakennus sisältää. Koulurakennuksissa olevat isot valmistuskeittiöt ja kovalla käyttöasteella olevat liikuntatilat vaikuttavat paljon lämpimän käyttöveden kulutuksen suuruuteen. Rakennuksen vesitekniikan tasolla ja laadulla on myös merkitystä vedenkulutukseen. Lämmitysenergian kulutuksen normituksessa on huomioitava, että lämpimän käyttöveden kulutusta ei korjata lämmitystarveluvulla, koska se on sääolosuhteista riippumaton (esim. yhtälö (1)).

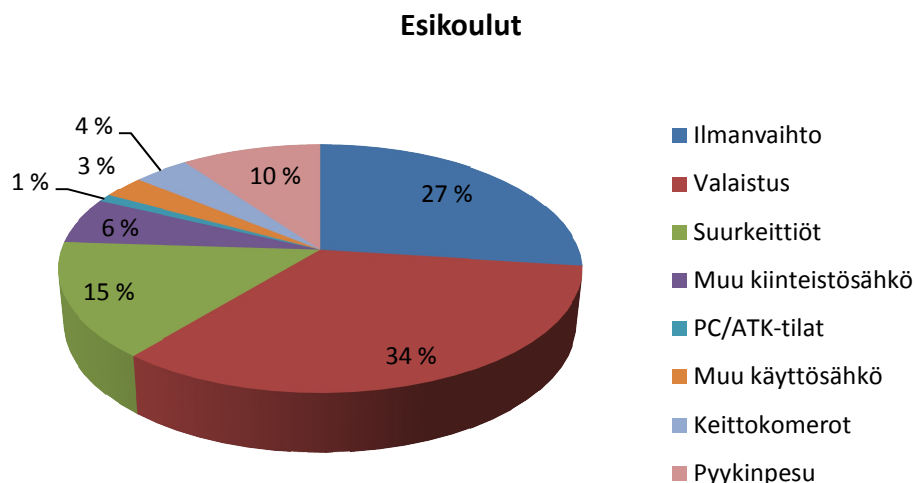
2.2.6. Rakennusautomaatio

Koulurakennusten energiatehokkuuteen ja – kulutukseen vaikuttaa paljolti myös se, että sisältääkö rakennus omaa rakennusautomaatiojärjestelmää. Rakennusautomaatiojärjestelmän kautta voidaan nähdä kuinka rakennuksen ilmanvaihtokoneet ja lämmitysjärjestelmät toimivat. Järjestelmän tasosta riippuen voidaan myös saada hälytyksiä, jos esimerkiksi lämmitysenergian kulutus nousee jonkun raja-arvon yli tai ilmanvaihtokone lakkaa toimimasta. Rakennusautomaatiojärjestelmä on hyvä olla olemassa jo energiatehokkuuden kannalta, mutta myös rakennuksen hyvän sisäilmaston pysyvyyden kannalta.

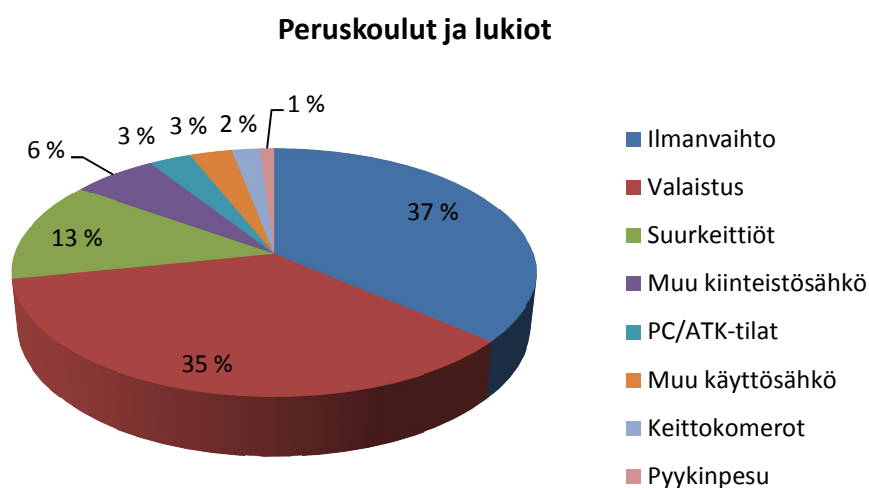
On monia osa-alueita, joihin voidaan puuttua rakennusautomaatiojärjestelmän avulla. Voidaan asettaa ilmanvaihtokoneille käyntiajat kelloajastimilla todellisen käyttöajan mukaan. Ilmanvaihtokoneet voivat toimia myös huoneen hiilidioksidipitoisuuden mukaan siten, että hiilidioksidipitoisuuden ylittäessä jonkin tietyn raja-arvon ilmanvaihdon tehokkuus nousee. Valaistusta voidaan ohjata keskitetysti kelloajastimilla ja siten pienentää sähkönkulutusta. Valaistuksen säätö voidaan toteuttaa myös liikkeen- ja läsnäolontunnistimilla. Rakennusautomaatiojärjestelmän avulla saadaan siis kuitattua monia inhimillisiä virheitä ja näin ollen parannettua myös rakennuksen energiatehokkuutta.

2.3. Sähkönkulutus

Tämä diplomityö painottuu enimmäkseen lämmönkulutukseen liittyviin energiatehokkuuden mittauksiin. Käsitellään silti lyhyesti koulurakennusten sähkönkulutukseen vaikuttavat tekijät ja sähkönkulutuksen jakautuminen. Ruotsin valtion energiavirasto eli Energiemyndigheten ja paikallinen asuntovirasto eli Boverket tekivät yhteistyönä laajan tutkimuksen koulujen ja esikoulujen energiankäytöstä sekä sisäympäristöstä. Tutkimus oli osa laajempaa Ruotsissa käynnissä olevaa projektia STIL2 (Energimyndigheten 2011). Koulurakennuksiin liittyvässä tutkimuksessa keskitytään energiankäytön osalta pääasiassa sähkönkäytön jakautumiseen, jonka perusteella voidaan tässä arvioida karkeasti myös koulurakennusten sähkönkulutuksen jakautumista Suomessa. Energiankäytön tutkimuksessa Ruotsissa tehdyssä projektissa oli mukana 129 koulua (esikouluja, peruskouluja ja lukioita). Määrä on 16 % koko Ruotsin koulukannasta. Seuraavissa kuvissa 2.13–2.14 on esitettyä koulujen sähkönkäytön jakautumista Ruotsissa tarkastelussa olevissa kouluissa vuonna 2006. (Boverket och Energimyndigheten 2007).



Kuva 2.13. Projektissa STIL2 mukana olevien Ruotsin esikoulujen sähkönkäytön jakautuminen (*Energien i våra lokaler 2010, s.12*).



Kuva 2.14. Projektissa STIL2 mukana olevien Ruotsin peruskoulujen ja lukioiden sähkönkäytön jakautuminen (*muokattu lähteestä Energin i våra lokaler 2010, s.12*).

Esikoulujen ja peruskoulujen sekä lukioiden sähkönkäytön jakautuminen on hiukan erilainen. Esikouluissa keittiöiden ja pyykinpesun osuus on suurempi sekä ilmanvaihdon osuus pienempi kuin peruskouluissa ja lukioissa. PC/atk-tilojen sähkönkäyttö on hiukan suurempaa peruskouluissa ja lukioissa kuin esikouluissa. Suomessa esikoulut ovat usein peruskoulujen yhteydessä. Joka tapauksessa valaistus ja ilmanvaihdon jälkeksi suurin osuus koulujen sähkönkäytöstä on koulujen suurkeittiöillä ja keittokomeroilla. Ne käyttävät (15–19) % koulujen sähkönkulutuksesta.

Keittiöiden jälkeen kulutuksessa tulevat pc/atk-tilat (1-3) %, pyykinpesu (1-10) % ja muu käyttösähkö (3 %).

Projektissa havaittiin myös joitakin sähköenergian kulutukseen liittyviä energiatehokkuuden parantamistoimia, jotka on esitetty alla paremmuusjärjestyksessä (Boverket och Energimyndigheten 2007, s.62–64):

- Lämmön talteenoton lisäys
- Perinteisten loisteputkivalaisimien vaihto T5-loisteputkiin
- Ilmanvaihtopuhaltimien pyörimisnopeuden pienentäminen
- Ilmanvaihdon osakäyttö
- Ilmanvaihdon tehostaminen (SFP-luvun eli ilmanvaihdon ominaissähkötehon parantaminen)
- Kaikkien hehkulamppujen vaihto energiansäästölamppuihin
- Valaistuksen osakäyttö

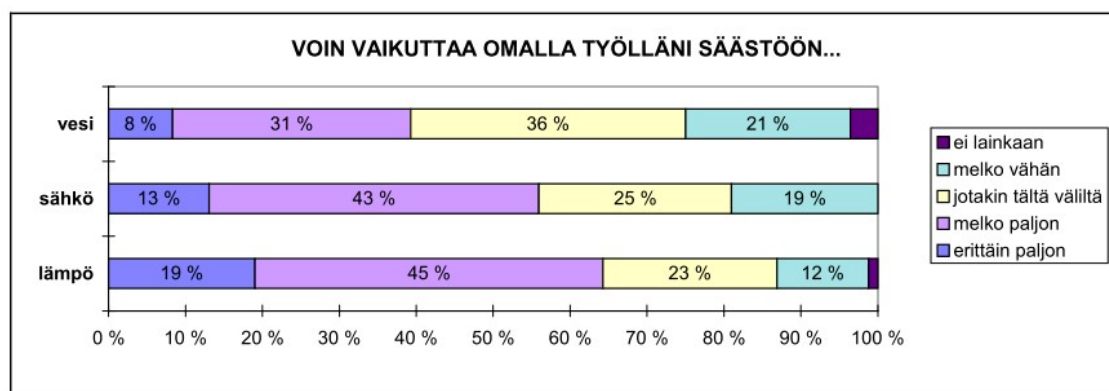
2.4. Kiinteistönhoitajat ja käyttäjät

Vaikka automatiikka koko ajan lisääntyy koulurakennuksissa, niin silti kiinteistönhoitohenkilöstön ja käyttäjien vaikutus on merkittävä rakennuksen energiankulutuksessa. Vanhassa koulurakennuskannassa rakennusautomaatiikkaa ei usein juuri ole, joka helpottaisi huomattavasti kiinteistönhoidon työtä. Kiinteistönhoitajan ammattitaito ja motivaatio, tilojen käyttöaste sekä käyttäjien aktiivisuus energiatehokkuuden hyväksi ovat asioita, joilla on merkitystä. Korkean käyttöasteen omaavassa koulussa veden-, sähkön- ja lämmönkulutus ovat varmasti tavallista suurempia.

Kiinteistönhoitohenkilöstön vaikutusmahdollisuudet rakennuksen energiankulutuksen pienentämiseen riippuvat monesta asiasta. Kiinteistönhoitajan ammattitaito näyttelee suurta roolia, sillä kiinteistönhoitajan on tunnettava työkohteensa riittävä hyvin, jotta hän voisi tehdä kaikkensa rakennuksessa esiintyvien puutteiden korjaamiseen. Kiinteistönhoitajan huono motivaatio saattaa kuitenkin pilata kiinteistönhoitajan ammattitaidon tuoman edun. Kiinteistönhoitajilla pitäisi olla siis motivoiva työympäristö, missä koulutuksen ja tavoitteiden kautta parannettaisiin rakennusten energiatehokkuutta.

Kuvassa 2.15 on vielä esitetty VTT:n tekemään tutkimukseen liittyvän haastattelun tuloksia. Haastattelu lähetettiin 120 helsinkiläiskouluun ja vastausprosentti oli 74 % (Haakana & Soitinaho 1999, s.36). Kiinteistönhoitajilta kysyttiin, että kuinka he kokevat pystyvänsä vaikuttamaan omalla työllään veden, sähkön ja lämmön säästöön. Lämmön säästön osalta 64 % kyselyyn vastanneista kiinteistönhoitajista kokee vaikuttavansa erittäin paljon tai melko paljon. Sähkön säästön osalta 56 % kokee vaikuttavansa erittäin paljon tai melko paljon sekä veden säästön osalta 39 %. Vedenkulutus riippuu enemmänkin käyttäjistä. Kyselyyn tuloksiin on vaikuttanut paljolti myös se millainen koulutustaso kiinteistönhoitohenkilöstöllä on. Jos kiinteistönhoitajan ammattitaito on puutteellinen, niin hän ei varmasti koe pystyvänsä vaikuttamaan paljoakaan esimerkiksi lämmön säästöön. Optimitalouksessa kiinteistönhoitaja tuntee hyvin vastuu-alueellaan olevan koulurakennuksen tekniset järjestelmät. Hän tietää kuinka rakennuksen energia-

tehokkuutta voidaan parantaa ja pyrkii aktiivisesti sitä tekemään, huoltaa tekniset järjestelmät säännöllisesti, reagoi hälytyksiin ja energiankulutuksen poikkeamiin sekä tekee niiden eteen parhaansa.



Kuva 2.15. Kiinteistöhoitajan mahdollisuudet vaikuttaa energiansäästöön (Haakana & Soitinaho 1999, s.37).

Vaikka kiinteistöhoitajat tekisivät kaikkensa kohteen energiatehokkuuden eteen, mutta koulurakennusten oppilaat, opettajat ja muu henkilökunta eivät välittäisi lainkaan energian- ja vedenkäytöstä, tulos ei välttämättä olisi paras mahdollinen. Rakennusten käyttäjät tarvitsevat siis opastusta, kuinka käyttää rakennuksen teknisiä järjestelmiä oikein ja energiatehokkaasti. Koulurakennuksissa on käytössä muutamia rakennuksen käyttäjille suunnattuja kestävän kehityksen ohjelmia, joiden tarkoitus on pienentää myös energian- ja vedenkäyttöä. Näitä ovat Suomen Ympäristökasvatuksen Seuran Vihreä Lippu (SYS 2011) ja OKKA -säätiön kestävän kehityksen sertifiointi (OKKA -säätiö 2011).

3. KOULURAKENNUSTEN SISÄILMASTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

3.1. Sisäilmaston määritelmä

Sisäilmasto tarkoittaa huonetilassa olevien ihmisen hyvinvointiin, terveyteen ja turvallisuuteen vaikuttavien fysikaalisten, kemiallisten ja mikrobiologisten olosuhteiden kokonaisuutta. Sisäilmastotekijät voidaan jakaa seuraaviin osiin: lämpötilat, ilman kosteus ja virtausnopeus, ilman epäpuhtaudet, valaistus ja melu. Lämpötilojen vaikutus ihmisen viihtyvyyteen aiheutuu muun muassa ilman lämpötilasta ja sen tasaisuudesta, lämpötilojen vaihtelunopeudesta ja pintojen lämpötiloista. Juuri edellä mainittuja tekijöitä sekä ilman suhteellista kosteutta ja virtausnopeutta kutsutaan yhteisellä nimityksellä termiksi olosuhteiksi. Termiset olosuhteet ovat sisäilmastotekijöitä, jotka vaikuttavat ihmisen kehon lämpötasapainoon. Ihmisen hyvinvointiin vaikuttavia ilman epäpuhtauksia tulee huoneilmaan ihmisistä, rakennusmateriaaleista, tuloilman kautta ja monista muista epäpuhtauslähteistä. (Kalema 2008). Melua ja valaistusta ei käsitellä tämän diplomityön yhteydessä.

Sisäilmastossa olevilla puutteilla ja epäkohdilla on huomattu olevan suuri merkitys ihmisten viihtyvyyteen, terveyteen ja työtehoon. Huonon sisäilmaston aiheuttamat vaikutukset riippuvat kuitenkin monesta tekijästä. Siihen vaikuttavat ihmisten terveydentila, ikä, herkistymisalttius, altistumisaika ja monet muut tekijät. Hyvän sisäilmaston merkitys on kuitenkin suuri ihmisen hyvinvoinnin kannalta, sillä vietämme rakennusten sisällä arvion mukaan jopa 90 % ajastamme. (Seppänen & Seppänen 1996, s.11).

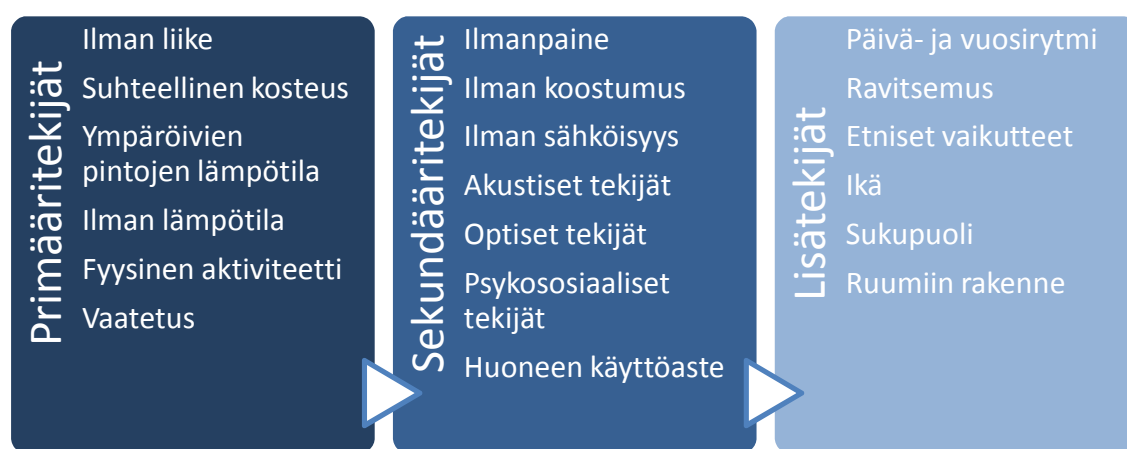
Riittävän hyvän sisäilmaston saavuttamiseksi sisäilmasto-olosuhteiden minimitasosta on annettu määräyksiä ja ohjeita. Rakentamismääräyskokoelman osa D2 käsittelee rakennuksen sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa ja siellä mainitaan, että rakennus olisi suunniteltava ja rakennettava kokonaisuutena niin, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaisiin aina tavanomaisten sääolojen ja käyttötilanteiden vallitessa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto (D2 2008, s.5). Oleskeluvyöhykkeellä tarkoitetaan huonetilan osaa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta 1,8 m:n korkeudelle lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydelle seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista.

Sisäilmastoluokitus on annettu uusien ja soveltuvin osin perusrakennuksen kohteena olevien rakennusten sisäilmaolosuhteiden tavoitteiden asettamiseen ja seurantaan. Luokitus antaa sisäilmaston tavoite – ja suunnitteluarvot. Sisäilmastoluokituksessa on annettu raja-arvot kolmelle eri sisäilmastotasolle. Näitä ovat sisäilmastoluokat S1 (yksilöllinen sisäilmasto), S2 (hyvä sisäilmasto) ja S3 (tydyttävä sisäilmasto). (Sisäilmastoluokitus 2008). Asuinrakennuksille suunnattua Asumisterveysohjetta voidaan soveltuvin osin käyttää myös koulurakennuksien sisäilmaston olosuhteiden arviointiin (Asumisterveysohje 2003).

3.2. Koulurakennusten sisäilmastoon vaikuttavia tekijöitä

3.2.1. Termiset olosuhteet

Ihmisen kehon lämpötasapainoon vaikuttavat sisäilmastotekijät eli termiset olosuhteet muodostavat ihmisten termisen viihtyvyyden. Termiseen viihtyvyyteen vaikuttavat tekijät on esitettyä hyvin kuvassa 3.1. Ne voidaan jakaa primääri-, sekundaari- ja lisäteki- jöihin. Primääri- eli päätekijöitä ovat varsinaiset sisäilmastotekijät sekä fyysinen akti- viteetti ja vaatetus. Sekundääritekijät ovat päätekijöihin vahvasti liittyvät tekijöitä, mutta eivät suoranaisesti varsinaisia sisäilmastotekijöitä. Lisäteki- jät liittyvät taas enemmänkin ihmisten yksilöllisiin ominaisuuksiin, sillä toisilla ihmisillä on taipumus herkistyä hel- pommin samoissa olosuhteissa.

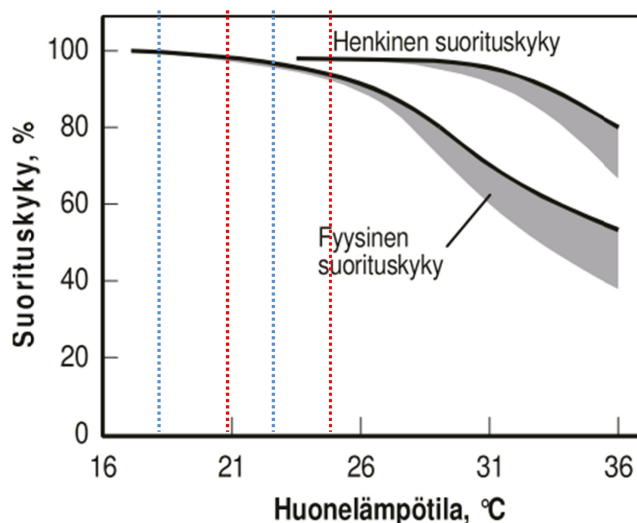


Kuva 3.1. Termiseen viihtyvyyteen vaikuttavia primääri-, sekundaari- ja lisäteki- jöitä (muokattu lähteestä Airaksinen 2009).

Käsitellään tarkemmin yksi tärkeimmistä termisiin olosuhteisiin liittyvistä si- säilmastotekijöistä eli ilman lämpötila. Huoneen lämpötilalla on suuri merkitys ihmisten fyysiselle ja henkiseen suorituskävyille. Kuvassa 3.2 on esitettyä huonelämpötilan vai- kutus ihmisten henkiseen ja fyysiseen suorituskävyyn. Fyysinen suorituskävy alkaa laskea mentäessä 16 °C yläpuolelle, mutta koulurakennuksessa toimivien opettajien ja opiskelijoiden kannalta oleellisempi henkinen suorituskävy alkaa laskea lämpötilan noustessa 23 °C yläpuolelle. Kuvaan on merkitty punaisella katkoviivalla istumatyön suositeltu lämpötila-alue, joka on välillä 21–25 °C. Sinisellä katkoviivalla on merkitty kevyen työn suositeltu lämpötila-alue, joka on välillä 18–23 °C. (Seppänen & Seppänen 1996, s.17).

Rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan oleskeluvyöhykkeen huone- lämpötilan suunnitteluarvona käytetään lämmityskaudella yleensä lämpötilaa 21 °C ja kesäkaudella lämpötilaa 23 °C. Poikkeuksia ovat esimerkiksi porrashuoneet, pesuhuoneet ja liikuntahallit, joissa lämpötila voi olla matalampi. Rakennuksen käyttöaikana lämpötila ei saisi oleskeluvyöhykkeellä olla kuitenkaan korkeampi kuin 25 °C. (D2 2008, s.6). Sisäilmastoluokituksen sisäilmastoluokka S3 on viranomaissäädösten mu-

kainen, mutta huonelämpötilan sijaan lämpötilana on käytetty operatiivisia lämpötiloja (Sisäilmastoluokka 2008, s.10). Jos huone sisältää laajoja pintoja, joiden lämpötila poikkeaa ilman lämpötilasta, olisi tällöin käytettävä operatiivista lämpötilaa. Operatiivinen lämpötila on sen tasalämpöisen tilan lämpötila, jossa kehon lämmönsiirto on sama kuin tarkasteltavassa tilassa (Kalema 2008). Se siis kuvaa sisäilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen (D2 2008, s.3). Liitteessä 1 on esitettyä sisäilmastoluokkien S1, S2 ja S3 mukaiset operatiivisten lämpötilojen tavoitearvot. Viranomaissäädösten mukaisen sisäilmastoluokan S3 mukaan operatiivisen lämpötilan pitäisi olla välillä (18–25) °C ja suositeltava lämpötila-alue on välillä (20–22) °C (Sisäilmastoluokka 2008, s.10).

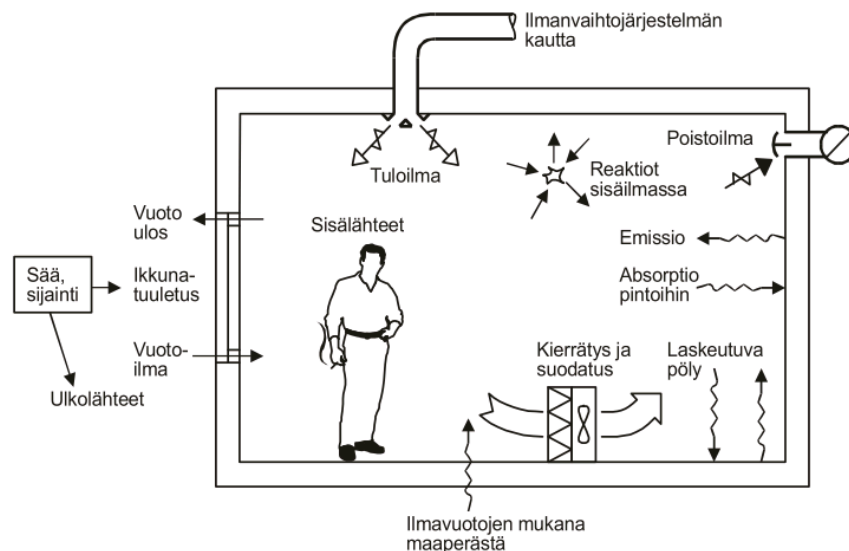


Kuva 3.2. Huonelämpötilan vaikutus ihmisen henkiseen ja fyysiseen suorituskykyyn (muokattu lähteestä Seppänen & Seppänen 1996, s.15).

3.2.2. Ilmanlaatu

Termisten olosuhteiden lisäksi merkittävä sisäilmastotekijä on ilmanlaatu. Ilmanlaatuun vaikuttavien epäpuhtauslähteiden määrä ja laatu vaihtelevat ajallisesti, sillä niihin vaikuttavat niin ihmisten toiminta kuin monet muut olosuhdetekijät. Kuvassa 3.3 on esitettyä tyypillisiä epäpuhtauslähteitä sekä ilmanlaatuun vaikuttavia muita tekijöitä. Ilmanlaatu voi siis huonontua rakennukseen tulevan vuoto- ja ilmanvaihtoilman, rakennus- ja sisustusmateriaalien (absorptio ja emissio), pölyn ja ihmisistä tulevien epäpuhtauslähteiden kautta. Ilmanlaatuun vaikuttavia yksittäisiä tekijöitä ovat esimerkiksi hiilidioksidi, pölypunkit, radon, homeet, bakteerit ja virukset. Ihmisten hiilidioksidin tuotto on lähes verrannollinen ihmisten hengityksen ja ihon kautta vapautuvien epäpuhtauksien määrään. Näin ollen hiilidioksidia käytetään kuvaamaan ilmanlaatua, vaikka hiilidioksidipitoisuus ei olisikaan itsessään haitallisen korkea. (Seppänen & Seppänen 1996, s.25–39). Haitallisen hiilidioksidipitoisuuden raja-arvo on 5000 ppm (Hietala & Kaivanto 2004, s.281). Rakentamismääräyskokoelman (D2 2008, s.7), Sisäilmastoluokituksen (Sisäilmastoluokitus 2008, s.11) ja Asumisterveysohjeen (Asumisterveysohje 2003,

s.22) asettamat raja- ja ohjearvot ovat huomattavasti matalampia, sillä raja-arvot perustuvat myös muihin hiilidioksidin tuottoon verrannollisten epäpuhtauslähteiden tuottoon. Hiilidioksidin raja-arvot on esitetty jo edellä luvussa Koulurakennusten ilmanvaihto, mutta taulukkoon 3.1 on vielä tehty koonti raja-arvoista.



Kuva 3.3. Ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä (Seppänen & Seppänen 1996, s.26).

Taulukko 3.1. Rakentamismääräyskokoelman osan D2 (D2 2008, s.7), Asumisterveysohjeen (Asumisterveysohje 2003, s.22) ja Sisäilmastoluokituksen 2008 (Sisäilmastoluokitus 2008, s.11) asettamat raja-arvot huonetilan hiilidioksidipitoisuudelle.

Määräys/ohje	Hiilidioksidipitoisuus (ppm)	Lisätietoja
Rakentamismääräyskokoelman osa D2	$\leq 1\ 200$	tavanomaisissa sääoloissa ja huonetilan käyttöaikana
Asumisterveysohje	$\leq 1\ 500$	terveydensuojelulain mukainen raja
Sisäilmastoluokitus 2008	riippuu sisäilmastoluokasta	tavoitearvoja uudisrakennuksille ja perusparannuskohteille
S1	≤ 750	olosuhteiden pysyvyyden oltava 95 % käyttäjasta toimi- ja opetustiloissa
S2	≤ 900	olosuhteiden pysyvyyden oltava 90 % käyttäjasta toimi- ja opetustiloissa
S3	$\leq 1\ 200$	rakentamismääräyskokoelman mukainen sisäilmastoluokka

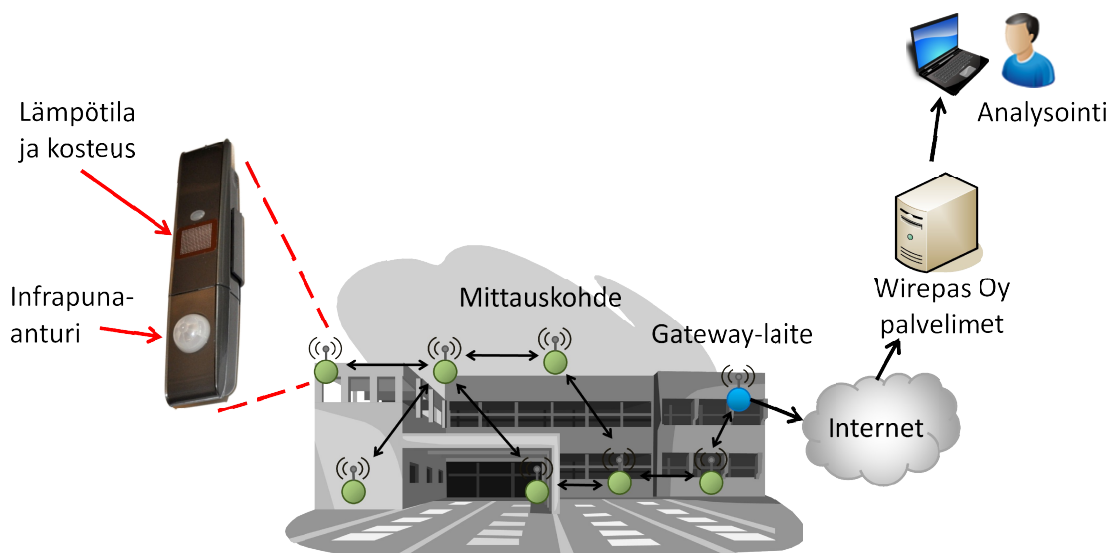
4. KOULURAKENNUSTEN ENERGIATEHOKUUDEN JA SISÄILMASTON MITTAUKSIA

4.1. Langaton mittausteknologia

4.1.1. Langattoman mittausverkon toiminta

Lämpötilaolosuhteita ja ilmanlaatua on mitattu myöhemmin esiteltävissä kahdessa esimerkkikoulussa käyttäen apuna langatonta mittausverkkoa. Lämpöolosuhteita seuraamalla on pyritty etsimään selittäviä tekijöitä mittauskohteiden poikkeaviin lämmönkuluihin. Energiatehokkuus ei saisi kuitenkaan mennä terveellisyyden edelle, jolloin kohteissa on tehty myös ilmanlaatuun liittyviä mittauksia tilojen hiilidioksidipitoisuuksia seuraamalla. Langattomia mittalaitteita on hyödynnetty myös lämmön talteenoton hyötysuhteen määrittämisessä toisen koulurakennuksen osalta.

Langattomat mittausverkot kohteisiin on rakennettu Tampereen teknillisen yliopiston tietokonetekniikan laitoksen ja laitokselta lähteneen spin-off -yrityksen Wirepas Oy:n kehittelemillä langattomilla mittalaitteilla, jotka voivat sisältää useampia antureita. Langattoman mittausverkon pääperiaate on esitettyä kuvassa 4.1. Verkossa oleva mittalaite voi kuvan mukaisesti siis sisältää useampia antureita. Kuvassa 4.1 esitetty mittalaite sisältää lämpötila-, kosteus- ja infrapuna-anturin. Lisäksi mittalaitteessa on valoisuusanturi, mutta valkoinen suojakuori vääristää valoisuusanturin lukemia.

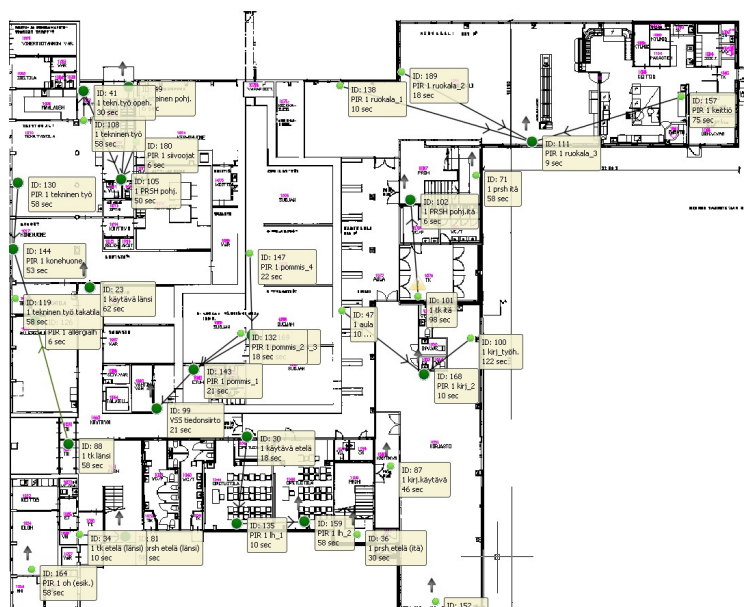


Kuva 4.1. Langattoman mittausverkon toimintaperiaatekuva (muokattu lähteestä Määttä 2011).

Mittauskohteissa olevat pääosin langattomat mittalaitteet siirtävät mitattua tietoa muille mittalaitteille, jotka välittävät tiedon Internetiin yhteydessä olevalle Ether-

net Gateway -laitteelle tai mittalaite lähettää tiedot suoraan gateway-laitteelle etäisyyden ollessa sopiva. Internetin kautta mittalaitteilta saatu tieto siirtyy Wirepas Oy:n palvelimelle ja sieltä Java-pohjaiseen käyttöliittymään asiakkaan analysoitavaksi. Käyttöliittymässä on monenlaisia mittausverkon hallinta- ja mittaustyökaluja, joista esimerkiksi mittalaitteiden mittaustiedosta saatavat erilaiset trendikäyrät ja mittausverkon toimintaan liittyvät hälytykset mittalaitteiden paristojen loppumisesta tai mittausverkokatkosta.

Kuvassa 4.2 on esitettyä mittausjärjestely myöhemmin esiteltävän mittauksessa olleen esimerkkikoulun B ensimmäiselle kerrokselle. Käyttöliittymään voidaan tuoda rakennuksen kunkin kerroksen pohjakuva, joihin asetetaan mittalaitteiden paikat vihreillä palloilla. Käyttöliittymästä nähdään siis suoraan reaaliaikaisesti mikä on esimerkiksi lämpötila kussakin tilassa. Kuvassa 4.2 on nuolilla kuvattuna mihin kukin mittalaite edelleen lähettää omat ja muilta mittalaitteilta tulleet antureiden mittaustulokset, jotka päätyvät lopulta gateway-laitteelle (sininen pallo).



Kuva 4.2. Koulun B ensimmäisen kerroksen mittalaitteet käyttöliittymän karttapohjalla.

Mittausverkkoa lähdetään asentamaan sen jälkeen, kun ainakin yksi gateway-laitte on saatu yhdistettyä onnistuneesti Internetiin. Mittalaitteiden asennus aloitetaan gateway-laitteen läheisyydestä ja ne asennetaan sopivan välimatkan päähän toisistaan, jotta mittausverkon toiminta olisi mahdollisimman luotettava. Sopivan välimatkan etäisyydessä toimii apuna mittalaitteissa itsessään oleva hakutoiminto, joka ilmoittaa vihreätä ja punaista väriä käyttäen onko asennuspaikka hyvä vai huono. Asennuspaikan ollessa huono, mittalaite on asennettava lähemmäksi muita mittalaitteita tiedonsiirron varmistamiseksi eli mittausverkon on oltava tiheämpi. Mittalaitteita asennettaessa ne alkavat itse rakentaa tiedonsiirtoverkkoa keskenään. Mittausverkko käyttäytyy täysin itsenäisesti ja korjaa itse itsensä etsien uusia reittejä tiedonsiirrolle, jos esimerkiksi jokin mittalaite poistetaan verkosta tai lisätään verkkoon.

Langattoman mittausverkon luotettavuudessa auttaa gateway-laitteeseen lisätyt muistikortit. Jos mittausverkon Internet-yhteydessä on jotakin vikaa, verkon mittalaitteiden mittausdata siirtyy gateway-laitteen muistikortille. Tällöin Internet-yhteyksissä olevat ongelmat eivät häiritse mittausverkon toimintaa. Internet-yhteyden kytkeytyessä taas toimimaan, gateway-laite lähettää ensin muistikortin tiedot palvelimelle. Muistikortin tiedot siirtyvät Internetiin moninkertaisella nopeudella verrattuna reaaliaikaisen mittauksen tiedonsiirtokykyyn.

Taulukkoon 4.1 on vielä koottu perustietoja aikaisemman tietokonetekniikan laitoksen TUTWSN Low Energy – mittausverkon ja nykyisen WIREPAS Low Energy – mittausverkon keskeisistä ominaisuuksista. Mittalaitteiden mittausväli on käyttäjän asetettavissa välille 30 s – 15 min ja erityyppisille antureille voi asettaa erilaisia aikavälejä. Tiedonsiirtoviive mittalaitteiden välillä on tyypillisesti alle 30 s tiedonsiirtohyppyjen ollessa 10. Tiedonsiirtohyppyllä tarkoitetaan tapahtumaa, kun mittalaitteelta lähtenyt mittausdata siirtyy seuraavalle mittalaitteelle, joka edelleen lähettää mittausdatan eteenpäin eli tekee seuraavia tiedonsiirtohyppyjä, kunnes data lopulta päättyy gateway-laitteelle ja lopulta käyttöliittymään. Yksi tiedonsiirtohyppyn kantomatka on välillä 10–50 metriä ja tiedonsiirtohyppyjen määrä on tyypillisesti välillä 1-15. Mittausverkko voi sisältää tuhansia mittalaitteita. Käytösähkönä laitteilla toimii pääosin AA-paristot, mutta joidenkin mittalaitteiden osalta on käytettävä verkkovirtaa niiden sisältävien antureiden suuren energiankulutuksen vuoksi. Paristojen toiminta-aika riippuu mittalaitteen mittausvälistä, mutta yleensä se on välillä 2-4 vuotta. Mittalaitteiden käyttölämpötila on välillä -40°C - $+60^{\circ}\text{C}$ ja se määräytyy litiumparistojen käyttölämpötilan mukaan.

Taulukko 4.1. TUTWSN Low Energy- ja nykyisen WIREPAS Low Energy- verkon ominaisuuksia (Mittausverkko 2011; Wirepas Oy 2011).

Ominaisuudet	TUTWSN/WIREPAS Low Energy
Taajuusalue	2,4 GHz
Mittausväli (säädettävä)	30 s - 15 min
Tiedonsiirtoviive (tyypillinen)	< 30 s (10 hyppyä)
Yhden tiedonsiirtohyppyn kantomatka	10–50 m
Hyppyjen määrä	Automaattinen reititys (tyypillinen: 1-15)
Verkon koko	Tuhansia laitteita
Käytösähkö	paristot (2xAA) tai DC-virtalähde
Toiminta-aika paristoilla	2-4 vuotta
Käyttölämpötila	-40°C ... $+60^{\circ}\text{C}$

4.1.2. Langattomat mittalaitteet

Käytössämme on ollut taulukon 4.2 mukaisia mittalaitteita eli yhteensä seitsemää eri tyyppiä, jotka ovat esitettyinä myös kuvassa 4.3. Kaikki mittalaitteet sisältävät vähintään valoisuusanturin. Mittalaite 1 on tiedonsiirrossa Internetiin käytetty gateway-laite, missä on vain valoisuusanturi. Mittalaitteita 2 on käytetty lähinnä tiedonsiirrossa varsinaiseen

mittaukseen tarkoitettujen mittalaitteiden välillä. Mittalaite 3 on ollut käytössä ulkolämpötilan mittauksessa, koska siinä on toinen lämpötila-anturi erillisessä valkoisessa kutistuskassa, jolloin auringon lämpösäteilyn vaikutusta on minimoitu. Käytössä on tosin ollut myös muutama mittalaite, jossa toinen lämpötila-anturi on ollut kotelon sisällä kuvan 4.3 mukaisesti (mittalaite 5). Mittalaitteen kotelon takana on avoin verkko, minkä kautta ulkoilma on päässyt liikkumaan anturin luokse. Mittalaite 4 on muuten samanlainen kuin mittalaite 3, mutta siinä on lisäksi kosteusanturi erillisessä kutistussukassa. Sitä on myös hyödynnetty ulkolämpötilojen määrittämisessä. Mittalaitteita 5 ja 6 on hyödynnetty luokkatilojen lämpötilaolosuhteiden määrittämisessä esimerkkikouluissa. Mittalaite 6 sisältää myös liikkeentunnistusan turin, jonka perusteella voi arvioida luokan käyttöastetta. Mittalaitteella 7 on mitattu ilman hiilidioksidipitoisuutta. Hiilidioksidianturi on niin paljon energiaa vaativa, että se vaatii käyttö sähköseen verkkovirran paristojen sijaan. Mittalaite 7 sisältää myös lämpötila-anturin, mutta hiilidioksidianturin lämmittävän vaikutuksen vuoksi lämpötila-anturin mittaustulokset eivät ole luotettavia tässä mittalaitteessa.



Kuva 4.3. Mittauksissa käytössä olleita langattomia mittalaitteita.

Taulukko 4.2. Langattomien mittalaitteiden sisältämät anturit ja mittalaitteiden käyttökohteet tehdyissä mittauksissa.

Mittalaite (kuva 4.3)	Anturit	Missä käytetty
1	valoisuus	gateway, tiedonsiirto Internetiin
2	valoisuus, lämpötila	tiedonsiirto mittalaitteiden välillä
3	valoisuus, lämpötila (2)	ulkolämpötilat
4	valoisuus, lämpötila (2), kosteus	ulkolämpötilat
5	valoisuus, lämpötila, kosteus	lämpötilaolosuhteet sisällä
6	valoisuus, lämpötila, kosteus, liikkeentunnistus	tilojen lämpötilaolosuhteet ja käyttöaste
7	valoisuus, lämpötila, hiilidioksidi	tilojen hiilidioksidipitoisuus

Alla olevaan taulukkoon on vielä koottu mittalaitteiden antureiden ominaisuuksia. Taulukkoon on kirjattu antureiden mittausalue sekä mittauslaitteen tarkkuus ja mittausresoluutio. Mittauslaitteen tarkkuus ilmaisee mittauslaitteen kyvyn antaa virheettömiä tuloksia (Sirén 1995, s.21). Mittausresoluutiolla, josta käytetään myös nimeä erottelukyky tai erottelukynnys, tarkoitetaan anturin kykyä erottaa toisistaan lähellä olevia mittaussuureen arvoja. Se siis kertoo kuinka pienet erot näkyvät mitattavan suureen arvossa. (Aumala 1999, s.160). Hyvä erottelukyky ei välttämättä tarkoita hyvää mittaus-tarkkuutta eikä päinvastoin. Sähköisten antureiden osalta lukematarkkuus ei ole sama kuin mittausresoluutio. Lukematarkkuus voidaan asettaa sähköisissä antureissa parhaimmillaan niin tarkaksi kuin halutaan riippumatta mittausresoluutiosta.

Valoisuus- ja kosteusanturin mittaustuloksia ei ole hyödynnetty tässä diplomityössä. Liikkeentunnistusanturin aktiviteettilukema perustuu siihen, kuinka pitkän aikavälin anturi näkee liikettä asetetun mittausvälin aikana. Lukema esitetään prosentteina eli mikä on anturin näkemän liikkeen ajan osuus koko aikavälillä.

Taulukko 4.3. Mittalaitteiden antureiden ominaisuuksia (Dallas Semiconductor & Maxim 2011; Dynament 2011; Malota 2011; Mittausverkko 2011; Sensirion 2011; Wirepas Oy 2011).

Anturi	Mittausalue	Mittauslaitteen tarkkuus ⁽¹⁾	Mittausresoluutio ⁽²⁾
Valoisuus ⁽³⁾	0...1000 lux	-	-
Lämpötila	- 55,0...+125,0 °C	±0,5 °C (0...70 °C), ±2 °C (-55,0...+125,0 °C)	-
Suhteellinen kosteus ⁽³⁾	0...100 % RH	±3 % RH (tyypillinen)	±0,05 % RH
Liikkeentunnistus	havainnointikeilan kantama 5 m ja leveys 7 m, 0...100 % (aktiviteetti)	-	-
Hiilidioksidi ⁽³⁾	0...5000 ppm	±2 % mittausalueen maksimista (100 ppm) tai ±10 % lukemasta (valitaan suurempi)	±50 ppm (0...2500 ppm), ±100 ppm (2501...5000 ppm)
<p>(1) Taulukossa on mukana mittauslaitteen tarkkuuden osalta mittauslaitteen suorituskyvyn asetamat rajoitukset ja epälineaarisuus. Mittauslaitteen tarkkuuteen vaikuttaa myös mittauslaitteen stabiilius, hystereesi, ajautuma sekä mittauksen toistuvuus. Lisäksi hiilidioksidianturin lämpötilakompensoinnin osalta voi esiintyä epätarkkuutta.</p> <p>(2) Mittausresoluutiolla eli erottelukyvyllä tarkoitetaan kuinka hyvä erottelukyky anturilla on. Hyvä erottelukyky ei välttämättä tarkoita hyvää mittaus-tarkkuutta eikä päinvastoin. Sähköisten antureiden osalta lukematarkkuus ei ole sama kuin mittausresoluutio. Lukematarkkuus voidaan asettaa sähköisissä antureissa niin tarkaksi kuin halutaan riippumatta mittausresoluutiosta.</p> <p>(3) Valoisuus- ja lämpötila-antureiden tuloksia ei ole hyödynnetty mittauksissa.</p>			

Taulukon 4.3 viitteistä nähdään, että mittauslaitteen tarkkuuteen vaikuttavat myös mittauslaitteen stabiilius, hystereesi, ajautuma sekä mittauksen toistuvuus. Lisäksi hiilidioksidianturin lämpötilakompensoinnin osalta voi esiintyä epätarkkuutta. Mittauslaitteen stabiilius tarkoittaa mittauslaitteen kykyä säilyttää mittausominaisuutensa. Sta-

biilin mittarin ominaisuudet eivät siis muutu ajan kuluessa. (Sirén 1995, s.78). Mittauslaitteen hystereesi kuvaa mittaussuureen muuttumisen viivästymistä niin, että hetkellinen suureen arvo ei riipu ainoastaan mittaushetkellä vaikuttavista tekijöistä, vaan myös suureen aikaisemmasta kehityksestä. Mittausarvo on siis tietyn todellisen mittausravon kohdalla erilainen riippuen siitä onko mittaussuureen muutossuunta kasvava vai vähenävä (Aumala 1999, s.160).

Mittauslaitteen ajautumalla tarkoitetaan mittauslaitteen mittausominaisuuksien muutosta tietyn (pitkähkön) ajanjakson kuluessa normaaleissa käyttöolosuhteissa (Sirén 1995, s.21). Mittauksen toistuvuus taas tarkoittaa suureen saman arvon peräkkäisten mittaustulosten yhtäpitävyyttä, kun yksittäiset mittaukset suoritetaan lyhyin aikavälein, samalla menetelmällä, saman havaitsijan toimesta, samoilla mittalaitteilla, samassa paikassa ja olosuhteissa (Sirén 1995, s.21). Esimerkiksi käytetyn hiilidioksidianturin osalta stabiiliutta ja hystereesiä ei ole ilmoitettu, ajautuma on ± 1 % mittausalueen maksimista kuukaudessa (50 ppm) lämpötilassa 20 °C sekä toistuvuus ± 2 % mittausalueen maksimista (100 ppm) lämpötilassa 20 °C. Ajautuman aiheuttaman virheen minimoimiseksi anturit suositellaan kalibroitavaksi vuoden välein.

4.2. Lämpökameramittaukset

Lämpökamerakuvauksilla pyritään arvioimaan rakennusten vuotokohtia sekä yksittäisiä ja rakennusten liitosten välisiä kylmäsiltoja. Kylmäsiltoja tarkoitetaan rakennusosassa olevaa, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavaa rakenneseosa, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvissa olosuhteissa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi (C4 2002, s.3). Lämpökameraa voidaan käyttää myös taloteknisten järjestelmien kunnonarviointiin sekä muihin rakennuksen ja rakenteiden toimintaan sekä olosuhteisiin liittyviin tekijöihin, kuten esimerkiksi ilman virtausreittien havainnointiin.

Lämpökamerakuvaus perustuu kuvauskohteen pinnasta luonnostaan lähtevän lämpösäteilyn mittaamiseen. Lämpösäteily on kappaleen oman lämpötilansa perusteella lähettämää sähkömagneettista säteilyä (Mills 1999, s.13). Sen voimakkuus on riippuvainen pintalämpötilasta ja pinnan emissiivisyydestä. Emissiivisyys (emittanssi, emissioeroin) tarkoittaa todellisen pinnan oman lämpötilansa perusteella lähettämän lämpösäteilyn, emission, suhdetta mustan kappaleen ideaalisen pinnan vastaavassa lämpötilassa lähettämään säteilyyn (Mills 1999, s.15). Emissiivisyys on materiaalista riippuen välillä 0-1 ja rakennusmateriaalien emissiivisyydet ovat tyypillisesti välillä 0,85–0,95 (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.17). Lämpökamera on siis lämpösäteilyn vastaanotin, missä lämpökameran ilmaisimien muuttua kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi. Lämpötilatiedosta muodostetaan lämpökuvaa digitaalisesti kohteesta reaaliajassa. (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.15).

Rakennusten lämpökuvauksissa käytettävien lämpökameroiden tulisi olla mittaavia, tasapainotettuja ja kuvantavia mittalaitteita. Mittaavalla lämpökameralla voidaan mitata suoraan pintalämpötiloja. Kuvantava mittalaite tarkoittaa, että lämpökamera

muodostaa kuvattavasta kohteesta lämpökuvan, missä näkyy kohteen pintalämpötilajakauma. Tasapainotus tarkoittaa, että kameran lämpötilavaihtelut eivät vaikuta mittaustulokseen. Lämpökameran tulisi olla myös kalibroitu. Kalibrointi on suoritettava vähintään kahden vuoden välein kalibrointiin valtuutetussa laitoksessa. (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.19).

Ennen varsinaista lämpökamerakuvausta kuvattavan pinnan emissiivisyys lisäksi on huomioitava kuvauskulma – ja etäisyys. Kuvauskulman ollessa yli 30° jyrkempi koh-tisuoraan nähden mittaustuloksesta voi olla jopa yli 2 °C (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.15; Urhon 2003 mukaan). Kuvausetäisyys vaikuttaa lämpökamerakuvauskuvaan siten, että mitä pidempi etäisyys on, sitä suurempaa aluetta yksi lämpökameran kuvauspiste esittää. Yksittäisen kuvauspisteen esittämän alueen ollessa suuri, pieni yksittäinen ympäristös-tään poikkeava lämmin/kylmä kohta jää helpommin huomioimatta. Tyypillinen kuva-usetäisyys sisäkuvauksessa on 2-4 m ja ulkokuvauksessa alle 10 m, jos se vain on olo-suhteet huomioiden mahdollista (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.52). Lämpökameraku-vauskuvaan vaikuttavat jonkin verran myös ympäristön ja ilman lämpötila sekä ilman suh-teellinen kosteus (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.17–18; Urhon 2003 mukaan). Ympä-ristön lämpötila eli taustalämpötila on asetettava lämpökameran asetuksiin. Kiinteistö-kuvauksissa se olisi määritettävä tilakohtaisesti.

Lämpökameramittaukset suoritetaan rakennuksen alipaineiselta puolelta, jolloin mahdolliset eristeviat ja vuotokohdat havaitaan paremmin. Jos kuvaus suoritetaan yli-paineiselta puolelta, vikakohta saattaa olla lämpötilaltaan samanlainen muun ympäristön kanssa vuotoilmavirtojen siirtyessä kuvattavalta puolelta ulos. Rakennukset tehdään yleensä alipaineiseksi luvun 2.2.4 mukaisesti, jolloin lämpökamerakuvaus suoritetaan sisätiloissa. Kuitenkin varsinkin korkean rakennuksen ollessa kyseessä, rakennuksen yläosat saattavat olla ylipaineisia, joka tarvitsee huomioida mittauksissa. Lämpökame-rakuvauksen yhteydessä tulisikin mitata paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkoilman välil-lä. Rakenteiden lämpötekniistä toimintaa tarkasteltaessa lämpökameramittauksien aikana lämpötilaero ulko- ja sisäilman välillä tulisi olla vähintään 15 °C (Ratu 1213-S 2005, s.3). Lämpökamerakuvauskuvaus on asetettu myös muita kriteerejä liittyen viimeisen 12 h olosuhteisiin sisä- ja ulkoilmassa sekä lämpötilojen muuttumiseen kuvauksien aikana. Vaadituista mittaolosuhteista ja valmistelevista toimenpiteistä ennen lämpökamera-mittausta on kerrottu lisää Rakennuksen lämpökuvauksen – ohjetiedostossa Ratu 1213-S (Ratu 1213-S 2005).

Ulkoilman yleiset tiedot (lämpötila, tuulen nopeus ja suunta, auringon aiheutta-ma lämpösäteily (pilvinen, puolipilvinen tai aurinkoinen)) tulisi ottaa ylös 12–24 tuntia ennen lämpökameramittauksia. Lisäksi mittausten alussa ja lopussa tulisi kirjata ulkoil-man lämpötila, auringonpaiste (pilvinen, puolipilvinen tai aurinkoinen), tuulen nopeus ja suunta, sisäilman lämpötila jokaisesta tutkittavasta tilakokonaisuudesta tai lämpötek-nisesti erilaisesta tilasta (vain silloin kun mitataan lämpökameralla kyseisestä tilaa) ja vallitseva paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä jokaisesta kerroksesta ja vähintään kahdes-ta eri ilmansuuntaan olevasta ulkoseinästä. (Ratu 1213-S 2005)

Lämpökamerakuvia pyritään ottamaan vain vikakohdista liiallisen kuvamateriaalin välttämiseksi. Tosin hyvistä rakenteista voidaan ottaa lämpökamerakuvia vertailukohdan hakemiseksi. Lämpötilaindeksillä voidaan arvioida rakennuksen vaipan lämpöteknistä toimivuutta. Se määritetään seuraavan yhtälön mukaisesti

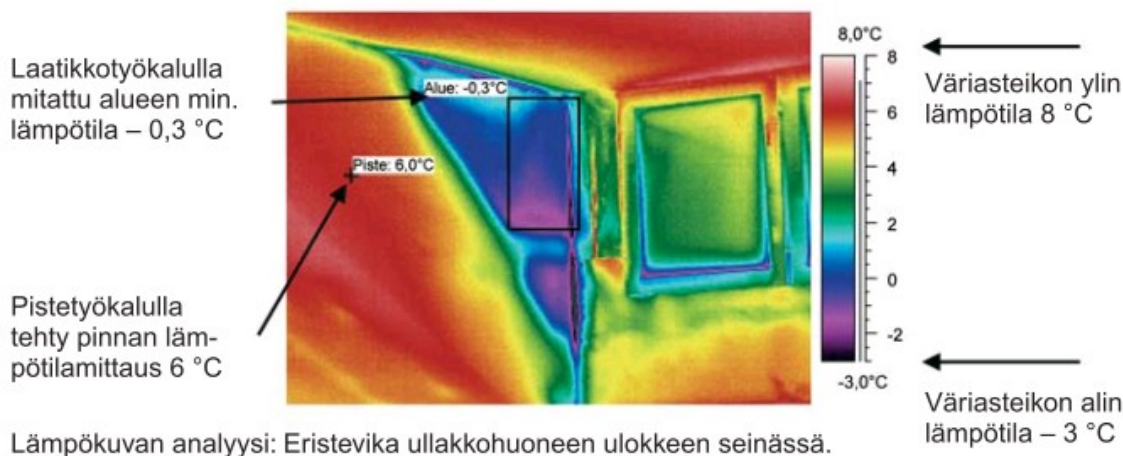
$$TI = \frac{(T_{sp} - T_0)}{(T_i - T_0)} \times 100, \quad (9)$$

missä TI on lämpötilaindeksi (%), T_{sp} sisäpinnan lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), T_0 ulkoilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja T_i sisäilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) (Ratu 1213-S 2005, s.2). Tilan ollessa liian alipaineinen tai ylipaineinen, voidaan lämpötilaindeksillä saada vääriä tuloksia. Tällöin olisi ensin tasapainotettava ilmanvaihto (Paloniitty & Kauppinen 2011, s.71). Lämpökamerakuvia otetaan poikkeavista pintalämpötiloista, jotka eivät täytä 70 % lämpötilaindeksiä tai, jos epäillään rakenteen lämpöteknistä toimintaa. Lämpötilapoikkeamien syy löytyy pääasiassa vaipan ilmavuodoista, lämmöneristeiden puutteista ja asennusvirheistä sekä kylmäsilloista. Poikkeavista kohdista tulisi ottaa lämpökuvan lisäksi normaali valokuva. (Ratu 1213-S 2005, s.4).

Kuvassa 4.4 on esitettyä yksittäinen lämpökamerakuva. Värit eivät kerro mitään kuvauskohdan viallisuudesta, koska väri-lämpötila-asteikko skaalautuu jatkuvasti kuvauskohdassa esiintyvien lämpötilojen mukaan. On siis tiedettävä väriasteikon skaala ennen kuin voidaan analysoida tarkemmin lämpökamerakuvaa.

Näin luetaan lämpökuvaa:

Väriasteikko kuvaa pinnan lämpötilajakaumaa

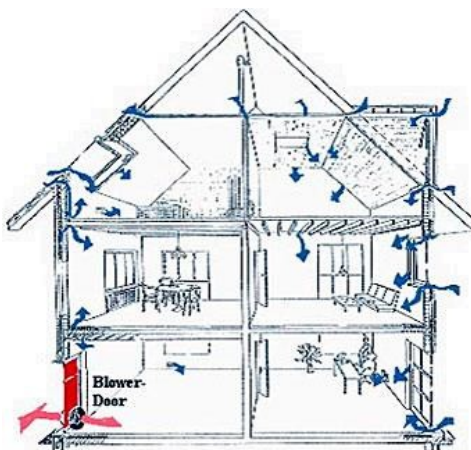


Kuva 4.4. Lämpökuvauksen tulkinta ja siihen liittyvät vaatimukset (Ratu 1213-S 2005, s.5).

4.3. Ilmanpitävyydsmittaukset

4.3.1. Ilmanpitävyyden määrittäminen painekoemennetelmällä

Painekoemennetelmä on yleisin mittausmenetelmä määrittäessä yhtälön (4) mukaista vuotoilmakerrointa mittaamalla rakennuksen ilmanvuotoluku n_{50} . Mittaukset tehdään asentamalla kohteen ulko-oveen kuvan 4.5 mukainen tietokoneohjattava painekoelaitteisto eli niin sanottu blower door -laitteisto. Mittausjärjestelmässä on säädettävä apupuhallin, ulko- ja sisäilman välisen paine-eron mittaus sekä tilavuusvirran mittaus. Painekoelaitteiston puhaltimen avulla saadaan luotua rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välille mittauksessa tarvittava paine-ero. Normaalisti halutun paine-eron ylläpitämiseksi vaadittu puhaltimen läpäisemä ilmavirtaus mitataan vähintään viidellä eri paine-erolla ja 10 Pa välein (Kauppinen 2010, s.125). Tietokoneohjelmiston luomalta regressiokäyrältä saadaan tuloksena 50 Pa:n paine-eroa vastaava ilmavirtaus.



Kuva 4.5. Ilmanpitävyyden mittaus blower door – laitteistolla, periaatekuva (Subjin Insulation Services 2011).

Seuraavan yhtälön (10) mukaisesti puhaltimen läpi menevän ilmavirtauksen perusteella voidaan määrittää rakennuksen ilmanvuotoluku

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V}, \quad (10)$$

missä \dot{V}_{50} on 50 Pa paine-erolla puhaltimen kautta siirtyvä tilavuusvirta (m^3/h) ja V on rakennuksen sisätilavuus (SFS-EN 13829 2000, s.18). Rakennukseen luodaan sekä 50 Pa ali- että ylipaine ja määritetään molemmille tapauksille ilmanvuotoluku n_{50} . Rakennuksen ilmanvuotoluku on keskiarvo ali- ja ylipaineella saaduista tuloksista. Puhaltimen läpi 50 Pa paine-erolla siirtynyt ilmavirta voidaan myös jakaa ulkovaipan pinta-alalla yhtälön (11) mukaisesti, jolloin toiseksi ilmanpitävyyden vertailuarvoksi

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_E}, \quad (11)$$

missä A_E on ulkovaipan pinta-ala (m^2) (SFS-EN 13829 2000, s.18). Rakennuksen ilmanvaihtokoneet kytketään mittauksen ajaksi pois päältä sekä estetään vuotoilmareittien kulkeminen ilmanvaihtojärjestelmän kautta. Vuonna 2012 voimaan astuvien uusien energiamääräysten myötä ilmanpitävyys määritetään yhtälön (11) mukaisesti sillä erotuksella, että ilmavirta lasketaan sisävaipan pinta-alaa kohden (D3 2011, s.4).

Painekoemenetelmän tarkkuus riippuu paljolti ulkoisista sääolosuhteista. Tyyneellä säällä mittausmenetelmän kokonaistarkkuus on pienempi kuin $\pm 15\%$, mutta tuulisissa mittausolosuhteissa kokonaistarkkuus voi olla jopa luokkaa $\pm 40\%$. Tarkemmat tiedot painekoemenetelmän taustalla olevasta teoriasta on saatavilla standardista SFS-EN 13829. (SFS-EN 13829 2000). Myös rakennuksen ilmatilavuuden arvioinnissa voi syntyä virhettä määritettäessä ilmanvuotolukua.

Rakennuksen ilmanpitävyys voidaan määrittää myös käyttäen hyödyksi rakennuksen omaa ilmanvaihtojärjestelmää. Tällöin puhaltimien täytyy olla taajuusmuuttajakäyttöisiä ja puhaltimien ilmavirtaa on kyettävä mittaamaan ilmanpitävyyssmittausten aikana. Käytettäessä rakennuksen omia ilmanvaihtokoneita tiiviysmittauksessa, ilmanvaihtokanavien vuodot sisältyvät mittaukseen. Tosin kanavien tiiviys pitäisi olla erikseen tarkistettu. (Paloniitty 2010)

4.3.2. Ilmanpitävyyden määrittäminen merkkiainemenetelmällä

Merkkiainemenetelmällä voidaan määrittää koko halutun huoneen tai rakennuksen kokonaisilmanvaihtuvuus, joka sisältää sekä vuotoilmanvaihdon että koneellisen ilmanvaihdon. Ilmanvaihtuvuudella tarkoitetaan kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen tai tilan ilma vaihtuu ($1/h$). Ottaen huomioon rakennuksen tai tilan vuotoilmanvaihto ja koneellinen ilmanvaihto rakennuksen tai tilan kokonaisilmanvaihtuvuus yhtälön (12) mukaisesti on

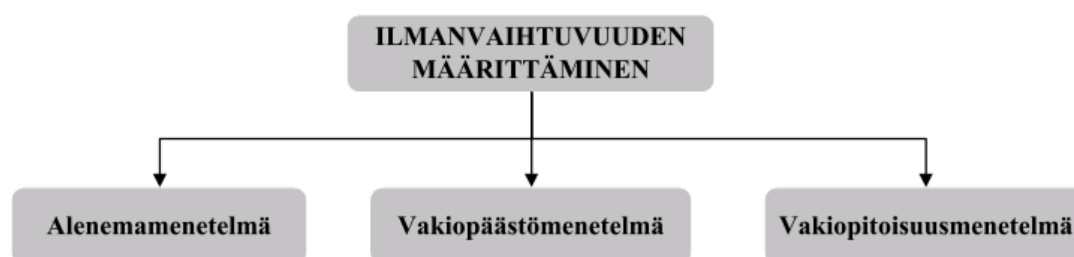
$$n = \frac{q_{v,kok}}{V} = \frac{q_{v,vuotoilma} + q_{v,tulo}}{V}, \quad (12)$$

missä $q_{v,kok}$ on rakennukseen tai tilaan tuleva kokonaisilmavirta riippuen siitä mitaanko koko rakennuksen vai yksittäisen tilan ilmanvaihtuvuutta (m^3/s), V rakennuksen tai tilan ilmatilavuus (m^3), $q_{v,vuotoilma}$ on vaipan vuotokohtien kautta sisään tuleva vuotoilmavirta (m^3/s) ja $q_{v,tulo}$ on tuloilmaventtiilien tai ulkovaipan virallisten korvausilmareittien kautta sisään tuleva ilmavirta (m^3/s) (D5 2007, s.20). Tilan eli huoneen ilmatilavuudella tarkoitetaan huoneen sisäpintojen rajoittaman tilakappaleen tilavuutta (D5 2007, s.4).

Vuotoilmanvaihto saadaan määritettyä merkkiainemenetelmällä, jos on tiedossa tuloilmaventtiilien tai ulkovaipan virallisten korvausilmareittien kautta sisään tuleva ilmavirta. Tällöin voidaan vähentää merkkiainemenetelmällä tuloksena saadusta kokonaisilmanvaihtuvuudesta mitattu ilmanvaihtojärjestelmän tuloilmavirta, jolloin saadaan laskettua vuotoilmanvaihtuvuus ja arvioida näin myös rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyttä. Vuotoilmanvaihtuvuuden perusteella voidaan määrittää yhtälöstä (4) ilman-

vuotoluku n_{50} , jolloin on mahdollista vertailla merkkiainemenetelmällä mitatun rakennuksen vaipan ilmanpitävyyttä painekoemenetelmällä mitattuun rakennukseen.

On olemassa kolme erilaista merkkiainemenetelmää. Ne ovat kuvan 4.6 mukaiset alenema-, vakiopäästö- ja vakiopitoisuusmenetelmä. Alenemamenetelmässä täytetään mittauksessa oleva huonetila merkkiaineella, jonka jälkeen pitoisuuden alenemista seurataan. Vakiopäästömenetelmässä merkkiaineen syöttö tapahtuu vakionopeudella huonetilaan ja ilmanvaihtuvuus voidaan määrittää merkkiaineen tasapainopitoisuuden perusteella. Vakiopitoisuusmenetelmässä on tavoitteena pitää huonetilan merkkiainepitoisuus vakiona. (Virta 2003, s.41). Yleisin käytössä oleva merkkiainemenetelmä on alenemamenetelmä. Merkkiaineena käytetään erilaisia kaasuja kuten hiilidioksidia (CO_2), typpioksiduulia (N_2O) ja rikkiheksafluoridia (SF_6). (Seppänen 1988, s.324). Merkkiainemenetelmänä on käytetty tässä työssä alenemamenetelmää ja merkkiaineena hiilidioksidia. Tämän johdosta käsitellään tarkemmin alenemamenetelmän taustalla olevaa teoriaa.



Kuva 4.6. Eri menetelmiä määritettäessä ilmanvaihtuvuutta merkkiainemenetelmän avulla (Virta 2003, s.41).

Alenemamenetelmässä on tarkoituksena syöttää riittävä määrä merkkiainetta eli tässä tapauksessa hiilidioksidia huonetilaan. Tuulettimilla varmistetaan hiilidioksidin tasainen sekoittuminen huonetilan joka osaan. Tuulettimia pidetään päällä, kunnes merkkiaineen riittävä sekoittuminen on tapahtunut tilassa (noin 20 min merkkiaineen syöttämisen jälkeen) (NT VVS 019 1988, s.4; NT VVS 055 1987, s.7). Riittävänä määränä merkkiainetta voidaan pitää hiilidioksidille 500–700 ppm taustapitoisuuden ylittävää pitoisuutta (Hyttinen 2011). Taustapitoisuudella tarkoitetaan huonetilan hiilidioksidipitoisuutta ennen mittauksen aloitusta. Jos mittauksen kohteessa olevassa huonetilassa ei ole ollut hiilidioksidilähdettä eli tyypillisesti ihmisistä riittävän pitkään aikaan, taustapitoisuus on lähellä tai sama kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on tyypillisesti noin 380 ppm (ei saastunut alue) (Alfano et al. 2010, s.20).

Jos ilma ja näin ollen myös merkkiaine on tasaisesti sekoittunut huonetilaan koko mittauksen ajaksi, merkkiaineen pitoisuus noudattaa seuraavaa yhtälöä (Seppänen 1988, s.324; Sherman 1990, 368–369)

$$C = (C_o - C_i)e^{-nt} + C_i, \quad (13)$$

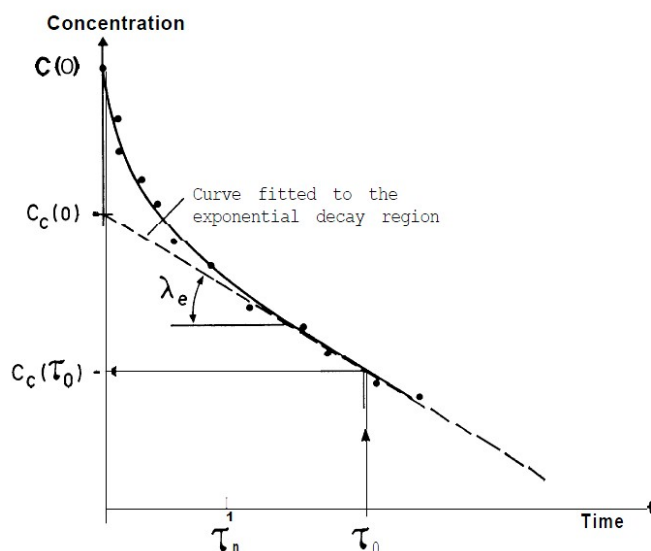
missä C_0 on merkkiainepitoisuus tilassa (ppm), kun $t = 0$ eli ajanhetkellä, jolloin merkkiaineen syöttäminen lopetetaan tilassa pitoisuuden ollessa mittauksen kannalta riittävän suuri. C_i on merkkiaineen taustapitoisuus (ppm) eli merkkiaineen pitoisuus tilassa ennen merkkiaineen syöttämistä tilaan, n on ilmanvaihtokerroin ($1/h$) ja t on aika (h). Yhtälöstä saadaan johdettua ilmanvaihtokerroin, joka on nimellisen aikavakion τ_n (h) käänteisluku

$$n = \frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0 - C_i}{C - C_i} \quad (14)$$

Yhtälöissä (13) ja (14) on oletettu, että merkkiaineen sekoittuminen on täydellistä huonetilaan. Täten niissä voidaan hyödyntää vain mittauksia sen jälkeen kuin tuuletin on kytketty pois päältä eli tuon standardeissa mainitun noin 20 minuutin päästä merkkiaineen syöttämisen loppumisen jälkeen (NT VVS 055 1987, s.7). Käytännössä täydellistä sekoittumista huonetilaan ei kuitenkaan saada aikaan. Merkkiaineen pitoisuuden muuttuminen huoneessa on eksponentiaalista kuvan 4.7 mukaisesti. Kuvaajassa on logaritminen asteikko merkkiaineen pitoisuudesta ajan suhteen. Käyrän suoralta osuudelta voidaan määrittää ilmanvaihtokerroin n , sillä se on suoran kulmakerroin. Suoran kulmakertoimesta voidaan määrittää ilmanvaihtokerroin n yhtälön (15) mukaisesti

$$n = \frac{1}{\tau_n} = \ln \frac{C_C(0) - C_i}{C_C(\tau_0) - C_i} \quad (15)$$

missä $C_C(0)$ on merkkiaineen pitoisuus (ppm) kuvan 4.7 mukaisen jatkettun suoran leikatessa ajankohdan $t = 0$ ja $C_C(\tau_0)$ on merkkiaineen pitoisuus (ppm) ajanhetkellä $t = \tau_0$. (NT VVS 019 1988, Annex 1). Tarkempia tietoja mittausmenetelmästä on saatavilla Nordtest- ohjeista NT VVS 019 ja 055 (NT VVS 019 1988; NT VVS 055 1987).



Kuva 4.7. Huonetilan merkkiainepitoisuuden käyttäytyminen alenemamenetelmässä ajan suhteen logaritmisella asteikolla. Suure λ_e on kuvassa ilmanvaihtokerroin n ja suoran osuuden kulmakerroin (NT VVS 019 1988, Annex 1).

Merkkiainemenetelmän tarkkuus riippuu mitataanko kokonaista rakennusta tai huoneistoa vai yksittäisiä huoneita. Alla olevaan taulukkoon on koottu mittausmenetelmän tarkkuuksia riippuen siitä onko mittauksen aikana käytetty merkkiainetta sekoittavia tuulettimia vai ei. On myös huomioitava, että mittausmenetelmän tarkkuuteen vaikuttaa myös käytetty merkkiaine. Jos merkkiainetta on valmiiksi mitattavassa tilassa, on mittaus pyrittävä suorittamaan silloin, kun merkkiaineen taustapitoisuus on mahdollisimman vakio. Edelliseen liittyen olisi hyvä tietää myös tilan paineisuus verrattuna tiloihin, joihin mitattava tila on yhteydessä. Otetaan esimerkkinä merkkiaine hiilidioksidi, jota on jo valmiiksi ilmassa. Mitattava tila saattaa olla alipaineinen viereiseen tilaan, jossa on hiilidioksidia tuottavia ihmisiä. Mitattavan tilan alipaineisuuden johdosta ilmapvirta siirtyy viereisestä tilasta mitattavaan tilaan. Näin ollen tilaan tulee lisää hiilidioksidia, jonka pitoisuus voi olla alkuperäistä huoneen taustapitoisuutta huomattavasti suurempi aiheuttaen virhettä mittauksiin. Paras olisi käyttää sellaista merkkiainetta, jota ei ole mitattavassa tilassa lainkaan. Jos merkkiainetta on mitattavassa tilassa ja tila on alipaineinen viereisiin tiloihin nähden, suositellaan mittaamaan silloin kuin viereisten tilojen käyttö on mahdollisimman pientä. Tällöin saadaan minimoitua siitä aiheutuva virhe.

Taulukko 4.4. Merkkiainemenetelmän tarkkuus (NT VVS 055, s.10).

Mittauskohde/-tapa	Sekoitus tuulettimilla	Ei sekoitusta
Rakennus/huoneisto	±12 %	noin ±12–24 %
Yksittäinen huone	±18 %	noin ±18–36 %

4.4. Ilmanvaihtokanavan – ja venttiilien ilmavirtojen mitaus

4.4.1. Ilmavirtausmittauksiin liittyviä mittalaitteita

Ilmavirtausmittauksilla voidaan määrittää ilmanvaihtokoneiden ja yksittäisten ilmanvaihtoventtiilien ilmavirtoja. Käytetyn mittalaitteen valinta riippuu siitä, mitä ja mistä halutaan mitata. Kuvassa 4.8 on esitettyä erilaisia ilmavirtausmittauksissa käytettyjä mittalaitteita. Ensimmäisenä on sähköinen manometri, joka on liitettävissä jokaiseen neljästä mittalaitteesta. Sähköisessä manometrissa on digitaalinäyttö, josta nähdään halutun mittaussuureen arvo. Sähköiset manometrit ovat yleensä tallentavia, joihin voidaan itse asettaa tallennusväli ja – aika. Sähköiseen manometriin asetettavista mittalaitteista pitot-putki ja kuumalanka-anemometri ovat tarkoitettu enemmänkin ilmavirtojen mittaukseen ilmanvaihtokanavasta. Siipipyöranemometrilla sekä paine-eron mittauksella mitataan taas yksittäisten ilmanvaihtoventtiilien ilmavirtoja. Yksittäisen ilmanvaihdon päätelaitteen ilmavirrat voidaan määrittää myös pelkästään paine-eron mittauksena, jos päätelaitteessa ominaiskäyrä eli painehäviön ja tilavuusvirran välinen riippuvuus tiedetään. Myöhemmin on esiteltynä esimerkkinä yksittäisen venttiilin ominaiskäyrästä.



Kuva 4.8. Ilmavirtausmittauksissa käytettäviä mittalaitteita (muokattu lähteistä Kimrok Oy 2011; Moreall Oy 2011; SFS 5512 1989, s.7).

Alla olevassa taulukossa 4.5 on vielä esitettyä ilmavirtojen mittauksiin käytettyjen kuvan 4.8 mukaisten mittauslaitteiden mittausalue, tarkkuus ja mittausresoluutio. Jokainen ilmavirtauksen mittauslaite on vielä käsitelty erikseen omissa alaotsikoissaan, missä käydään läpi tarkemmin mittalaitteen toimintaa. Myöhemmin esiteltävien yhtälöiden myötä selviää myös se kuinka ilmavirtaus määritetään mittauslaitteiden antamista tuloksista. Taulukon 4.5 mukaisista mittalaitteista kuumalanka- ja siipipyöräanemometri olisi vietävä kalibroitavaksi vuoden välein mittauslaitteen ajautuman minimoimiseksi. Samasta syystä olisi myös kalibroitava kuvan 4.8 mukainen sähköinen manometri.

Taulukko 4.5. Ilmavirtamittauksissa käytettyjen mittauslaitteiden mittausalue, tarkkuus ja mittausresoluutio. Mittauslaitteet saattavat sisältää myös lämpötilan mittausanturin, mutta sitä ei ole sisällytetty taulukkoon, ellei se ole ilmavirtamittausten kannalta oleellinen suure.

Mittauslaite	Mittausalue	Mittauslaitteen tarkkuus	Mittausresoluutio
Pitot-putki	1,27...78,7 m/s	$\pm 1,5 \%$, kun virtausnopeus 10 m/s (0,15 m/s)	0,01 m/s
Kuumalanka-anemometri	0...50 m/s; -10...+60 °C	$\pm 3 \%$ lukemasta tai $\pm 0,015$ m/s (valitaan suurempi); $\pm 0,3$ °C	0,01 m/s; 0,1 °C
Siipipyöräanemometri	0,25...30 m/s	$\pm 1 \%$ lukemasta tai $\pm 0,02$ m/s (valitaan suurempi)	0,01 m/s
Mittaussondi- ja letkut	-3735...+3735 Pa	$\pm 1 \%$ lukemasta tai ± 1 Pa (valitaan suurempi)	0,1 Pa

Pitot-putki

Pitot-putki, viralliselta nimeltään pitot-staattinen putki, on paine-eron mittaukseen perustuva perusinstrumentti, joka on tarkoitettu pelkästään ilmavirtausten mittaukseen ilmanvaihtokanavissa. Sen toiminta perustuu kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksen mittaamiseen. Staattinen paine tarkoittaa sitä painetta mikä on paikallaan olevassa nesteessä tai kaasussa. Mitattu kokonaispaine kulkeutuu pitot-putken vaipan sisällä olevan ohuemman putken kautta manometrin toiseen mittausletkuun (kuva 4.8, valkoinen mittausletku) ja staattinen paine pitot-putken vaippaan liitetyn yhteen kautta toiseen

mittausletkuun (kuva 4.8, musta mittausletku). Täten manometrin näytöltä nähdään suoraan haluttu yhtälön (16) kokonaispaineen ja staattisen paineen paine-ero Δp , joka on dynaaminen paine. Tästä voidaan johtaa yhteys virtausnopeudelle sekä virtausnopeuden kautta ilman tilavuusvirralle yhtälön (17) mukaisesti riippuen onko ilmanvaihtokanava pyöreä (yhtälö (18)) vai suorakaide (yhtälö (19)). (Sirén 1995, s.175).

$$\Delta p = p_d = p_t - p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (16)$$

missä p_d on dynaaminen paine (Pa), p_t kokonaispaine eli staattisen ja dynaamisen paineen summa (Pa), p_s staattinen paine (Pa), ρ_i ilman tiheys ilmanvaihtokanavassa (kg/m^3) ja v_i on ilman virtausnopeus (m/s) (Sirén 1995, s.176). Yhtälöstä (16) nähdään, että staattinen paine on sama kuin kokonaispaine virtausnopeuden ollessa nolla. Dynaaminen paine aiheutuu ilman virtauksesta ja on yllä olevan yhtälön mukaisesti verrannollinen tiheyden ja virtausnopeuden toisen potenssin tuloon.

Tilavuusvirta on

$$q = v A_{ivk}, \quad (17)$$

missä A_{ivk} on ilmanvaihtokanavan poikkipinta-ala (m^2)

$$A_{ivk} = \pi r^2 = \frac{\pi D^2}{4} \text{ (pyöreä)}, \quad (18)$$

missä D on pyöreän ilmanvaihtokanavan halkaisija (m)

$$A_{ivk} = ab \text{ (suorakaide)}, \quad (19)$$

missä a_L ja b_L ovat suorakaiteen muotoisen ilmanvaihtokanavan leveys ja korkeus (m) (Sirén 1995, s.215).

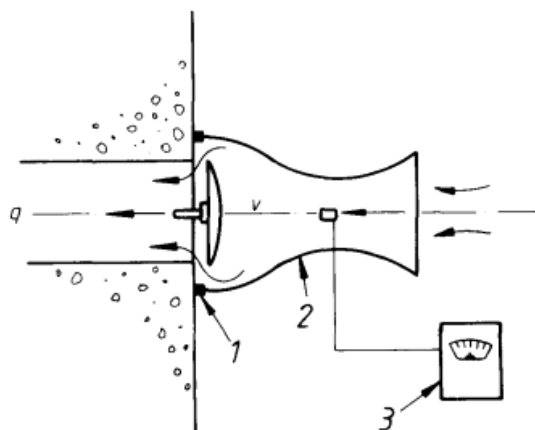
Pitot-putken parhaita ominaisuuksia ovat luotettavuus ja metrologisten ominaisuuksien stabiilius rakenteen ollessa yksinkertainen. Mittauksissa on huomioitava, että pitot-putkea pidetään kohtisuoraan ilmavirtausta vastaan, sillä muuten mittaukseen aiheutuu virhettä. Mittauksen rajoituksena on, että pitot-putkella ei voida mitata pieniä virtausnopeuksia (katso taulukko 4.5). Lisäksi tarkkuusmittauksissa on tehtävä erilaisia korjauksia yhtälöön (16). (Sirén 1995, s.179). Pitot-putkea ei ole käytetty tämän työn mittauksissa, mutta se on mainittu, koska se on ollut perusinstrumentti ilmastointiteknikan mittauksissa.

Kuumalanka-anemometri (+anemometritorvi)

Kuumalanka-anemometri on virtauksen aiheuttamaan anturin jäähtymiseen perustuva mittalaite. Sen toiminta perustuu siihen, että kuumalanka-anturin tyypillisesti noin millimetrin pituisiin ja hyvin ohuihin volframilankoihin johdetaan sähkövirtaa, jolloin se saavuttaa käyttötilassa lämpötilan 150 °C...300 °C. Lämpö siirtyy kuumalanka-anturista ympäristöön lämpösäteilyn ja konvektion avulla. Konvektio on kaasun tai nesteen liikkeen johdosta tapahtuva lämmön- tai aineensiirto (Mills 1999, s.17). Säteilylämmönsiirto on kuumalanka-anemometrissa suhteellisen pientä verrattuna konvektiiviseen lämmönsiirtoon. Konvektiivinen lämmönsiirto on riippuvainen väliaineen virtausnopeudesta, jolloin anturia voidaan näin ollen käyttää virtausnopeuden mittaamiseen. (Sirén 1995, s.186)

Kuumalanka-anemometri on mittausdynamiikaltaan erittäin nopea ja tarkkuudeltaan hyvä ilmavirtauksen nopeuden mittaukseen tarkoitettu laite. Sen avulla voidaan mitata ilmavirran nopeuksia kanavista tai säleikkötyyppisistä ilmanvaihtoventtiileistä erilaisilla menetelmillä ja laskea eri pisteissä määritettyjen ilmankäytösten perusteella ilmavirran keskinopeus. Keskinopeuden perusteella voidaan määrittää ilman tilavuusvirta kanavassa yhtälöiden (17) - (19) mukaisesti riippuen siitä onko kanava pyöreä vai suorakaide. Säleikkötyyppisissä ilmanvaihtoventtiileissä on huomioitava vain säleikön aukkojen pinta-ala.

Kuumalanka-anemometrin lisäksi voidaan käyttää kuvan 4.9 mukaista anemometritorvea, jolloin saadaan mitattua yhden pisteen avulla venttiilin ilmavirta. Kuumalanka-anemometri asetetaan anemometritorveen kahvan kohdalla olevan reiän kautta siten, että kuumalanka-anturi tulee keskelle torven poikkipinta-ala. Kuumalanka-anemometrille tarkoitettulla anemometritorvella on jokin tietty laitevakio, jonka perusteella voidaan määrittää venttiilille menevä ilmavirta.



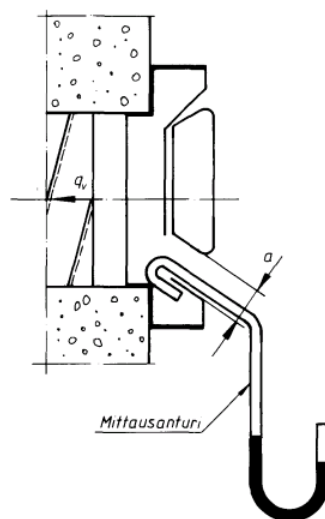
Kuva 4.9. Kuumalanka-anemometrimittauksiin tarkoitettu anemometritorvi, missä 1 = tiiviste, 2 = anemometritorvi ja 3 = nopeusmittari (SFS 5512 1989, s.7).

Siipipyöräänemometri (+anemometrivorvi)

Siipipyöräänemometri on ilmastointiteknikan mittauksissa yleisesti käytössä oleva mekaaninen mittalaite. Mittalaitteessa on herkästi laakeroitu siipipyörä, joka pyörii ilmavirran vaikutuksesta mitaten keskimääräistä virtausnopeutta siipipyörän alalta. Siipipyörän pyörimisnopeuden avulla saadaan ilman virtausnopeus. Siipipyöräänemometri on hyvä mittalaite mitattaessa varsinkin säleikkötyyppisten ilmanvaihtoventtiilien ilmavirtoja. Usein säleikkötyyppisen ilmanvaihtoventtiilin pinta-ala on suurempi kuin siipipyörän ala, jolloin ilmavirran nopeus mitataan useasta pisteestä ja niistä lasketaan keskinopeus. Saadun keskinopeuden perusteella määritetään ilman tilavuusvirrat taas yhtälön (17) mukaisesti huomioiden säleikön aukkojen pinta-ala. Siipipyöräänemometrissa voidaan myös käyttää anemometrivorvea, jolloin kaikki virtaus saadaan kulkemaan siipipyöräänemometrin kautta määritettäessä kokonaisten venttiilien ilmavirtoja. (Sirén 1995, s.181)

Mittaussondi ja – letkut

Mittaussondi ja – letkut yhdessä sähköisen manometrin kanssa ovat paine-eron mittaukseen perustuva ilmavirtauksen mittausmenetelmä. Mittaussondin tapauksessa toinen mittausletku on ympäristön paineessa ja toinen ilmanvaihtoventtiilissä kuvan 4.10 mukaisesti. Ilmanvaihtoventtiilissä olevan mittausletkun päässä on niin sanottu mittaussondi, joka on metallista tehty lisäkappale mahdollistamaan paine-eron mittauksen ilmanvaihtoventtiilien takaa. Manometri laskee paine-eron mittausletkujen välillä. Jos päätelaitteessa on itsessään mittausletkut, mittaussondia ei tarvita. Tällöin asetetaan manometrin molemmat letkut päätelaitteen mittausletkuihin ja manometrin näytöltä nähdään suoraan paine-ero Δp (Pa).



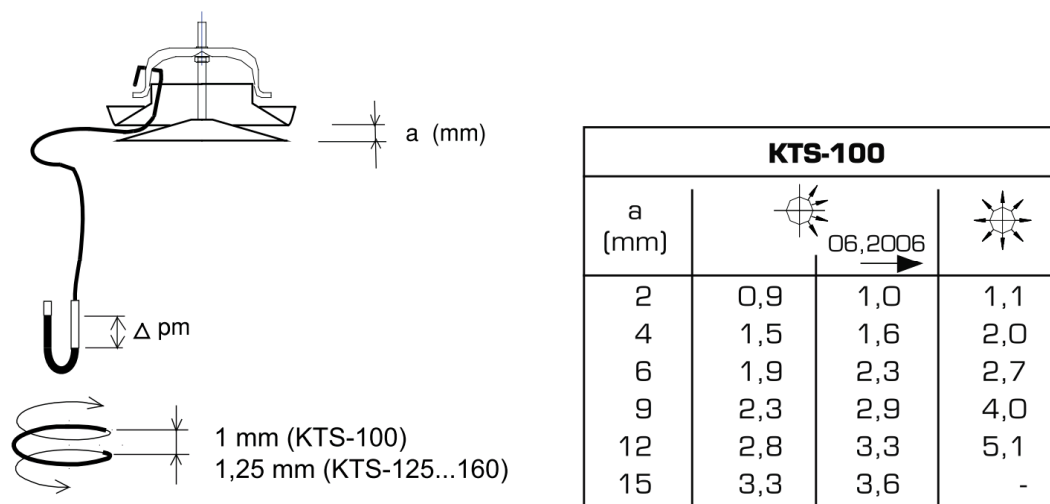
Kuva 4.10. Mittausanturi/-sondi (SFS 5512 1989, s.7).

Paine-eron perusteella voidaan määrittää yksittäisen venttiilin kautta menevä ilman tilavuusvirta q (l/s) seuraavan yhtälön (20) mukaisesti.

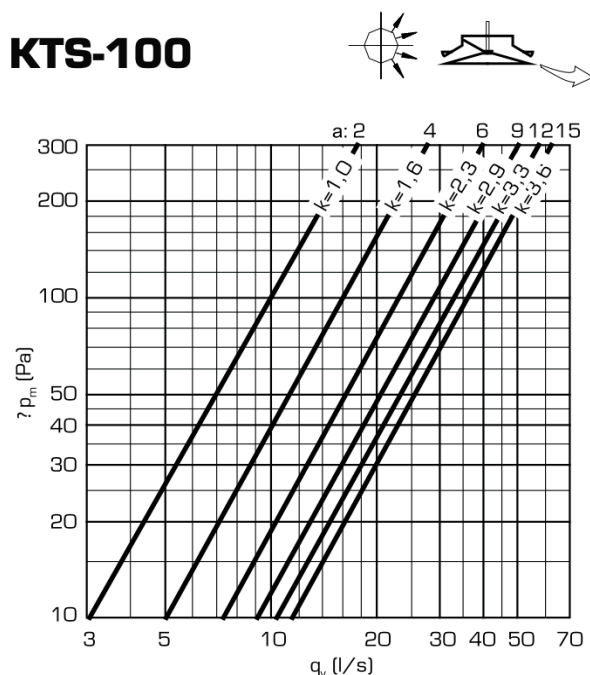
$$q = k\sqrt{\Delta p} \quad (20)$$

missä k on päätelaittekohtainen säätöarvo, joka riippuu päätelaitteen aukeamasta a (mm).

Päätelaitteiden valmistajien kotisivuilta on saatavissa heidän päätelaitteidensa mittaus- ja säätöoppaita. Niissä on myös opastavia kuvia, mistä aukeama a mitataan kunkin päätelaitteen osalta. Kuvissa 4.11 ja 4.12 on esimerkkikuva säätöoppaasta. Kuvissa on esitetty mittaus- ja säätöohjeita tyypilliseen FläktWoods:in KTS-tuloilmaventtiiliin liittyen. Kuvasta 4.11 käy ilmi, mistä paine-ero Δp ja avautuma a mitataan kyseisen venttiilityypin osalta. Mitatun avautuman perusteella voidaan katsoa säätöarvo k taulukosta tai käyttää samassa säätöoppaassa olevaa säätökäyrää, joka on esitetty kuvassa 4.12. Säätökäyrän avulla voidaan katsoa suoraan venttiilin läpi menevä ilmavirta q , kun paine-ero Δp ja avautuma a ovat tiedossa. Aukeaman mittaamiseen on tarjolla erityisiä mittatulkkeja. Mittaussondilla ja -letkuilla mitattaessa on aina tiedettävä päätelaitteen valmistaja ja sen kautta päätelaitteen tyyppi, jotta ilmavirta saadaan selville paine-eron Δp ja aukeaman a perusteella joko laskemalla yhtälöllä (20) tai katsomalla kuvan 4.12 mukaisesta säätökäyrästä. (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010).



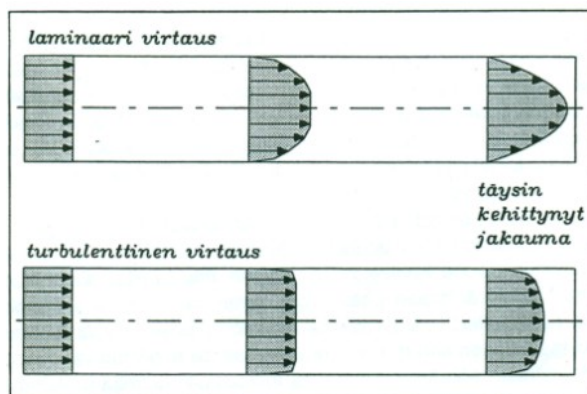
Kuva 4.11. Esimerkki säätöoppaasta: KTS-tuloilmaventtiilin (KTS-100) mittausta havainnollistava kuva ja eri venttiilin avautumia (a) vastaavat säätöarvot k (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010).



Kuva 4.12. Esimerkki säätöoppaasta: KTS-tuloilmaventtiilin (KTS-100) säätökäyrä, josta voidaan suoraan katsoa venttiilin kautta menevä ilmavirta, kun mitattu paine-ero Δp (Pa) ja avautuma a (mm) ovat selvillä (Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas 2010).

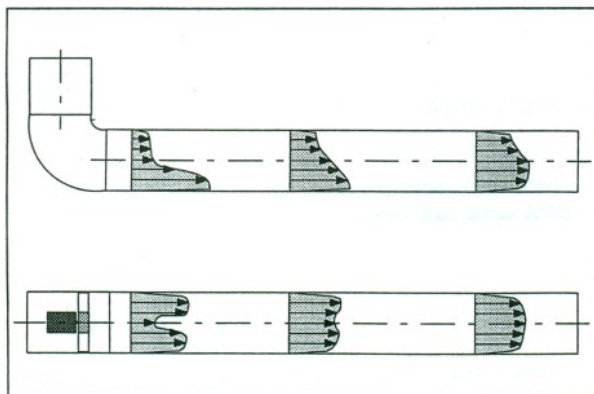
4.4.2. Putkivirtauksen ominaisuuksien asettamat rajoitukset

Mitattaessa ilman virtausnopeuksia ilmanvaihtokanavista on huomioitava putkivirtaukseen liittyviä asioita, jotka asettavat mittaukselle tiettyjä rajoitteita. Putkivirtauksen nopeusjakauma ei ole koskaan täysin tasainen, vaan virtausnopeuden arvo vaihtelee tietystä ilmanvaihtokanavan poikkipinnassa. Ilmanvaihtokanavan seinämässä nopeus on aina nolla ja seinämän läheisyydessä olevassa rajakerroksessa nopeus voi taas muuttua nopeasti mentäessä kohti kanavan poikkipinnan keskiosaa. Jos ilmavirtauksen annettaisiin kulkea ilmanvaihtokanavassa riittävän pitkän matkan, saavuttaisiin nopeusjakauma täysin kehittyneen muodon kuvan 4.13 mukaisesti riippuen onko virtaus laminaaria vai turbulanttista eli pyörteistä. Virtauksen laminaarisuutta tai turbulanttisuutta voidaan arvioida Reynolds'in luvun (Re) avulla, joka riippuu virtauksen nopeudesta, kanavan poikkipinta-alasta ja virtaavan väliaineen kinemaattisesta viskositeetista. Niiden raja on usein häilyvä, mutta virtaus on turbulanttista viimeistään, kun $Re \geq 4000$. Ilmanvaihtokanavassa virtaus on yleensä aina turbulanttista (Sirén 1995, s.212–213).



Kuva 4.13. Putkivirtauksen kehittymisen periaatekuva (Sirén 1995, s.212).

Täysin kehittyntä nopeusjakaumaa esiintyy hyvin harvoin ilmanvaihtokanavien tapauksessa, koska ilmanvaihtokanavissa on paljon nopeusjakaumaan vaikuttavia häiriölähteitä, kuten venttiileitä, puhaltimia, mutkia, T-haaroja, laajennuksia ja supistuksia. Kuvassa 4.14 on esitetty ilmanvaihtokanavan mutkan aiheuttama häiriö nopeusjakaumaan. Erittäin voimakkaiden häiriölähteiden tapauksessa virtaus saattaa pyöriä voimakkaasti ja mennä jopa väärään suuntaan. Tällaisesta kohdasta mittaaminen ei anna varmasti hyvää mittaustulosta. Mitattaessa ilmavirtoja ilmanvaihtokanavista on siis huomioitava riittävät suojaetäisyydet häiriölähteen jälkeen ja ennen häiriölähdettä. (Sirén 1995, s.214)



Kuva 4.14. Ilmanvaihtokanavan mutkan aiheuttama häiriö nopeusjakaumaan (Sirén 1995, s.213).

Häiriölähteestä riippuen suojaetäisyydet vaihtelevat. Suojaetäisyyksiä arvioidaan niin sanottujen suojaetäisyyskertoimien avulla. Suojaetäisyys pyöreälle kanavalle on yhtälön (21) mukainen ja suorakaidekanavalle yhtälön (22) mukainen

$$L = N_1 D, \quad (21)$$

missä L on mittauspisteen etäisyys häiriölähteestä (m), N_1 suojaetäisyyskerroin virtausuunnassa ennen mittauskohdasta ja N_2 suojaetäisyyskerroin virtausuunnassa mittauskohdan jälkeen.

$$L = N_i \frac{a+b}{2} \quad (22)$$

Käytetystä mittausmenetelmästä riippuen menetelmävirheet vaihtelevat suojaetäisyyskertoimen mukaan, mutta suositeltava suojaetäisyyskerroin häiriölähteen jälkeen on $N > 6$ ja ehdollinen alue välillä $N = 2,5 - 6$. Kaikkia mittausmenetelmiä ei voida siis käyttää jos $N < 6$. Häiriölähdettä ennen suojaetäisyys voi olla pienempi, $N \geq 2$. Lisätietoja suojaetäisyyksistä on saatavilla standardista SFS 5512 (SFS 5512 1989, s.4).

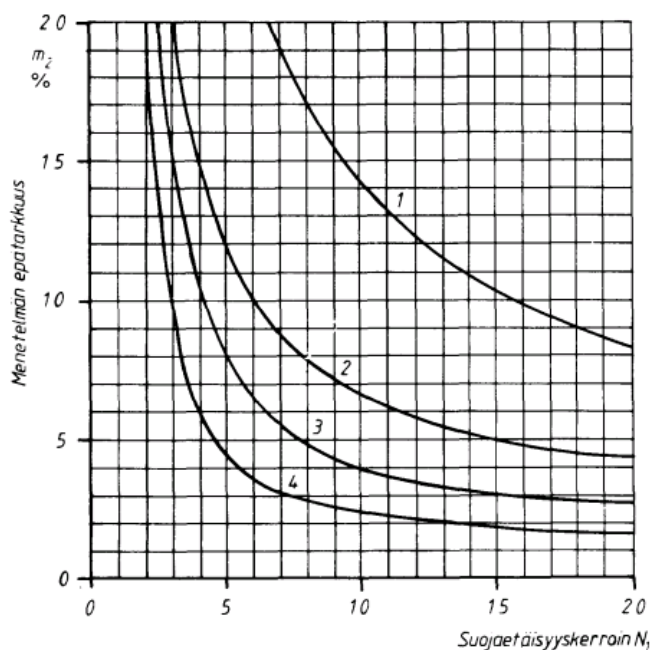
4.4.3. Ilmavirtojen mittaus ilmanvaihtokanavasta

Mitattaessa ilmanvaihtokoneiden ilmavirtoja paras tapa olisi mitata ilmanvaihtokoneen ilmavirta ilmanvaihtokanavasta. Rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä olisi varustettava kiinteillä ilmavirran mittausantureilla ja – laitteilla rakennuksen ulko- ja jäteilmavirran mittaamista varten. Poikkeuksena on tilanne, jossa ilmavirta on alle $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, jolloin kiinteät mittalaitteet voidaan korvata siirrettävillä ja laitteistoon sopivilla mittausyhteillä. (D2 2008, s.9). Näin ei kuitenkaan usein ole vanhoissa rakennuksissa, jolloin kyseistä määräystä ei ole vielä ollut. Ilmavirrat voidaan tällöin mitata ilmanvaihtokanavaan tehdyn reiän kautta erilaisilla mittausmenetelmillä.

Mitattaessa ilmanvaihtokanavien ilmavirtoja ilmavirtojen mittausmenetelmät ovat yleensä viiden pisteen menetelmiä, log-linear-menetelmä, suorakaidemenetelmä ja log-Tschebyschew-menetelmä (SFS 5512 1989, s.4). Mittaustapaa valittaessa määräävinä tekijöinä ovat mittauksen tarkkuusvaatimus ja suojaetäisyys sekä kanavan koko ja muoto. Keskipistemenetelmää lukuun ottamatta kaikissa mittausmenetelmissä mitataan useammasta pisteestä dynaaminen paine tai virtausnopeus mittalaitteesta riippuen. (SFS 5512 1989, s.4). Kuvassa 4.15 on esitettyä erilaisten ilmanvaihtokanavien ilmavirtojen mittausmenetelmien menetelmävirheitä riippuen suojaetäisyyskertoimesta N_1 .

Kuvasta 4.15 nähdään, että mitä enemmän on mittauspisteitä kanavan poikkipinnassa, sitä pienempi on menetelmävirhe. Log-linear-menetelmä on täten kaikkein tarkin. Log-linear-menetelmässä ilmanvaihtokanavan ilmavirta määritetään pitot-putken avulla mitaten useammasta mittauspisteestä, joiden paikat riippuvat mittauspisteiden lukumäärästä (Sirén 1995, s.239). Keskipistemenetelmä on kuvan 4.15 mukaan epätarkin. Siinä määritetään ilmavirta vain ilmanvaihtokanavan keskipisteestä. Tässä diplomityössä on käytetty pelkästään viiden pisteen menetelmää. Kyseinen mittausmenetelmä on valittu sen yksinkertaisuuden ja nopeuden johdosta, sillä mitattavia ilmanvaihtokanavia on ollut useampi. Ilmavirrat mitataan kyseisessä mittausmenetelmässä kanavan poikkipinnan viidestä eri pisteestä kuvan 4.16 mukaisesti käyttäen joko pitot-putkea tai kuumalanka-anemometria. Näiden viiden pisteen tuloksista otetaan keskiarvo sekä määritetään ilman tilavuusvirta kanavassa yhtälön (17) mukaisesti.

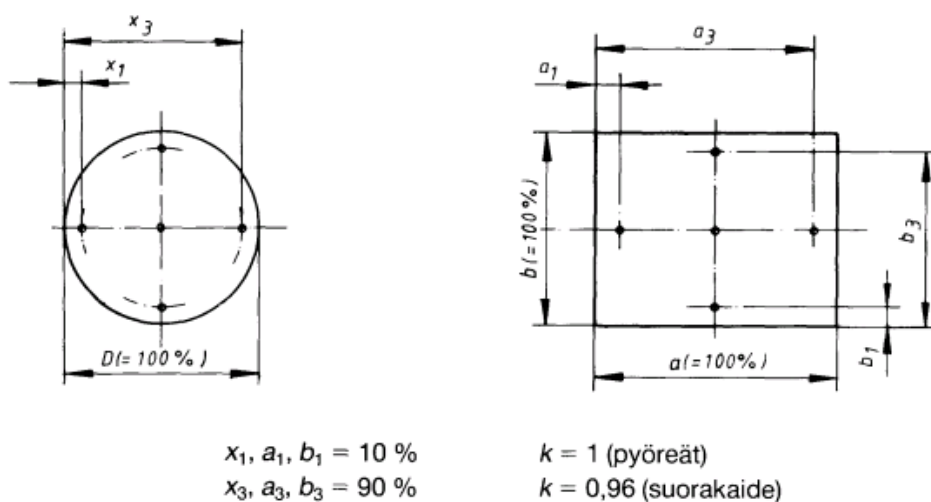
Epätarkkuuden arviointikäyrästä



- 1 = keskipistemenetelmä
- 2 = viiden pisteen menetelmä
suorakaidemenetelmä, kun $n = 4$
- 3 = log-linear-menetelmä, 12 pisteen
suorakaidemenetelmä, kun $n = 6 \dots 10$
- 4 = log-linear-menetelmä, 24 pisteen
suorakaidemenetelmä, kun $n \geq 12$

Kaikissa tapauksissa on vaatimuksena $N_2 \geq 2,0$

Kuva 4.15. Erilaisten ilmanvaihtokanavien ilmavirtojen mittausmenetelmien menetelmävirheitä riippuen suojaetäisyyskertoimesta N_1 (SFS 5512 1989, s.6).



Kuva 4.16. Viiden pisteen menetelmä pyöreälle ja suorakaiteiselle ilmanvaihtokanavalle. Mittausmenetelmän ehtona on, että $D = 150 \dots 400$ mm sekä $a, b = 150 \dots 500$ mm ja $a/b < 2$. (SFS 5512 1989, s.5).

4.4.4. Ilmavirtojen mittaus tulo- ja poistoilmalaitteelta

Tulo- ja poistoilmaventtiilien mittausmenetelmät eroavat joiltakin osin toisistaan. Mitattaessa ilmavirtoja tuloilmalaitteelta, käytettävä mittausmenetelmä riippuu tuloilmalaitteen tyypistä. Kuvassa 4.17 on esitettyä erityyppisiä tuloilmalaitteita. Jos kyseessä on tuloilmalaite 1, voidaan mittaus suorittaa paineenmittaussondin avulla. Tuloilmalaitteen 2 tapauksessa tuloilmalaitteessa itsessään on usein paine-eroyhteet, joista voidaan suoraan mitata paine-ero. Paine-eron Δp ja avautuman a perusteella voidaan määrittää tuloilmalaitteen ilmavirta sillä edellytyksellä, että tiedetään tuloilmalaitteen laitevakio k . Laitevakion k määrittämiseksi on tiedettävä tuloilmalaitteen tyyppi ja valmistaja, jotta voidaan katsoa laitevakion arvo valmistajan säätöoppaasta. Tuloilmalaitteen 3 osalta tuloilmavirta voidaan määrittää myös paine-eroyhteiden avulla, mutta myös käyttämällä siipipyöranemometriä. Käytettäessä siipipyöranemometriä mitataan ilmannopeuksia useammasta kohtaa säleiköltä ja mittauspisteiden arvoista määritetään keskiarvo. Saadun keskiarvon avulla saadaan laskettua säleikön ilmavirta.



Kuva 4.17. Tuloilmalaitteet 1, 2 ja 3 (muokattu lähteestä FläktWoods 2011).

Mitattaessa ilmavirtoja poistoilmalaitteelta käytetty mittausmenetelmä riippuu poistoilmalaitteen tyypistä. Kuvassa 4.18 on esitettyä erityyppisiä poistoilmalaitteita. Jos kyseessä on poistoilmalaite 1, voidaan mittaus suorittaa paineenmittaussondin tai anemometritorvien avulla käyttäen kuumalanka- tai siipipyöranemometriä. Edellytyksenä anemometritorven käyttämiseen on, että torvi on riittävän suuri mitattavalle venttiilille. Poistoilmalaitteen 2 tapauksessa poistoilmalaitteessa itsessään on usein paine-eroyhteet, joista voidaan suoraan mitata paine-ero. Ilmavirran määrittäminen tapahtuu samoin kuin tuloilmalaitteenkin tapauksessa. Kyseisen poistoilmalaitteen ilmavirta voidaan määrittää myös siipipyöranemometrin avulla käyttäen apuna joko koko säleikön pinta-alan kattavaa anemometritorvea tai mitaten ilmavirtojen nopeuksia useammasta kohdasta pelkällä siipipyöranemometrillä.

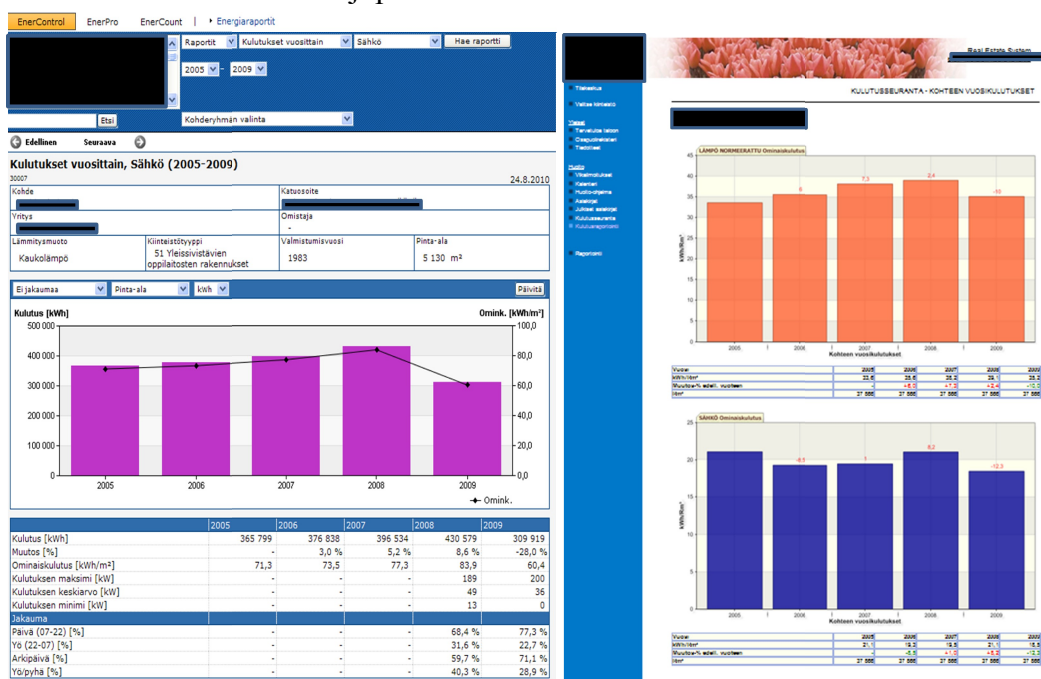


Kuva 4.18. Poistoilmalaitteet 1 ja 2 (muokattu lähteestä FläktWoods 2011).

Mitattaessa yksittäisten tulo- ja poistoilmaventtiilien ilmavirtoja, paineyhteiden avulla saadaan ehdottomasti tarkin mittaustulos. Tällöin on tietenkin tiedettävä venttiilin tyyppi, jotta voidaan hakea mitatun paine-eron ja avautuman perusteella oikea säätöarvo laitteelle ilmavirran määrittämiseksi. Mitattaessa yksittäisen säleikkötyyppisen laitteen ilmavirtaa käyttäen siipipyöräänemometriä, virhe saattaa olla huomattavasti suurempi. Siipipyöräänemotrimittauksen epätarkkuus on hyvin tapauskohtainen, mutta suotuisissa olosuhteissa mittausmenetelmän tarkkuudeksi voidaan saada $\pm 10\%$ (Sirén 1995, s.262).

4.5. Energiankulutusmittaukset

Energiankulutusmittauksilla tarkoitetaan rakennusten lämmön, sähkön ja veden kulutuksen mittauksia. Näitä kulutuksia ei ole varsinaisesti mitattu tässä tutkimuksessa, vaan tiedot kohteiden kulutuksista on saatu web-pohjaisten järjestelmien kautta, joita kohteiden kiinteistöhoitajat ovat ylläpitäneet tai tieto on tullut automaattisesti järjestelmään. Kuva 4.18 on esittää web-pohjaisista energiankulutuksen raportointityökaluja, joita on ollut käytössä tutkituissa kouluissa. Energiankulutustiedot saadaan järjestelmistä absoluuttisena tai ominaiskulutuksena. Lämpöenergian kulutukset saa järjestelmistä valmiiksi normitettunakin, mutta lämpimän käyttöveden osuudet vaihtelevat ohjelmasta riippuen. EnerKey:ssa (EnerKey 2011) käytetään lämpimään käyttöveteen menevänä osuutena vakioprosenttia 20 % ja Haahtelassa (Haahtela 2011) osuutta 35 % riippumatta todellisesta lämpimän käyttöveden lämmitykseen kuluvasta energiasta. Valmiiksi normitettuja lämmönkulutuksia ei ole siis käytetty johtuen erilaisista normitustavoista. Järjestelmistä on käytetty hyväksi pääasiassa kuukausi- ja vuositason energiankulutuksia. Tarkimmillaan on ollut saatavilla jopa tuntitason tietoa.



Kuva 4.19. Energiankulutusmittausten web-pohjaisia raportointityökaluja; EnerKey vasemmalla ja Haahtela RES oikealla (EnerKey 2011; Haahtela 2011).

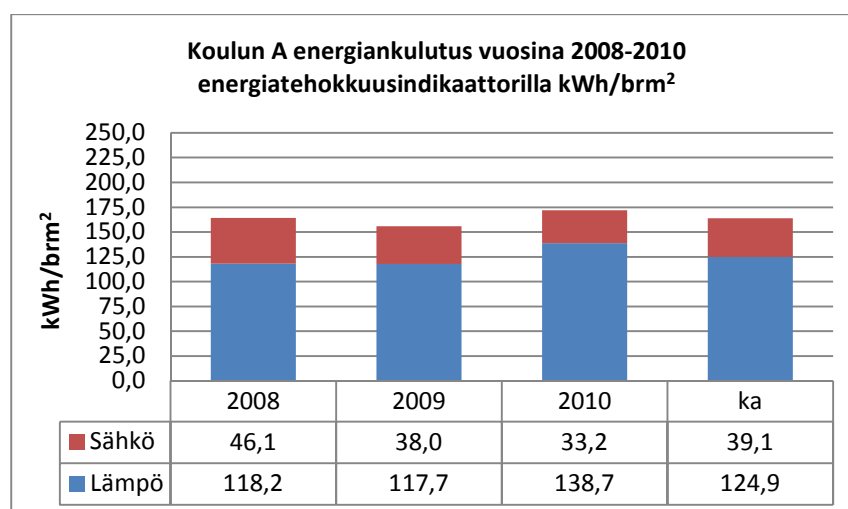
5. ESIMERKKIKOULUT

5.1. Koulujen valinta

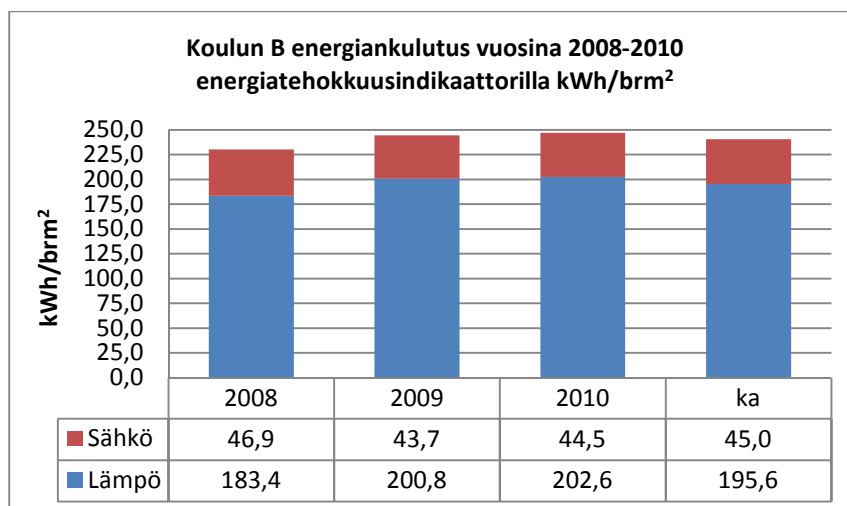
Työssä valittiin yksityiskohtaiseen mittaukseen kaksi koulurakennusta, jotka ovat eniten lämpöä kuluttava rakennusryhmä kuntien rakennuskannasta. Valittaessa mittauskohteita on painotettu erityisesti lämmönkulutusta, koska siinä esiintyi projektin esiselvityksen perusteella suurin hajonta (Kalema & Sahakari 2008).

Mittaukseen on pyritty valitsemaan sekä lämmönkulutukseltaan vähän kuluttava, että paljon kuluttava koulurakennus. Kohteet on valittu mittaukseen kolmen projektissa mukana olleen Pirkanmaan kunnan koulurakennusten kulutuslukemien perusteella. Lämmönkulutustietokannasta on pyritty valitsemaan ominaislämmönkulutukseltaan (kWh/brm^2 , kWh/m^3) eniten ja vähinten kuluttava muodoltaan suhteellisen yksinkertainen koulurakennus viime vuosien lämmönkulutuslukemien perusteella. Yksinkertainen muoto on ollut lisäedellytyksenä valinnassa, jotta kohde olisi helposti mallinnettavissa erilaisilla laskenta- ja simulointimalleilla. Valinnassa pyrittiin myös valitsemaan sellaiset koulut, joiden kulutuslukemat olisivat mahdollisimman luotettavia, sillä tietokannoissa esiintyi myös virheellisiä kulutuslukemia.

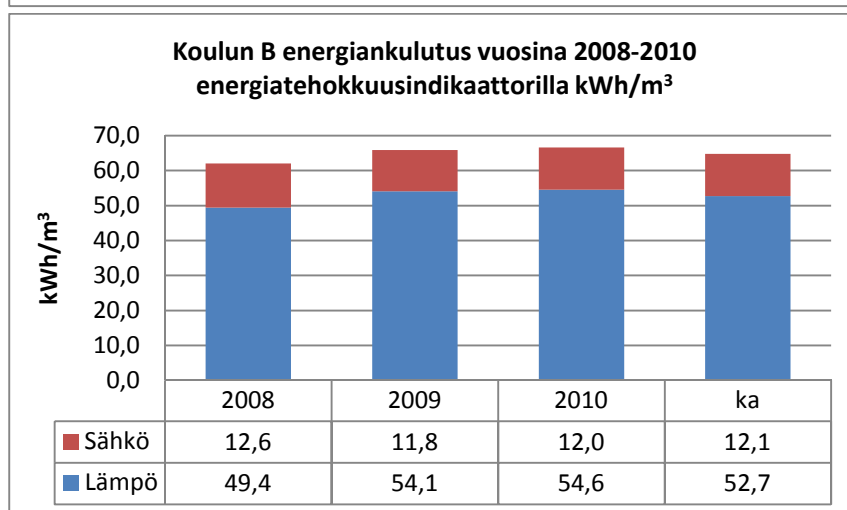
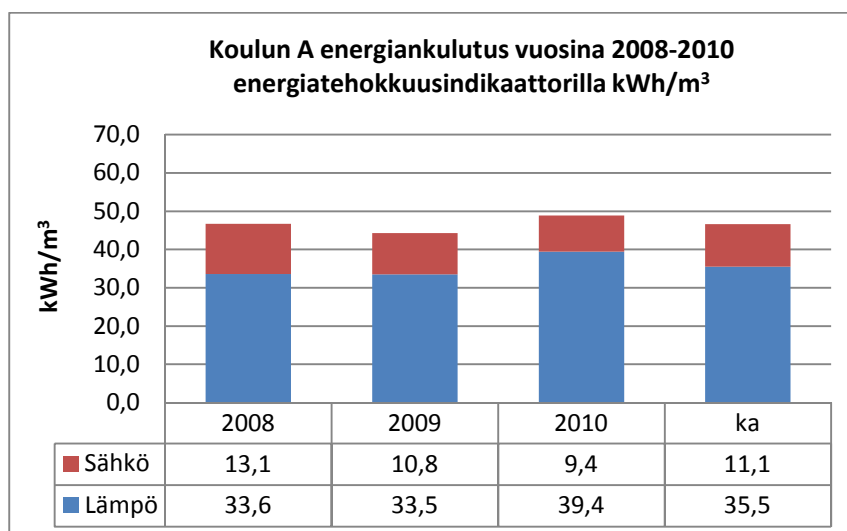
Kuviin 5.1–5.3 on koottu koulujen, koulun A ja B, kulutuslukemia energiatehokkuusindikaattoreilla kWh/brm^2 ja kWh/m^3 vuosilta 2008–2010. Mittauskohteiden valinta ja mittalaitteiden asennus tehtiin vuoden 2010 loppupuolella, joten vuotta 2010 ei ole huomioitu mittauskohteiden valinnassa. Koulu A on valittu tutkimukseen sillä perusteella, että se on vähän lämpöä kuluttava koulurakennus. Koulu B on vastaavasti paljon lämpöä kuluttava koulurakennus. Molemmat koulut sijaitsevat Pirkanmaalla, mutta eri kunnissa. Koulut sijaitsevat toisiinsa nähden myös samalla leveysasteella pohjois-eteläsuunnassa. Koulun B sijainti on 20–30 km pohjoisempana kuin koulun A.



Kuva 5.1. Koulun A energiankulutus vuosina 2008–2010 energiatehokkuusindikaattorilla kWh/brm^2 .



Kuva 5.2. Koulun B energiankulutus vuosina 2008–2010 energiatehokkuusindikaattorilla kWh/brm².



Kuva 5.3. Koulujen A ja B energiankulutus vuosina 2008–2010 energiatehokkuusindikaattorilla kWh/m³.

Kouluissa A ja B on tarkoitus selvittää kohteiden energiatehokkuuden sekä energiankulutuksen laskentamallin kehityksen kannalta oleellisia mittauksia. On mitattu sisäilman lämpötiloja, hiilidioksidipitoisuuksia ja tilojen ilmanvaihtomääriä. Lisäksi kohteissa on tehty lämpökamerakuvauksia lämpövuotojen havainnollistamiseksi sekä määritetty vaipan ilmanpitävyyttä painekoemenetelmän avulla.

5.2. Pienen lämmönkulutuksen omaava koulu A

Koulu A on eräässä Pirkanmaan kunnassa sijaitseva pieni noin 50 oppilaan alakoulu. Se on rakennettu vuonna 1952. Koulun bruttoala on 1072 brm² ja rakennustilavuus 3769 m³. Koulu on kuvan 5.4 mukaisesti muodoltaan yksinkertainen kolmekerroksinen rakennus, joka sisältää lisäksi kylmän ullakotilan. Alapohja on toteutettu maanvaraisella betonilaatalla, seinät on toteutettu maanvastaisen seinän osalta kaksinkertaisella tiilimuurauksella ja muilta osin kolminkertaisella tiilimuurauksella, yläpohja rajoittuu pääosin kylmään ullakotilaan, joka sijaitsee harjaosassa. Kohteessa on kaksilasiset ikkunat. Minkäänlaista rakenteellista peruskorjausta kohteeseen ei ole tiettävästi tehty.

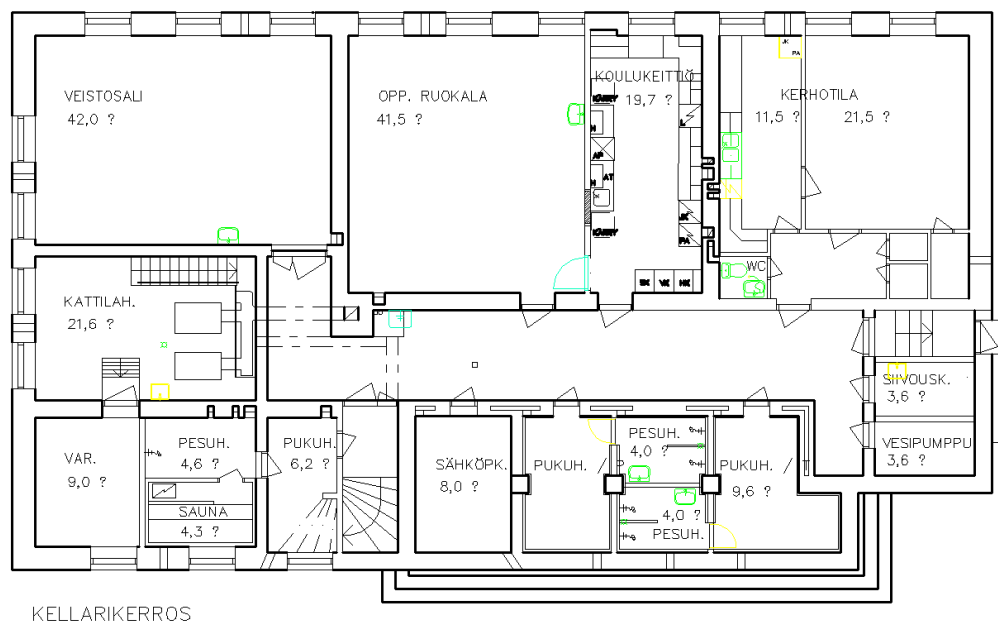
Koulussa on vanha öljylämmitysjärjestelmä. Lämmönjako tapahtuu vesikiertoisien patterilämmityksen kautta. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä varustettuna lämmön talteenotolla on rakennettu kouluun viimeisen 10 vuoden aikana. Lämmön talteenoton hyötysuhde vaihtelee ilmanvaihtokoneesta riippuen välillä 50–70 %. Kohteessa on kuusi lämmön talteenotolla varustettua ilmanvaihtokonetta ja kolme erillistä huippuimuria. Lisäksi kellarikerroksessa on yksittäisiä ulkoilmaventtiilejä. Ilmanvaihtoa tapahtuu jonkin verran myös vanhasta painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän hormeista.



Kuva 5.4. Koulun A länsijulkisivu.

Kuvassa 5.5 on vielä esitettynä koulun A kellarikerroksen pohjapiirustus, mistä nähdään koulun yksinkertainen muoto. Liitteessä 2 on esitettynä koulun A kaikkien ker-

rosten numeroidut pohjapiirustukset. Tilojen numerointia käytetään hyväksi tulosten käsittelyn yhteydessä. Ullakkokerroksen osalta ei ollut saatavissa pohjapiirustusta.



Kuva 5.5. Koulun A kellarikerroksen pohjapiirustus.

5.3. Suuren lämmönkulutuksen omaava koulu B

Koulu B on eräässä Pirkanmaan kunnassa sijaitseva keskikokoinen vajaan 300 oppilaan alakoulu. Sijaintikunta on eri kuin koulun A tapauksessa. Se on vuosina 1969 ja 1972 rakennettu kolmekerroksinen koulurakennus, jonka itäjulkisivu on kuvan 5.6 mukainen. Länsipääty on rakennettu vuonna 1969 ja itäpääty sekä lisäsiipi vuonna 1972. Kuvassa 5.7 esitetty koulun B ensimmäisen kerroksen pohjapiirustus havainnollistaa asiaa. Liitteessä 3 on esitettyä koulun B kaikkien kerrosten numeroidut pohjapiirustukset. Tilojen numerointia käytetään hyväksi tulosten käsittelyn yhteydessä.

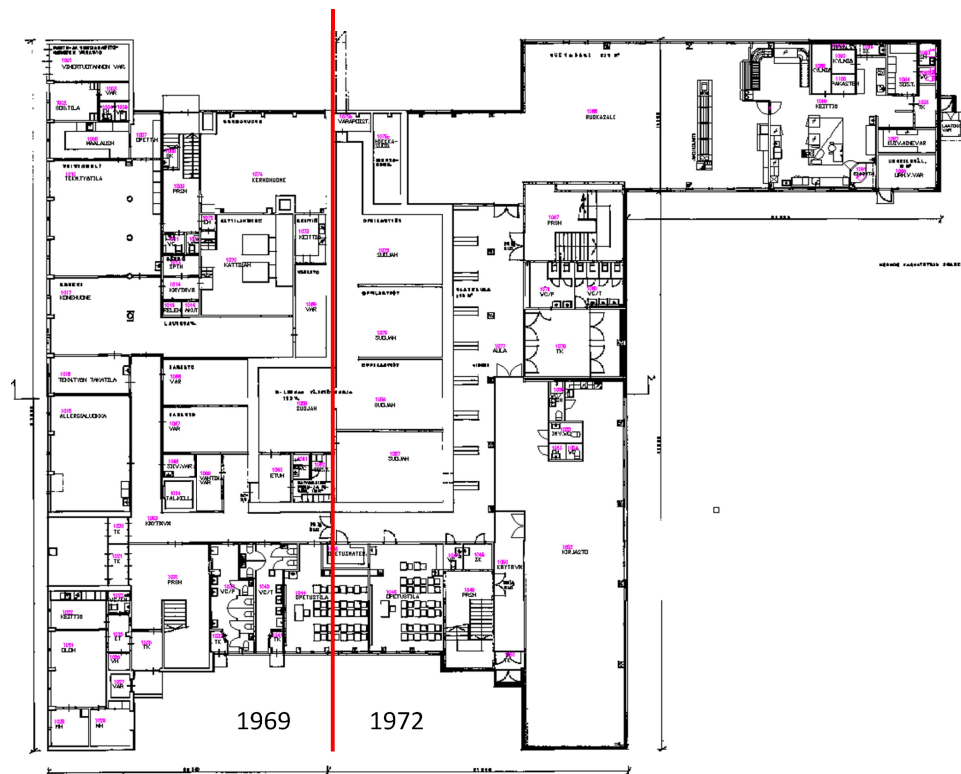
Koulun bruttoala on noin 6484 brm² (laskettu piirustuksista) ja rakennustilavuus 22 000 m³. Sekä vanhempi, että uudempi osa ovat rakenteeltaan samanlaisia ikkunoita lukuun ottamatta. Alapohjassa on maanvarainen betonilaatta, seinät on toteutettu betonisandwich -rakenteella ja yläpohja on ontelolaatoilla muodostettu tasakatto. Ikkunat on kohteessa kaksilasisia (vanha puoli: normaali kaksilasinen eli MS-ikkuna, uusi puoli: kaksilasinen normaalilla ja eristyslasilla eli MSE-ikkuna) ja tilat on varustettu avattavilla tuuletusräppänoillä. Minkäänlaista rakenteellista peruskorjausta kohteeseen ei ole tiettävästi tehty.

Kohteessa on energianlähteenä kaukolämpö, jonka laitteet on uusittu vuosina 2000–2001. Lämmönjako tapahtuu vesikiertoisen patterilämmityksen kautta. Kohteessa ei ole keskitettyä rakennusautomaatiojärjestelmää. Vanhempi ja uudempi osa eroavat toisistaan vain ilmanvaihdon toteutuksen osalta. Vanhemmassa osassa on muutamaa poikkeuksetta lukuun ottamatta ainoastaan koneellinen poisto, joka hoidetaan pääosin huippuimureilla ja lisäksi yhdellä erillisellä poistoilmakoneella. Korvausilma otetaan

vanhassa osassa ikkunoiden yläpuolisista raoista ja tuuletusräppänoistä. Vanhassa osassa on yhdessä luokassa koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä varustettuna lämmön talteenotolla. Lisäksi liikuntasaliin viedään tuloilmaa koneellisesti erillisillä tuloilmakoneilla. Uudemman osan ilmanvaihto on hoidettu pääosin erillisillä tuloilmakoneilla ja huippuimureilla. Näitä erillisiä tuloilmakoneita on yhteensä viisi kappaletta. Lisäksi kaupungin kirjastossa on yksittäinen erillinen poistoilmakone.



Kuva 5.6. Koulun B itäjulkisivu.



Kuva 5.7. Koulun B ensimmäisen kerroksen pohjapiirustus.

6. KOULUJEN MITTAUSJÄRJESTELYT

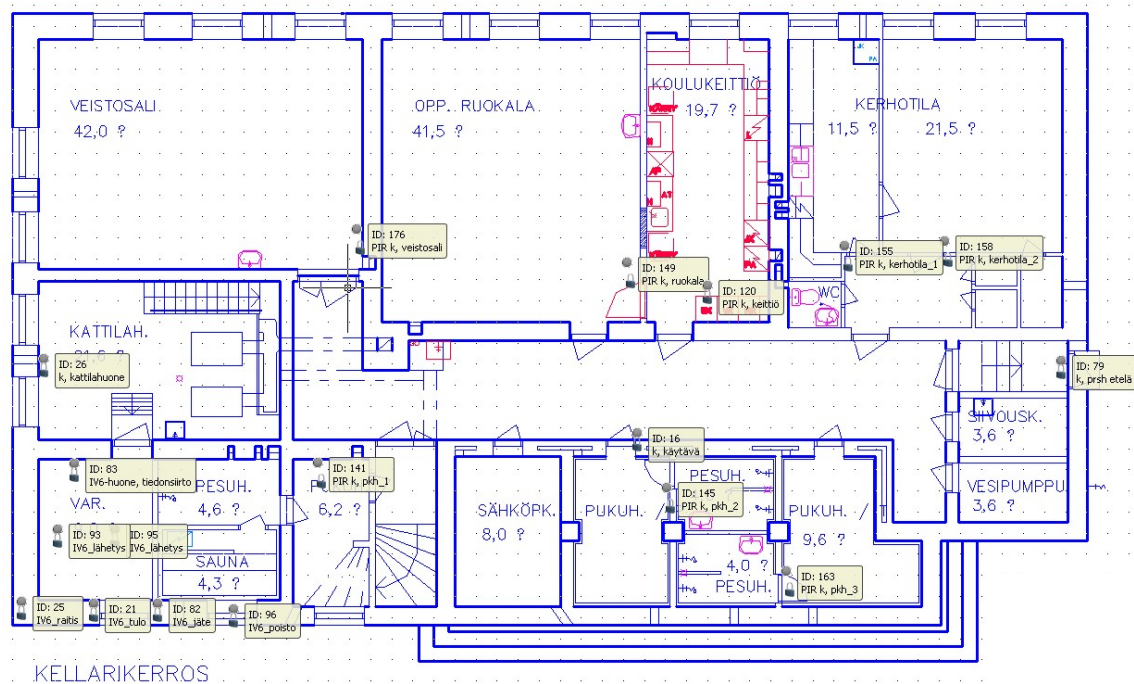
6.1. Koulujen A ja B langaton mittausjärjestely

Kouluissa A ja B on ollut käytössä kaikki esiteltyt taulukon 4.2 ja kuvan 4.3 mukaiset mittalaitteet. Langattomat mittauslaitteet on pyritty asentamaan sellaiseen paikkaan, että ne aiheuttaisivat mahdollisimman vähän vaurioita seinärakenteille. Antureiden kiinnitysvälineenä on käytetty vahvaa kaksipuolista teippiä, jota ei saisi esimerkiksi kipsilevyseinästä irrotettaessa pois ilman, että se aiheuttaisi seinälle vahinkoa. Mittalaitteiden asennuskorkeus on pyritty pitämään myös sellaisena, etteivät koululaiset ylettäisi niihin. Näin ollen asennuskorkeus on ollut 1,8 metristä yli kahteen metriin asennuspaikasta riippuen.

Luokissa, liikuntasalissa ja muissa käytön kannalta oleellisissa tiloissa on käytetty kuvan 4.3 mukaista mittalaitetta 6, jolla on voitu arvioida myös tilojen käyttöastetta verraten sitä tilojen lämpötila- ja hiilidioksidiarvoihin. Mittalaitteet on pyritty asentamaan niin, että sen sisältämällä liikkeentunnistusantureilla olisi mahdollisimman laaja näkymä kyseisiin tiloihin. Käytössä olleet hiilidioksidianturin sisältävät mittalaitteet (nro 7, kuva 4.3) on pyritty asentamaan sähkövirran syöttöpisteen paikan salliessa heti poistoilmaventtiilien alle tai mahdollisimman lähelle niitä, jotta saataisiin mahdollisimman luotettava arvio tilan hiilidioksidipitoisuudesta. Osa mittalaitteista on ollut verkossa vain tietoa siirtävinä mittalaitteina, joiden mittaustietoja ei ole tarkemmin analysoitu.

Muissa mittausten kannalta oleellisissa tiloissa kuten käytävissä ja porrashuoneissa on ollut joko valoisuus-, lämpötila- ja kosteusanturin sisältämiä mittalaitteita (nro 5, kuva 4.3) tai jonkin verran valoisuus- ja lämpötila-anturin sisältäviä mittalaitteita (nro 2, kuva 4.3). Ulkoilman olosuhteita on mitattu neljällä mittalaitteella, yksi pääilman suuntaa kohti. Koulun A mittalaitteiden avulla on pyritty määrittämään myös ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton hyötysuhdetta ja näin ollen ilmanvaihtokoneista on mitattu ulko-, tulo-, poisto- ja jäteilmän lämpötilaa tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteen määrittämiseksi. Kaikkien mittalaitteiden mittausväli oli mittausten aikana 5 min, jolloin jokaiselta mittalaitteelta on saatu mittausdataa kunkin mittalaitteen sisältämän mittausanturin osalta viiden minuutin välein.

Koulun A mittausverkko saatiin valmiiksi joulukuun 2010 loppupuolella. Koulun Internet-yhteyksiin liittyvien ongelmien vuoksi luotettavia mittaustuloksia on saatu vasta tammikuun 2011 alkupuolelta lähtien. Tällöin mittausverkon gateway-laitteissa ei ollut vielä käytössä muistikortteja. Koulussa A on ollut käytössä parhaimmillaan 64 mittalaitetta, joista kaksi on ollut gateway-laitteita. Lisäksi koulussa on kierrätetty kahta hiilidioksidianturin sisältävää mittalaitetta eri tiloissa. Kuvassa 6.1 on esitettyä koulun A kellarikerroksen mittausjärjestelyä. Ensimmäisen ja toisen kerroksen mittausjärjestelyt ovat liitteessä 4.



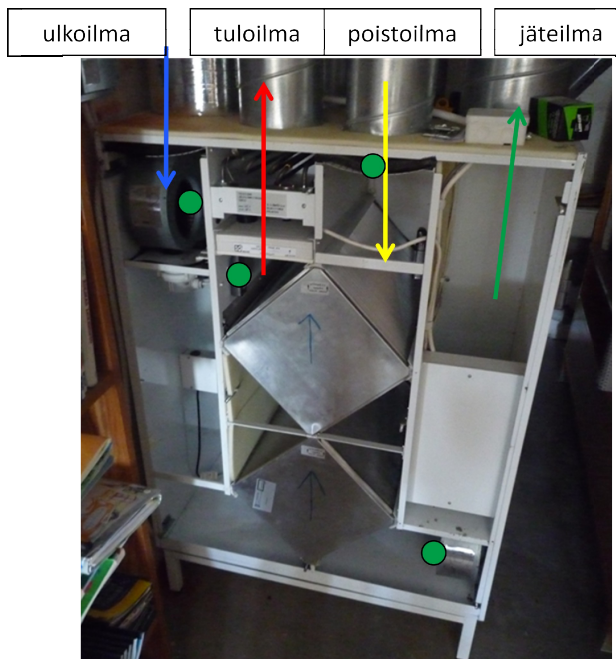
Kuva 6.1. Koulun A kellarikerroksen langattomat mittalaitteet.

Vastaavasti koulun B mittausverkko saatiin valmiiksi tammikuun 2011 alkupuolella. Niin ikään koulun Internet-yhteyksiin liittyvien ongelmien vuoksi luotettavia mitaustuloksia on saatu vasta helmikuun 2011 alkupuolelta lähtien. Tällöin mittausverkon gateway-laitteissa ei myöskään ollut käytössä vielä muistikortteja. Koulussa on ollut käytössä parhaimmillaan 93 mittalaitetta ja 2 gateway-laitetta. Lisäksi koulussa on kierätetty 2-5 hiilidioksidianturin sisältävää mittalaitetta eri tiloissa. Koulun B mittausjärjestely ovat esitettyinä liitteessä 5. Lämpötilamittauksilla on tutkittu koulujen A ja B lämpötilaolosuhteita sekä pyritty löytämään syitä poikkeaviin lämmönkulutuksiin. Jos tilojen lämpötilat ovat poikkeuksellisen kylmiä/kuumia, sillä voidaan selittää pientä/suurta lämmönkulutusta. Hiilidioksidimittauksilla on tutkittu koulujen A ja B ilmanlaatua, sillä energiatehokkuus ei saisi ikinä mennä terveellisyyden edelle. Huono ilmanlaatu lisää usein myös käyttäjien ikkunatuuletusta, jolloin rakennuksen lämmönkulutus kasvaa.

Lämmön talteenoton tehokkuuteen liittyvät mittaukset on tehty vain koulussa A. Koulussa B on ainoastaan yksi luokkakohtainen ilmanvaihtokone, joka on varustettu lämmön talteenotolla. Sen merkitys on näin ollen olematon kokonaisuuden kannalta. Koulussa A mitattiin ilmanvaihtokoneista tulo-, poisto-, ulko- ja jäteilman lämpötiloja, jotta voitaisiin määrittää ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton hyötysuhteet yhtälöiden (5) ja (8) mukaisesti. Kuvassa 6.2 on esitettyinä yhden koulun A ilmanvaihtokoneen lämpötilamittausjärjestely, missä mittalaitteet on sijoitettu seuraavasti (vihreät pisteet kuvassa)

- Ulkoilma: mittausanturi tuloilmapuhaltimen edessä olevassa eristetyssä seinämässä

- Tuloilma: mittausanturi ulko- ja tuloilman välisessä eristämättömässä seinämässä heti lämmön talteenottokeinojen jälkeen ennen tuloilman lämmityspatteria
- Poistoilma: mittausanturi ennen suodatinta poistoilmakanavassa
- Jäteilma: mittausanturi poistoilmapuhaltimen alareunassa



Kuva 6.2. Koulun A ilmanvaihtokoneen IV1 mittausjärjestely määrittäessä lämmön talteenoton hyötysuhdetta.

Lämmön talteenoton hyötysuhteen määrittämiseen tehty mittausjärjestely ei ole täydellinen. Mittaustuloksiin aiheutuu virhettä poistoilmapuhaltimen ilmaa lämmittäväs-
tä vaikutuksesta, lämmön talteenottolaitteen seinämien läpi johtuvasta lämmöstä (joh-
tumisvirhe) ja tuloilmapatterin läheisyydestä, mikä nostaa viereisen mittalaitteen lämpö-
tilaa. Mittauksilla on kuitenkin pyritty saamaan riittävän hyvä arvio kohteen ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton hyötysuhteista. Tehokas poistoilman lämmön talteenot-
to vaikuttaa merkittävästi koulun energiatehokkuuteen, sillä ilmanvaihdon energianku-
lutus on yksi merkittävimmistä tekijöistä koulujen sähkön- ja lämmönkulutuksessa.

6.2. Koulujen A ja B lämpökamerakuvaus

Koulun A lämpökamerakuvaus toteutettiin 23.2.2011 ja koulun B lämpökameraku-
vaus kahtena päivänä aikavälillä 24.2 – 25.2.2011. Lämpökamerakuvausten aikaan
ulkolämpötila oli alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja ilma oli tyyni. Lämpökamerakuvauksissa käytettiin ku-
van 6.3 mukaista lämpökameraa Flir b50. Taulukossa 6.1 on vielä koottuna mittauksissa
käytetyn lämpökameran keskeisimpiä ominaisuuksia



Kuva 6.3. Lämpökameramittauksissa käytössä ollut lämpökamera Flir i50/b50 (Flir Systems 2011).

Taulukko 6.1. Lämpökameramittauksissa käytössä olleen lämpökameran Flir i50/b50 ominaisuuksia (Flir Systems 2011).

Lämpötila-alue	Mittausresoluutio ⁽¹⁾	IR-resoluutio	Digitaalikamera	Paino
-20 °C - +120 °C	0,09 °C (25 °C)	140x140	2,3 Mp	600 g
⁽¹⁾ mittausresoluutio 25 °C lämpötilassa				

Lämpökamerakuvauksilla on pyritty etsimään kylmäsiltoja ja vuotokohtia koulujen A ja B ulkovaipoista. Vaipassa esiintyvät kylmäsilat ja vaipan kautta tapahtuvat hallitsemattomat ilmavirrat eli vuotoilma lisäävät lämmönkulutusta. Lisäksi ne aiheuttavat sisäilmahaittoja rakennuksen käyttäjille viileinä sisälämpötiloina ja vedon tunteena.

6.3. Koulujen A ja B ilmanvaihtokanavien ja – venttiilien mittaus

Koulujen A ja B ilmavirtojen mittauksissa pyrittiin saamaan selville kyseisten koulurakennusten kokonaisilmavirrat. Ilmanvaihdon osuus on merkittävä koulurakennusten lämmönkulutuksessa. Liian suuri ilmanvaihto aiheuttaa turhaan lisääntyntä lämmönkulutusta. Liian pieni ilmanvaihtuvuus aiheuttaa taas sisäilmastohaittoja esiintyen esimerkiksi huonona ilmanlaatuna. Suunniteltaessa koulurakennukselle energiansäästötoimia, on myös tiedettävä nykytilanne. Energiansäästötoimiin liittyen ilmanvaihto on yksi merkittävimmistä tekijöistä sen aiheuttaman suuren energiankulutuksen johdosta. Mittaukset suoritettiin mittauspaikan suojaetäisyydet huomioiden (SFS 5512 1989, s.4). Täten mittauksista ei voitu aina suorittaa ilmanvaihtokanavista riittävien suojaetäisyyksien puuttuessa, vaan mittauksista jouduttiin suorittamaan myös venttiilikohtaisesti.

Koulussa A on kuusi erillistä ilmanvaihtokonetta, joista jokaisen tulo- ja poistoilmavirta mitattiin erikseen. Mittaus pyrittiin pääasiassa suorittamaan kanavamittauksena viiden pisteen menetelmällä, jolloin olisi kerralla saatu mitattua ilmanvaihtokoneiden kokonaisilmavirrat. Tällöin virheiden määrä myös minimoituu ja mittaus on huomattavasti nopeampi kuin venttiilikohtaisesti. Kahden ilmanvaihtokoneen mittaus voitiin suorittaa kanavasta. Yhdelle ilmanvaihtokoneelle käytettiin suoraan mittauspöytäkirjan ilmavirta-arvoja ilman erillistä mittauksia. Muissa ilmanvaihtokoneissa mittaus jouduttiin suorittamaan kanavamittauksen lisäksi venttiilikohtaisesti riittävien suojaetäisyyksien puuttuessa. Oman lisänsä mittauksiin toi vielä se, että kolmessa ilmanvaihto-

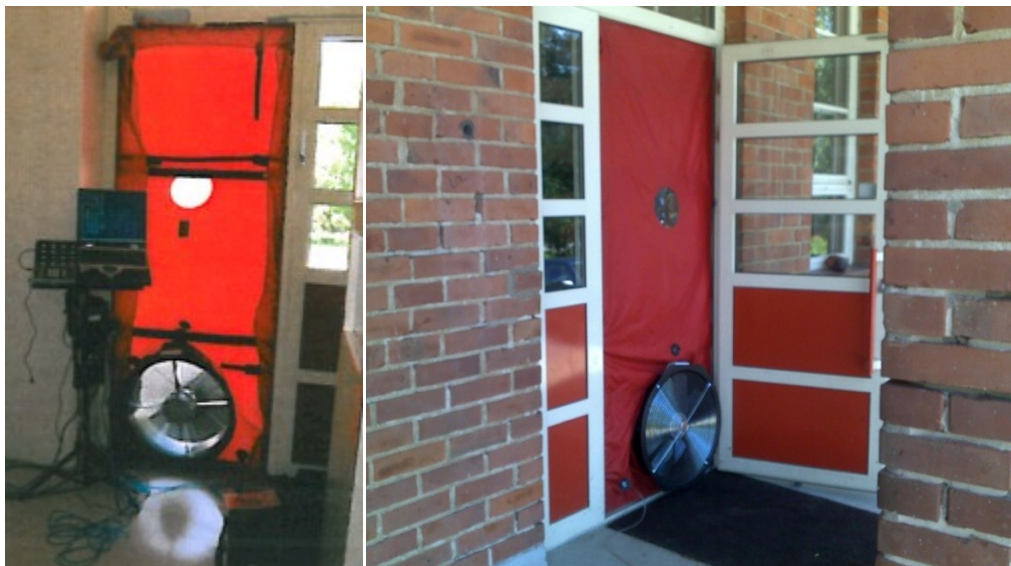
koneessa oli käyttäjän manuaalisesti säädettävissä oleva neliportainen ilmanvaihdon tehonsäätö. Ilmavirrat mitattiin jokaisella tehonsäätöportaikolla ja käyttäjiltä kysyttiin mitä tehoaluetta he käyttävät eniten arvioitaessa koulurakennuksen kokonaisilmavirtoja. Mittauksissa käytettiin kuumalanka-anemometria, paineenmittaussondia ja siipipyörä-anemometria.

Koulussa B on viisi erillistä tuloilmakonetta, yksi tulo-/poistoilmakone varustettuna lämmön talteenotolla, kaksi poistoilmakonetta ja useita huippuimureita. Kaikki tuloilmavirrat ja lisäksi koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueelta mitattiin poistoilmavirrat, jotta voitaisiin arvioida vanhemman puolen korvausilman määrää. Tuloilmavirrat mitattiin ilmanvaihtokoneiden ulkoilmasäleiköiltä monipistemittauksena käyttäen siipipyöräanemometria. Tulo-/poistoilmakoneen poistoilmavirta mitattiin jäteilmasäleiköltä myös käyttäen siipipyöräanemometria. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella poistoilmavirrat mitattiin venttiilikohteisesti käyttäen kuumalanka-anemometria ja anemometratorvea.

6.4. Koulun A ilmanpitävyyden mittaus

Koulun A ilmanpitävyyden mittauksen teki Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitos. Mittausaika oli 29.8.2011 noin klo 13.00–15.00. Mittausjärjestelyn kuvaus on tehty pääasiassa rakennustekniikan laitoksen toimittaman tutkimusselostuksen mukaan. Mittaushetkellä sää oli selkeä ja tyyni. Ulkolämpötila mittaushetkellä oli 21,4 °C. Paine-ero mittaus suoritettiin pääosin standardissa SFS-EN 13829 (SFS-EN 13829 2000) esitetyn menetelmän eli tässä diplomityössä luvussa 4.3.1 esitellyn menetelmän mukaisesti. Kokeet tehtiin koulun A 1.kerroksen ulko-oveen kuvan 6.4 mukaisesti asennetun tietokoneohjatun painekoelaitteiston avulla (Minneapolis Blower Door incl. APT 8) käyttäen kuutta paine-eroa: 10, 20, 30, 40, 50 ja 60 Pa. Mittaus tehtiin sekä ali- että ylipainemittauksena. Paine-eroa seurattiin TSI VelociCalc Plus – mittareilla kellarikerroksen oven ja 2.kerroksen parvekkeen oven kohdalta. Mittauksissa todetut paine-erot vastasivat hyvin käynnissä olevaa mittausta.

Ilmanvuotoluvun määrittämiselle on pyritty selvittämään rakennuksen ulkovai-pan ilmanpitävyyttä. Vaipan kautta tapahtuvat ilmavirrat ovat hallitsemattomia ilmavirtoja, jotka ohittavat koulun A koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän. Vuotoilmavirran mukana tulee siis kylmää ulkoilmaa suoraan rakennuksen sisään menemättä ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenottokeinojen lävitse. Vuotoilmavirta siis lisää tilojen lämmitysenergian tarvetta ja näin ollen rakennuksen lämmönkulutusta.



Kuva 6.4. Blower door-laitteiston asennus koulun A 1.kerroksen ulko-oveen mitattaessa kohteen ilmanpitävyyttä.

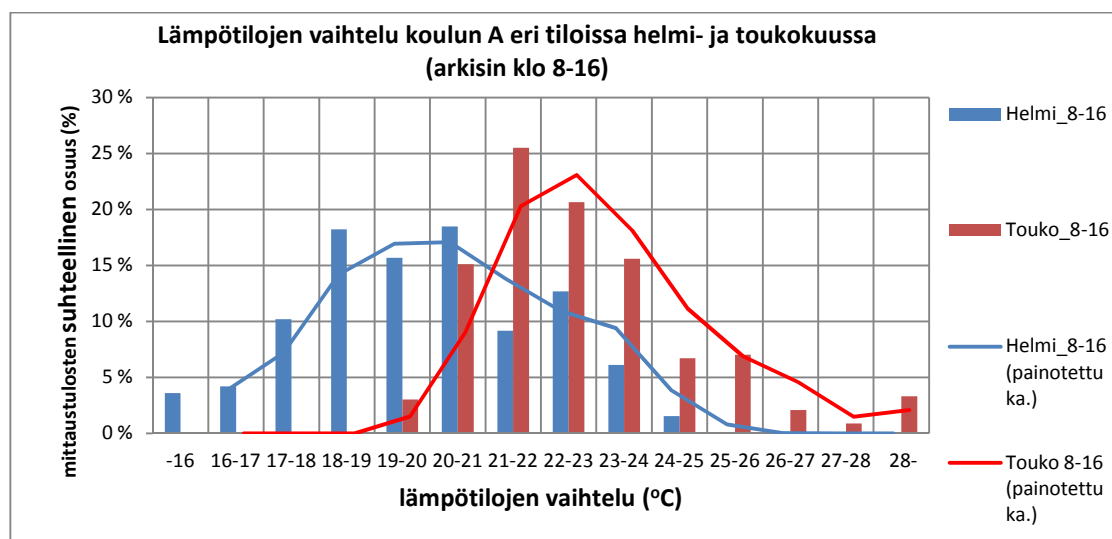
Ennen mittausten aloittamista rakennuksen ilmanvaihto tukittiin teippaamalla tulo- ja poistoilmakoneet pääasiassa ilmanvaihtokoneilta (Liite 6, kuva L6.1). Ullakkotilassa sijaitsevan ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmaventtiilit teipattiin (Liite 6, kuva L6.2). Kellarikerroksessa sijaitseva liesituuletin ja seinien raitisilmaventtiilit (pukuhuoneissa) tiivistettiin myös teippaamalla (Liite 6, kuva L6.3). Rakennuksen alkuperäisen painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän vanhoja käytöstä poistettuja poistoilmakanavia ei tiivistetty varsinaisessa mittauksessa. Mittauksen aikana kuitenkin huomattiin niiden kautta virtaavan ilmaa suhteellisen paljon, jolloin määritettiin ilmanpitävyys myös teippaamalla nämä vanhat hormit (Liite 6, kuva L6.4).

7. KOULUJEN MITTAUSTULOKSIA JA NIIDEN TARKASTELU

7.1. Koulun A mittaustuloksia

7.1.1. Lämpötilaolosuhteet

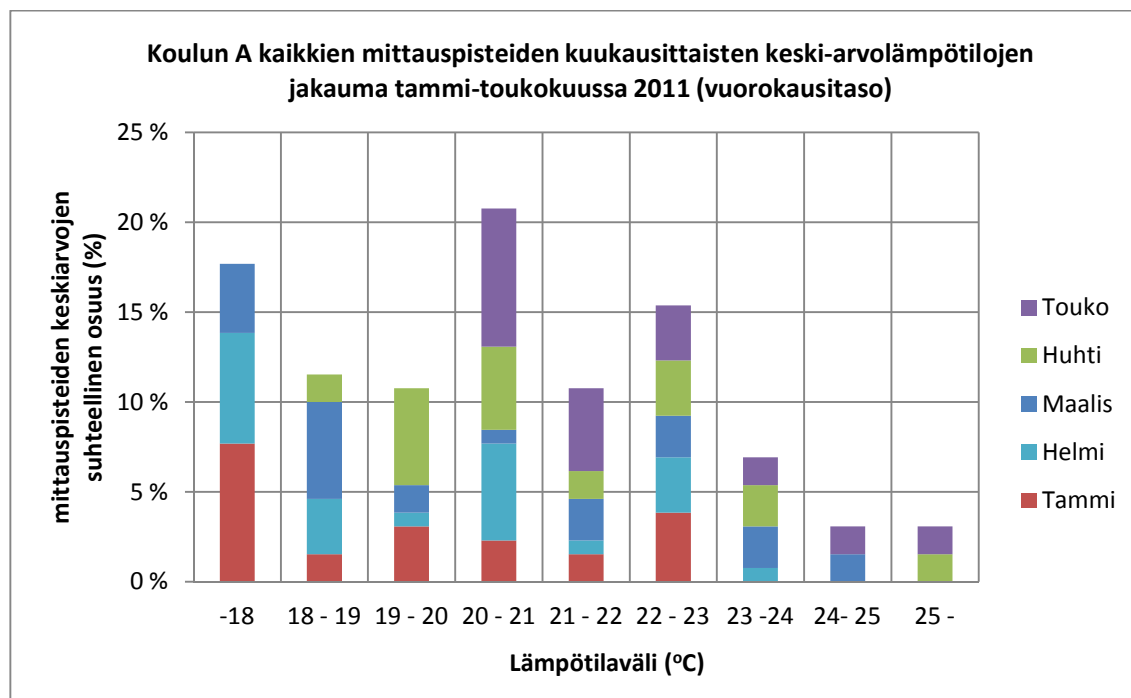
Koulussa A tehtyjen lämpötilaolosuhdemittausten perusteella koulussa on paikoitellen melko viileitä lämpötiloja. Asiaa havainnollistaa kuva 7.1, missä on esitetty lämpötilojen vaihtelua arkisin klo 8-16 koulun A eri tiloissa helmi- ja toukokuussa. Helmikuu on sinisellä ja toukokuu punaisella. Pystyakseleilla on esitetty alueelle kuuluvien mittaustulosten suhteellinen osuus prosentteina. Kuvassa esitetyt käyrät kuvaavat lämpötilojen mukaan painotettua keskiarvoa. Mittaustulokset on saatu viiden minuutin välein. Kuvassa ei ole mukana tuulikaappeja, käytäviä ja porrashuoneita.



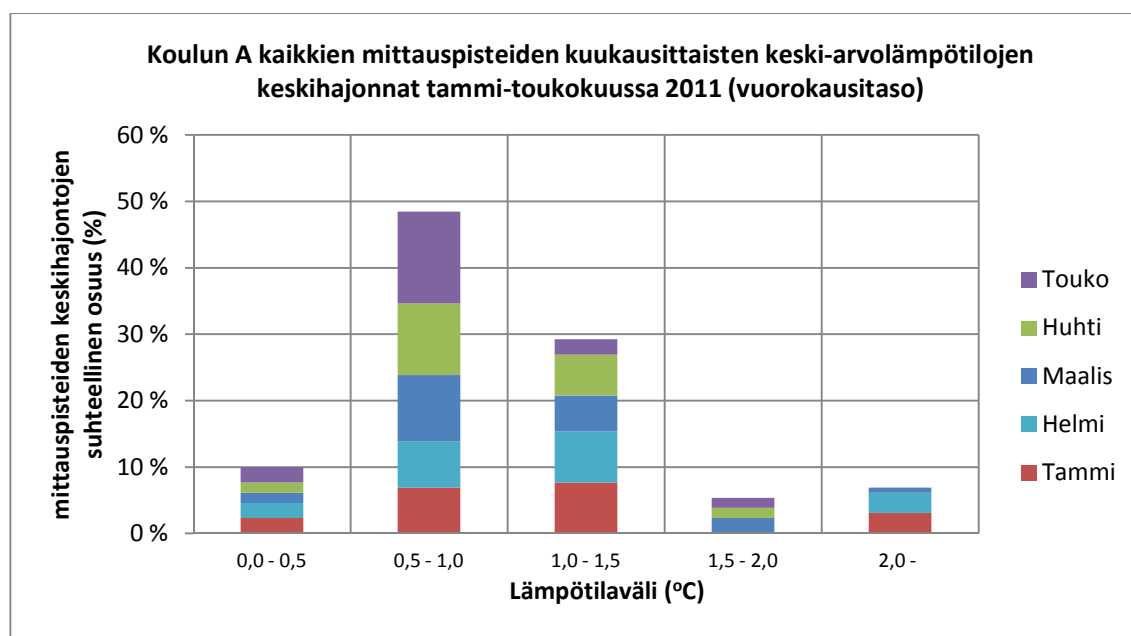
Kuva 7.1. Koulun A lämpötilojen vaihtelu tiloittain helmi- ja toukokuussa 2011 (arkisin klo 8-16). Mukana ei ole tuulikaappeja, käytäviä ja porrashuoneita. Sininen on helmikuu ja punainen toukokuu. Lisäksi käyrillä on painotettu keskiarvo lämpötilojen mukaan.

Kuvasta 7.1 nähdään, että tilat ovat melko viileitä varsinkin helmikuussa. Luokkatilojen osalta on tällöin jopa alle 18 °C lämpötiloja ja valtaosa lämpötiloista on helmikuussa alle suositellun 21 °C lämpötila-arvon. Toukokuussa lämpötilat ovat oletetusti lämpimämpiä kuin helmikuussa. Myös muina talvikuukausina oli mittausten perusteella havaittavissa poikkeuksellisen viileitä lämpötiloja koulun tiloissa. Tämä näkyy kuvassa 7.2, missä on esitetty koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvo-lämpötilojen jakauma tammi-toukokuussa 2011. Kuvan 7.2 arvoissa on otettu kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset huomioon laskettaessa kuukausikes-

kiarvoja. Kuvassa 7.3 on esitettyä koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat tammikuusta toukokuuhun.



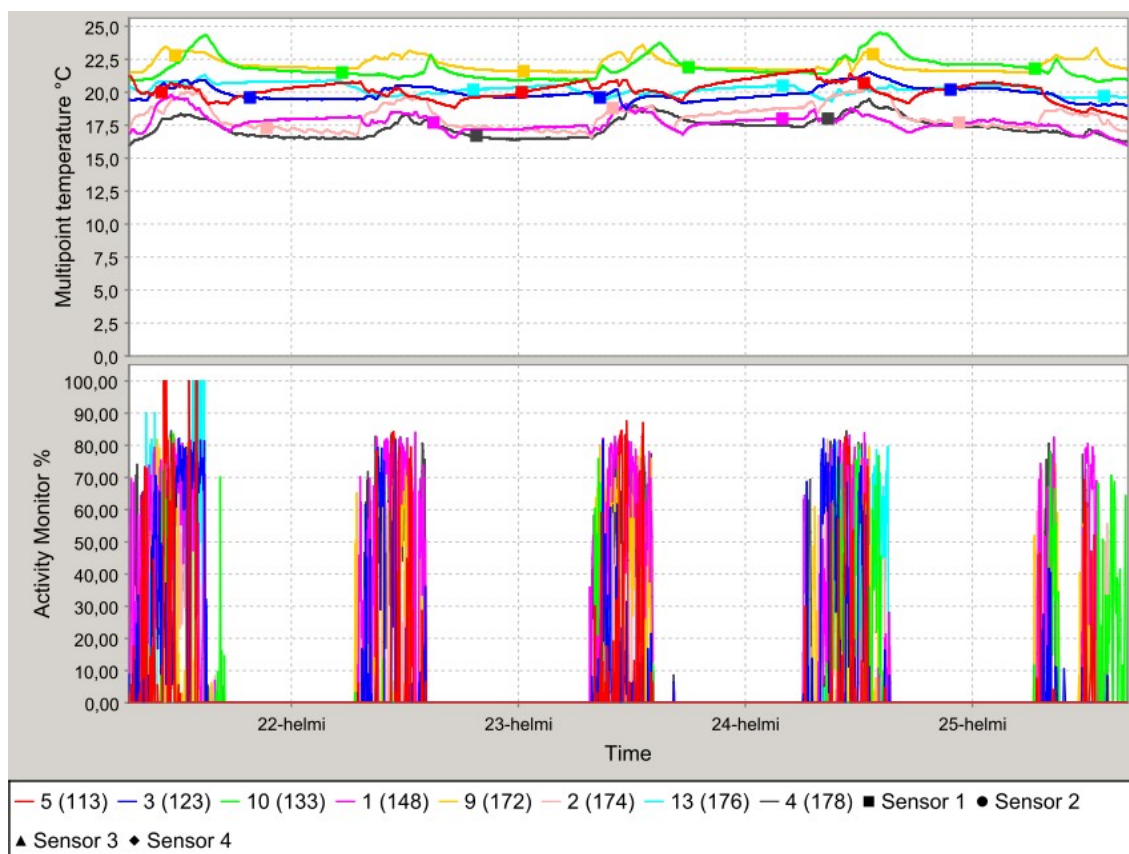
Kuva 7.2. Koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen jakauma tammi-toukokuussa 2011 (otettu huomioon kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset laskettaessa kuukausikeskiarvoja).



Kuva 7.3. Koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat tammi-toukokuussa 2011 (otettu huomioon kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset laskettaessa kuukausikeskiarvoja).

Kuvasta 7.2 nähdään, että noin 60 % mittauspisteiden tammi-toukokuun kuukausittaisista keskiarvolämpötiloista on ollut alle 21 ° C. Kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat ovat kuvan 7.3 mukaan olleet pääasiassa välillä 0,5-1,5 ° C. Liitteessä 7 on vielä esitettyä koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimi- ja maksimiarvot. Niistä käy ilmi samat asiat kuin edellisistäkin kuvista. Viileät lämpötilaolosuhteet selittävät koulun A pientä lämmönkulutusta. Tutkimuksen aikana kouluun A toteutettiin myös sisäilmastokysely (Sahakari 2011), missä joidenkin tilojen viileydestä annettiin negatiivista palautetta. Pääosin koulun A rehtori oli kuitenkin tyytyväinen koulun lämpötilaolosuhteisiin, vaikka mittauksilla todettiin sisälämpötilojen olevan paikoitellen jopa liian viileitä.

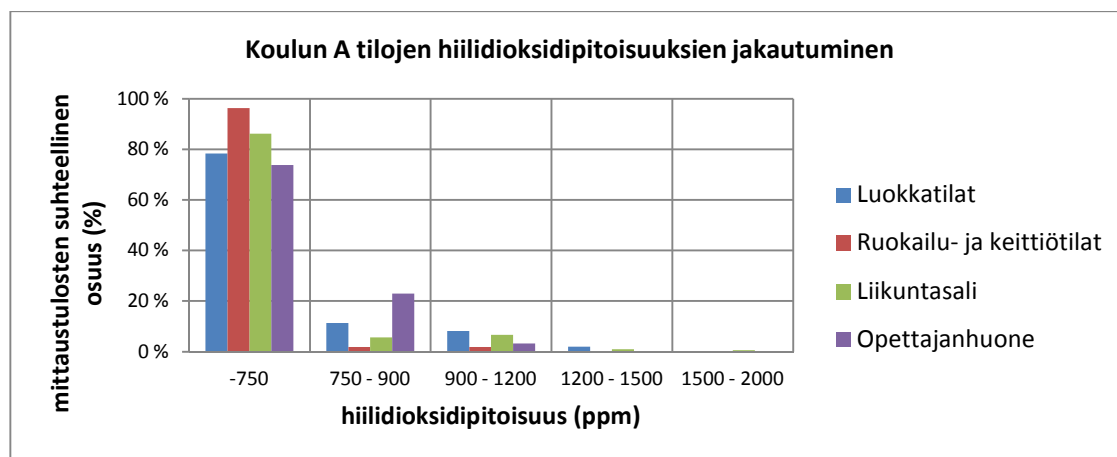
Alla olevassa kuvassa 7.4 on vielä esitettyä lämpötilojen ja aktiviteetin (liikkeentunnistusanturi) vaihtelua yhdeltä helmikuun viikolta kaikissa koulun A luokkatiloissa. Luokkatilojen numerointi on esitettyä kuvan alla ja suluissa on mittalaitteen tunnistenumero. Liitteessä 1 on esitettyä koulun A numeroidut pohjapiirustukset. Kuvasta 7.4 nähdään, että ainoastaan kahdessa luokkatilassa lämpötilat ovat pääosin suosituslämpötilan (21 °C) yläpuolella. Käyttöasteen lämpötilaa nostava vaikutus käy hyvin ilmi kuvasta 7.4.



Kuva 7.4. Koulun A luokkatilojen lämpötilojen ja aktiviteetin (liikkeentunnistusanturi) vaihtelua aikavälillä 21.2.2011 klo 8-25.2.2011 klo 16.

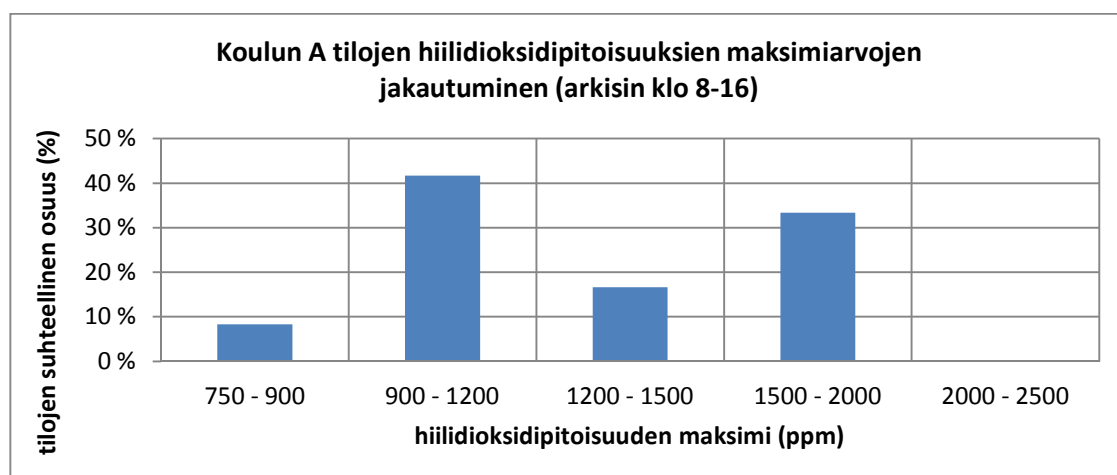
7.1.2. Ilmanlaatu

Tehtyjen ilmanlaadun mittausten perusteella koulussa A ei ollut havaittavissa suurempia sisäilmastohaittoja. Myös projektissa kouluun A toteutettu sisäilmastokysely tukee tätä (Sahakari 2011). Kuvassa 7.5 on esitetty mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelua koulun A eri tiloissa. Pystyakselilla on jälleen esitettynä alueelle kuuluvien mittaustulosten suhteellinen osuus prosentteina. Mittaustulokset on huomioitu vain arkipäiviltä aikaväliltä klo 8-16.



Kuva 7.5. Koulun A luokkatilojen, ruokailu- ja keittiötilojen, liikuntasalin ja opettajanhuoneen hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelu (arkisin klo 8-16).

Kuvasta 7.5 nähdään, että koulussa A hiilidioksidipitoisuudet ovat olleet suurimmaksi osaksi alle 1200 ppm. Jotkin yksittäiset mittaukset ovat ylittäneet 1200 ppm ja 1500 ppm raja-arvot. On tosin huomioitava, että varsinkin luokkatilojen pääasiallinen käyttöaika on klo 8-14, mutta kuvaajissa on käytetty aikaväliä klo 8-16. Kaikki tilat eivät myöskään ole käytössä koko kyseistä aikaa. Tämä johdosta kuvassa 7.6 on vielä esitettynä koulun A tilojen hiilidioksidipitoisuuksien maksimien jakautuminen.



Kuva 7.6. Koulun A tilojen hiilidioksidipitoisuuksien maksimiarvot (arkisin klo 8-16).

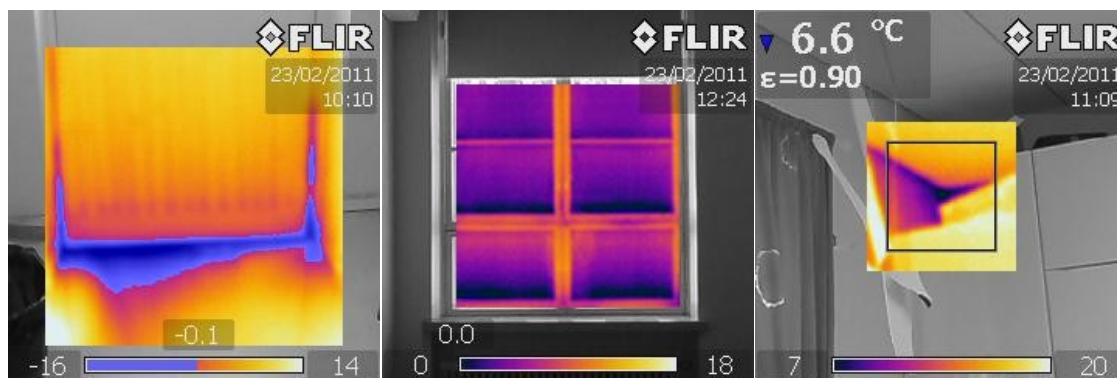
Kuvasta 7.6. nähdään, että hiukan yli kolmannes eli kaksi tilaa koulun A mitatuista tiloissa on ainakin hetkellisesti ylitetty terveydensuojelulain ilman hiilidioksidipitoisuudelle asettaman rajan eli 1500 ppm (Asumisterveysohje 2003, s.22). Suomen rakentamismääräyskokoelmassa esitetty raja-arvo eli 1200 ppm on ylitetty vajaassa 50 % mitatuista tiloista eli kuuden tilan osalta (D2 2008, s.7). Kuvan 7.6 hiilidioksidipitoisuuden maksimit ovat olleet kuitenkin hyvin hetkellisiä, eikä ilmanlaadun osalta havaittu ongelmaa koulussa A. Usein huono ilmanlaatu lisää ikkunatuuletuksen käyttöä ja näin myös lämmönkulutuksen nousua.

7.1.3. Ilmanpitävyyden mittaus ja lämpökamerakuvaus

Koulun A ilmanpitävyyden mittaus ja lämpökamerakuvaus suoritettiin erillisinä ajan-kohtina niin kuin edellä on jo mainittu. Jos ilmanpitävyyden mittaus olisi suoritettu talvella, lämpökamerakuvaus olisi voitu myös suorittaa samaan aikaan, jolloin tuotetun paine-eron myötä rakennuksen vaipan vuotokohdat olisivat näkyneet selkeämmin. Ilmanpitävyyden mittaus ja lämpökamerakuvaus on kuitenkin käsiteltynä samassa luvussa, koska molemmista mittausmenetelmistä saadut tulokset ovat paljon riippuvaisia toisistaan.

Mitattaessa koulun A ilmanpitävyyttä painekoemenetelmällä ilmanvuotoluvuksi n_{50} saatiin alipainekokeella 1,86 1/h ja ylipainekokeella 1,75 1/h. Tällöin koulun A ilmanvuotoluvuksi n_{50} saadaan ali- ja ylipainekokeen keskiarvo eli 1,8 1/h. Mittausten aikana huomattiin koulun A vanhan painovoimaisen poistoilmahormin (liite 6, kuva L6.3) kautta tapahtuvan paljon ilmavuotoja. Tukkimalla nämä hormit ja tekemällä toiset mittaukset saatiin ilmanvuotoluvuksi n_{50} , 1,6 1/h. Ilmanvuotoluku olisi siis 0,2 1/h parempi, jos vanhat poistoilmahormit tukittaisiin. Varsinkin tilan 4 (liite 1) vanha poistoilmahormi vuoti reilusti ilmaa, mikä myös osaltaan selittää kyseisen tilan viileitä sisälämpötiloja. Vanhan ilmanvaihtojärjestelmän hormoneja oli myös tiloissa 8, 12, 13, 14 ja 18 sekä kerhotilan wc:ssä, siivouskomerossa ja vesipumppuhuoneessa.

Koulun A ilmanvuotoluku on vanhan poistoilmahormin kautta tapahtuvista ilmavuodoista huolimatta verrattain hyvä mitausten perusteella. Mitattu ilmanvuotoluku on pienempi kuin rakentamismääräysten vertailuarvona esitetty ilmanvuotoluku 2 1/h (D3 2008, s.11). Hyvästä ilmanpitävyydestä huolimatta lämpökamerakuvausajan aikana huomattiin rakennuksessa olevan kuitenkin yksittäisiä kohtia, joista lämpövuotoja tapahtuu enemmän vanhan painovoimaisen poistoilmahormin lisäksi. Näitä olivat ulos johtavat ovet, osa kaksilasisista ikkunoista ja yksittäinen huoneen nurkka. Kuvassa 7.7 on esimerkkinä lämpökamerakuvia toisen kerroksen parvekkeelle johtavasta ovesta, liikuntasalin ikkunasta sekä yhden luokkatilan nurkasta. Kokonaisuuden kannalta koulun A hyvä ilmanpitävyys on yksi merkittävä selittävä tekijä sen pieneen lämmönkulutukseen.



Kuva 7.7. Lämpökamerakuva koulun A tilan 7 parvekkeelle johtavasta ulko-ovesta, tilan 8 ikkunasta sekä tilan 5 nurkasta (liite 1), 23.2.2011. Ensimmäisessä kuvassa on merkitty vaaleansinisellä ne kohdat, joissa lämpötila on alle $-0,1$ °C. Ovessa ei ole lainkaan tiivisteitä.

7.1.4. Ilmanvaihtokanavien ja –venttiilien ilmavirtojen mittaus

Koulun A kokonaisilmavirtoja määritettäessä pyrittiin mittaamaan jokaisen yksittäisen ilmanvaihtokoneen ja huippuimurin ilmavirrat. Taulukossa 7.1 on esitettyä koulun A ilmanvaihtokoneiden vaikutusalueet ja käyntiajat. Ilmanvaihtokoneiden käyntiajat on määritetty ilmanvaihtokoneissa olevien langattomien lämpötilamittausten perusteella (kuva 6.2). Liitteen 8 kuva havainnollistaa asiaa paremmin. Huippuimureiden käyntiajat on katsottu huippuimureiden munakelloista sähkökaapeilta. Viimeinen tunti käyttöajasta on kiinteistöhoitajien mukaan hitaalla käyntinopeudella, joka on puolet iv-koneen/huippuimurin normaalista ilmavirrasta.

Taulukko 7.1. Koulun A ilmanvaihtokoneiden ja huippuimureiden vaikutusalueet (tilojen numeroinnit liitteessä 1) ja käyntiajat.

Ilmanvaihtokone /huippuimuri	Vaikutusalue	Käyntiajat arkisin ⁽¹⁾	Lisätietoja
IV1	2.krs: kaksi luokkahuonetta (3 ja 4), arkisto ja wc	7.30 - 15.30	Käyttäjällä neliportainen säätönuppi
IV2	2.krs: kolme luokkahuonetta (1, 2 ja 5) ja eteinen	7.00 - 17.00	-
IV3	1.krs: luokkahuone (10)	7.30 - 15.30	Käyttäjällä neliportainen säätönuppi
IV4	1.krs: luokkahuone (9), aula (12), 2xWC	7.30 - 15.30	Käyttäjällä neliportainen säätönuppi
IV5	1.krs: liikuntasali (8 ja 11)	8.30 - 15.00	Käyttäjällä neliportainen säätönuppi
IV6	kellarikerros: kaikki kellarikerroksen tilat	5.00 - 17.00	Kaksi ajastimella asetettua tehoaluetta
HI 1	2.krs: luokkahuone (3), wc	5.00 - 17.00	-
HI 2	kellarikerros: keittiö (15)	5.00 - 17.00	-
HI 3	2.krs: siivouskomero, wc	5.00 - 17.00	-

⁽¹⁾Käyntiajat selvitetty ilmanvaihtokoneiden lämpötilamittausten perusteella huippuimureita lukuun ottamatta, joiden käyntiajat katsottu huippuimureiden munakelloista sähkökaapeilta.

Taulukossa 7.2 on esitettyä koulun A ilmanvaihtokoneiden, huippuimureiden ja kellarikerroksen erillisten korvausilmaventtiilien ilmavirrat. Ilmavirrat on laskettu mitaustuloksista yhtälöiden (17) - (20) avulla ilmanvaihtokonetta IV6, huippuimuria HI2 ja erillisiä korvausilmaventtiilejä lukuun ottamatta. Ilmanvaihtokoneen IV6 ilmavirrat on katsottu suoraan mittauspöytäkirjoista ja huippuimurin HI2 sekä erillisten korvausilmaventtiilien ilmavirrat on arvioitu, koska ne ovat jääneet epähuomiossa mitaamatta. Ilmanvaihtokoneiden osalta taulukossa 7.2 on käytetty ilmavirroilla painotettuja käyntiaikoja siten, että on huomioitu ilmanvaihtokoneiden mahdolliset eri tehoalueella toimivat käyntiajat. Ilmanvaihtokonetta IV6 lukuun ottamatta kaikki ilmanvaihtokoneet toimivat puoliteholla vuorokautisen käyntiajan viimeisen tunnin. Ilmanvaihtokone IV6 toimii puolet käyttöajastaan pienellä ilmavirralla, joka on mittauspöytäkirjan mukaan noin puolet normaalista ilmavirrasta.

Niiden ilmanvaihtokoneiden osalta, joissa on käyttäjän säädettävissä oleva neliportainen säätönappi (IV1, IV3 ja IV4) on taulukkoon 7.2 koottu niiden tehoalueiden ilmavirrat, joita käyttäjien haastattelun perusteella eniten käytetään. Ilmanvaihtokoneen IV3 ilmavirrat on asetettu nolaksi, koska sitä ei käytetä koulussa A sen aiheuttaman kovan melun johdosta. Myös ilmanvaihtokoneen IV4 osalta on koettu meluhaittaa. Näiden ilmanvaihtokoneiden vaikutusalueella käytetään jonkin verran ikkunatuuletusta. Huippuimurin HI1 huomattiin sitä mitattaessa olevan hajalla. Taulukossa esiintyvä huippuimurin HI1 ilmavirta on siis mittaushetkellä painovoimaisesti poistoilmakanavaan siirtyvä ilmavirta.

Taulukko 7.2. Koulun A käyntiajoilla painotetut ilmavirrat.

Ilmanvaihtokone /huippuimuri /erilliset korvausilmaventtiilit	Tuloilmavirta, q (l/s)	Poistoilmavirta, q (l/s)
IV1	100	104
IV2	100	70
IV3	0	0
IV4	45	48
IV5	74	53
IV6	325	325
HI1	0	17
HI2 ⁽¹⁾	0	20
HI3	0	79
erilliset korvausilmaventtiilit (2 kpl) ⁽¹⁾	20	0
Summa	664	716
⁽¹⁾ Ilmavirrat arvioitu		

Koulun A kokonaistuloilmavirraksi saadaan taulukon 7.2 mukaan 664 dm³/s ja poistoilmavirraksi 716 dm³/s. Laitteiden keskimääräinen vuotokautinen käyntiaika on 10,6 h. Koulun A koneelliseksi ilmanvaihtuvuudeksi saadaan poistoilmavirtaukselle 1,0

1/h yhtälön (12) avulla, kun jätetään vuotoilmavirta huomioimatta ja käytetään rakennuksen ilmatilavuutta 2763 m³ (tässä ei ole huomioitu ullakkokerroksen kylmää osaa).

7.1.5. Lämmön talteenoton mittaukset

Kahden ilmanvaihtokoneen (IV3 ja IV4) osalta ei saatu mitattua tuloilman lämpötilaa kuvan 6.2 mittausjärjestelyn mukaisesti, koska tuloilman jälkilämmityspatteri oli välittömästi lämmön talteenottokennon jälkeen kyseisissä ilmanvaihtokoneissa. Kyseisistä koneista ei mitattu myöskään ulkoilman lämpötilaa, jolloin poistoilman lämpötilasuhteen määrittämiseksi käytettiin kolmen muun ilmanvaihtokoneen (IV1, IV5 ja IV6) ulkoilman lämpötilamittausten keskiarvoa ja tuloilman lämpötilasuhte määritettiin yhtälöstä (6). Muiden ilmanvaihtokoneiden osalta tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteet on laskettu normaalisti yhtälöiden (5) ja (8) avulla lämpötilamittausten tuloksista. Ilmanvaihtokoneiden lämpötiloja on mitattu maaliskuun lopusta toukokuun loppuun. Mittaus tuloksia on kuitenkin hyödynnetty vain huhtikuun loppuun asti, koska kiinteistönhoitaja asetti lämmön talteenoton ohituksen ilmanvaihtokoneisiin toukokuun alussa. Saatujen lämpötilamittausten perusteella on saatu taulukon 7.3 mukaisia tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteita ilmanvaihtokoneiden käyntiajoille.

Taulukko 7.3. Koulun A ilmanvaihtokoneiden lämpötilan mittaustulosten perusteella lasketut tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteet niiden käyntiajoilla aikavälillä 23.3.–29.4.2011 (IV6 30.3–29.4.2011).

Ilmanvaihtokone	Tuloilman lämpötilasuhte (%) ⁽¹⁾	Poistoilman lämpötilasuhte (%) ⁽²⁾
IV1	61	77
IV2	49	72
IV3	55	51
IV4	55	51
IV5	63	63
IV6	75	74
⁽¹⁾ yhtälö (5)		
⁽²⁾ yhtälö (8)		

Taulukosta 7.3 nähdään, että ilmanvaihtokoneen IV1 poistoilman lämpötilasuhte ovat korkeampi kuin tuloilman huolimatta siitä, että ilmanvaihtokoneen poistoilmavirta on suurempi kuin tuloilmavirta. Jotta saatujen tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteiden luotettavuutta voitaisiin arvioida tarkemmin, lasketaan taulukon 7.3 tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteista niitä vastaavat poisto- ja tuloilman lämpötilasuhteet yhtälöiden (6) ja (7) avulla. Lasketut tulokset on esitetty alla taulukossa 7.4, joista pitäisi saada samantyyppisiä tuloksia kuin taulukossa 7.3 on esitetty.

Taulukko 7.4. Laskennallinen lämpötilasuhteen laskenta yhtälöillä (6) ja (7) koulun A ilmanvaihtokoneille, kun joko poisto- tai tuloilman lämpötilasuhte on tiedossa.

Ilmanvaihtokone	Poistoilman lämpötilasuhteesta laskettu tuloilman lämpötilasuhte (%)	Tuloilman lämpötilasuhteesta laskettu poistoilman lämpötilasuhte (%)
IV1	80	59
IV2	50	69
IV3	55	51
IV4	55	51
IV5	45	88
IV6	74	75

Taulukosta 7.4 nähdään, että Ilmanvaihtokoneiden IV3 ja IV4 lämpötilasuhteet ovat täysin samat kuin taulukossa 7.3. Tähän vaikuttaa se, että taulukon 7.3 tuloilman lämpötilasuhte on ilmanvaihtokoneiden IV3 ja IV4 osalta laskettu jo käyttäen hyväksi yhtälöä (6). Ilmanvaihtokoneiden IV2 ja IV6 mittaustuloksista sekä yhtälöiden (6) ja (7) perusteella johdetut lämpötilasuhteet ovat hyvin lähellä toisiaan. Ilmanvaihtokoneiden IV1 ja IV5 osalta tulokset eroavat huomattavasti. Kyseiset ilmanvaihtokoneet ovat kuvan 6.2 mukaisia ja niiden mittausjärjestely on täysin identtinen keskenään. Mittaustuloksiin aiheutuu virhettä jo mittausjärjestelykuvauksessa mainituista syistä, mutta ehkä suurempi virhe aiheutuu ilmavirtamittauksista. Ilmanvaihtokoneiden IV1 ja IV5 osalta jouduttiin tekemään osa mittauksista päätelaitemittauksena, kun esimerkiksi ilmanvaihtokoneen IV2 osalta tehtiin pääasiassa kanavamittauksia. Pienempään virheeseen ilman tilavuusvirtojen mittauksien osalta päästään, jos ilmanvaihtokoneen ilmavirta voidaan määrittää yhdellä viiden pisteen menetelmän mukaisella mittauksella sen sijaan, että mitataan jokainen yksittäinen venttiili ilmanvaihtokoneen alueelta.

Koululle A laskettiin myös keskimääräinen lämmön talteenoton hyötysuhde huomioimalla ilmanvaihtokoneiden käyntiajat ja ilmavirrat. Ilmanvaihtokoneissa, joiden tehoon käyttäjä pystyy vaikuttamaan, valittiin se tehoalue, jota tilan käyttäjä sanoi eniten käyttävänsä. Lisäksi huomioitiin huippuimurit ja kellarikerroksen kaksi erillistä korvausilmaventtiiliä. Huippuimureiden ja erillistulojen lämmön talteenoton hyötysuhteeksi asetettiin 0 %. Keskimääräiseksi Mattilan koulun lämmön talteenoton hyötysuhteeksi saadaan tällöin 63 % (tuloilman lämpötilasuhte). Poistoilman lämpötilasuhteeksi saadaan 59 %. Poistoilman lämmön talteenotolla on selkeä vaikutus koulun A pieneen lämmönkulutukseen.

7.1.6. Pieneen lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät

Tehtyjen mittausten, seurannan ja kyselyjen perusteella on yritetty etsiä yksityiskohtaisia selittäviä tekijöitä koulun A pieneen lämmönkulutukseen. Alla olevaan taulukkoon 7.5 on koottu lämmönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä, joita on analysoitu tarkemmin luvussa 7.3. Taulukkoon 7.5 on koottu myös kiinteistöhoitoon ja käyttäjiin liittyviä asioita, jotka ovat selvinneet koulun A tarkemman mittauksen ja seurannan aikana. Tau-

lukossa on viitattu myös sisäilmastokyselyyn, joka teetettiin koulun A henkilökunnalle (Sahakari 2011).

Taulukko 7.5. Koulun A lämmönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä.

Mikä	Millainen	Lisätietoja
Lämmöneristys		
Alapohja	$U_{ap} = 0,12 \text{ W/Km}^2$ (D3 2011: $0,16 \text{ W/Km}^2$)	laskennallinen
Yläpohja	$U_{yp} = 0,52 \text{ W/Km}^2$ (D3 2011: $0,09 \text{ W/Km}^2$)	laskennallinen
Ulkoseinät	$U_{us} = 0,91 \text{ W/Km}^2$ (D3 2011: $0,17 \text{ W/Km}^2$)	laskennallinen
Ovet ja ikkunat	$U_{ovet} = U_{ikkunat} = 2,00 \text{ W/Km}^2$ (D3 2011: $1,0 \text{ W/Km}^2$), ikkunoita 18 % julkisivu- alasta	arvioitu
Ilmanpitävyys	$n_{50} = 1,8 \text{ 1/h}$, $q_{50} = 4,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (D3 2008: $n_{50} = 2,0 \text{ 1/h}$; D3 2011: $q_{50} = 2,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, vertailuarvo)	mitattu
Ilmanvaihtojärjestelmä	koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	6 iv-konetta, 3 huippuimuria, muu- tama erillinen korvausilmaventtiili, vanha painovoimainen poistoilma- hormi
Ilmanvaihdon riittävyys	sisäilmastokyselyn mukaan riittävä ilmanvaihto; keskimääräinen koneellinen ilmanvaihtuvuus käyttöaikana $n = 1,0 \text{ 1/h}$	yksi huippuimuri oli hajalla (HI2)
Poistoilman lämmön talteenotto ja sen hyö- tysuhde ⁽¹⁾	kaikissa iv-koneissa, keskimäärin 63 % (tuloilma), iv-koneesta riippuen välillä 49–75 %	ilmavirta- ja lämpötilamittaukset iv- koneilta
Tuloilman jälkilämmitys	sähköpatteri	pienentää lämmönkulutusta
Lämmitysjärjestelmä	öljykattila vesipattereilla	vanha
Tilojen käyttöaika	pääosin klo 8-14, liikuntasalissa ilt- käyttöä muutamana iltana viikossa	kysely käyttäjiltä
Kiinteistönhoito	kiertävä (9 kiinteistöä), tuntee kohteensa hyvin, käy paikalla säännöllisesti ja pyrkii hoitamaan työnsä hyvin	esim. pyrkii välttämään liian korkei- ta sisälämpötiloja lämmityskaudella)
Käyttäjät	muutaman tilan osalta käytetään ikkuna- tuuletusta	kyseisten tilojen ilmanvaihtokoneis- sa meluhaitta
Lämpötilaolosuhteet	paikoitellen melko viileitä lämpötiloja lämmityskaudella	mittaukset ja sisäilmastokysely
Ilman laatu	ei suuria puutteita mittausten ja kysely- jen perusteella	mittaukset ja sisäilmastokysely

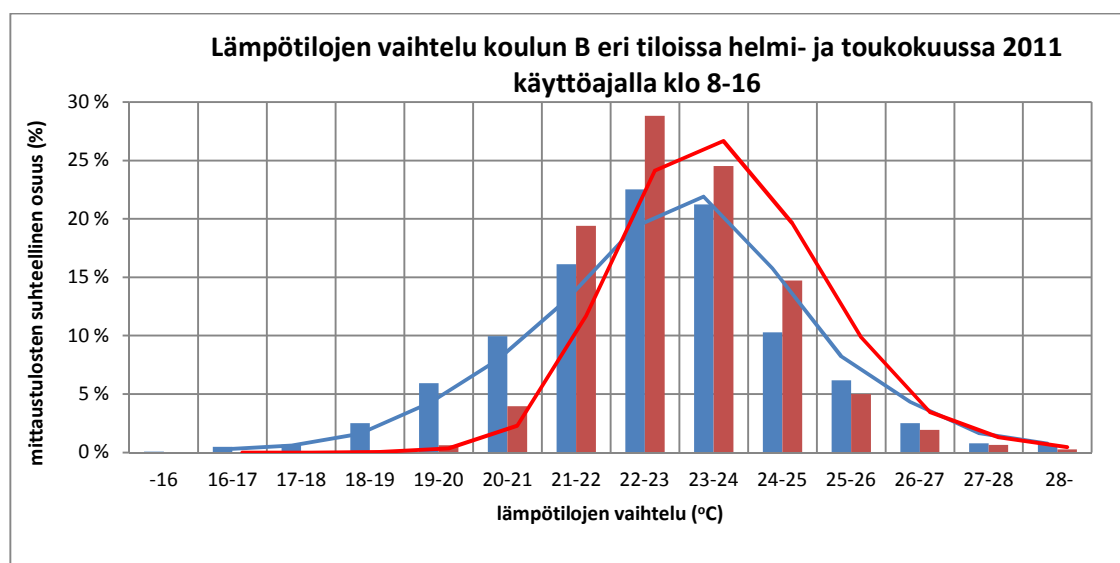
⁽¹⁾ Keskimääräisessä lämmön talteenoton hyötysuhteessa on huomioitu erillispoistot ja erilliset korvausil-
maventtiilit painottaen käyntiajoilla ja ilmavirroilla.

7.2. Koulun B mittaustuloksia

7.2.1. Lämpötilaolosuhteet

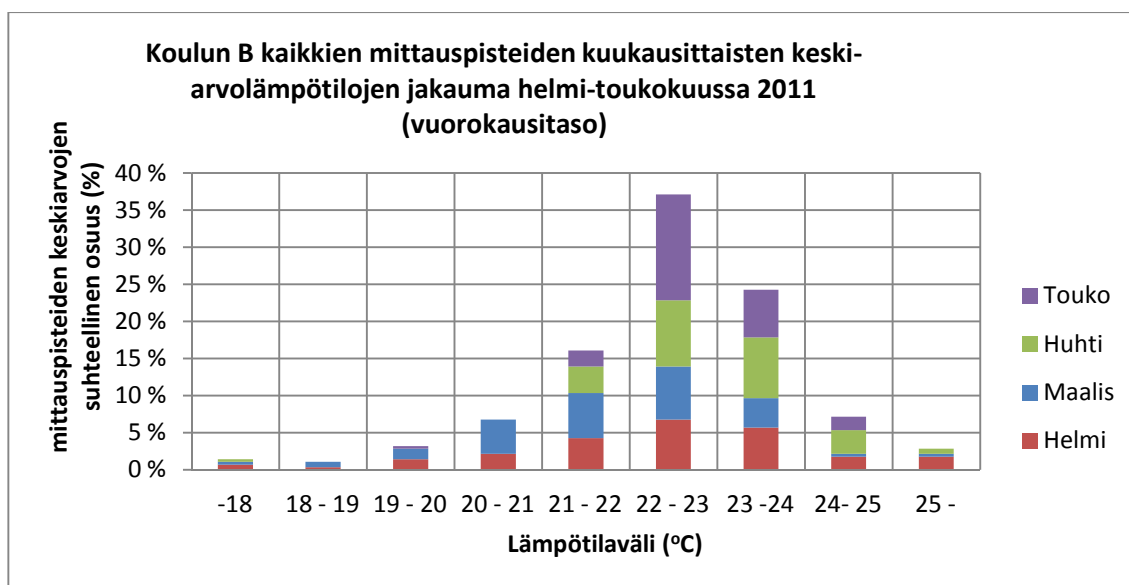
Koulun B tilat olivat koululle teetetyin sisäilmastokyselyn perusteella kuumia tai vetoisia ja lämpötilaltaan vaihtelevia (Sahakari 2011). Myös ilman laatu oli kyselyn ja mittausten mukaan huono varsinkin koulun vanhalla puolella, missä on koneellinen poistoil-

manvaihtojärjestelmä. Korkeiden lämpötilojen ja huonon ilmanlaadun seurauksena käyttäjien tuuletusräppänöiden kautta tapahtuva ikkunatuuletus oli usein toistuvaa, jotta olisi saatu tyydyttävät sisäilmaolosuhteet tiloihin. Tuuletusräppänöitä jätettiin auki jopa yöksi, joka entisestään lisäsi lämmönkulutusta. Tehdyt mittaukset ovat tukeneet sisäilmastokyselyn tuloksia. Kuvassa 7.8 on esitetty lämpötilojen vaihtelua arkisin klo 8-16 koulun B eri tiloissa helmi- ja toukokuussa. Helmikuu on sinisellä ja toukokuu punaisella. Pystyakseleilla on esitetty alueelle kuuluvien mittaustulosten suhteellinen osuus prosentteina. Kuvassa esitetyt käyrät kuvaavat lämpötilojen mukaan painotettua keskiarvoa. Mittaustulokset on saatu viiden minuutin välein.

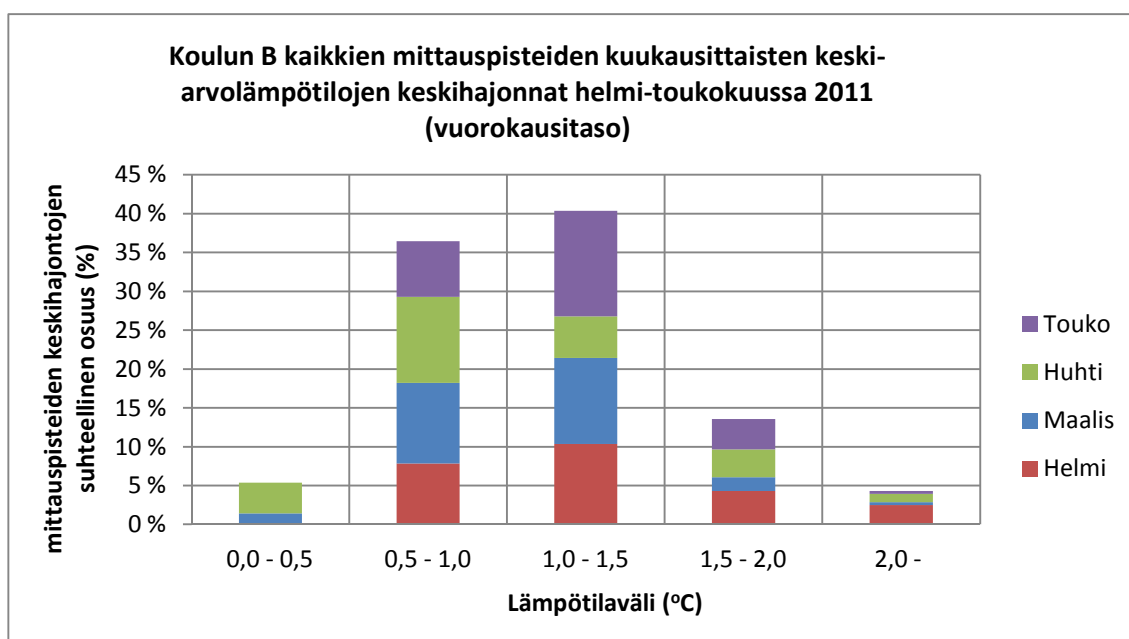


Kuva 7.8. Koulun B eri tilojen lämpötilojen vaihtelu tiloittain helmi- ja toukokuussa 2011 (arkisin klo 8-16). Sininen on helmikuu ja punainen toukokuu. Lisäksi käyrillä on painotettu keskiarvo lämpötilojen mukaan.

Kuvasta 7.8 nähdään, että tilojen lämpötilojen vaihtelu on huomattavasti samansuuntaisempaa helmi- ja toukokuussa verrattuna koulun A mittaustuloksiin. Tosin helmikuussa on luonnollisesti enemmän kylmiä lämpötiloja kuin toukokuussa. Lämpötilat ovat sekä helmi- että toukokuussa pääosin välillä 21–24 °C. Kuvassa 7.9 on esitetty koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen jakauma helmi-toukokuussa 2011. Kuvan 7.8 arvoissa on otettu kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset huomioon laskettaessa kuukausikeskiarvoja. Kuvassa 7.10 on esitetty koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat helmikuusta toukokuuhun.



Kuva 7.9. Koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen jakauma tammi-toukokuussa 2011 (otettu huomioon kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset laskettaessa kuukausikeskiarvoja).

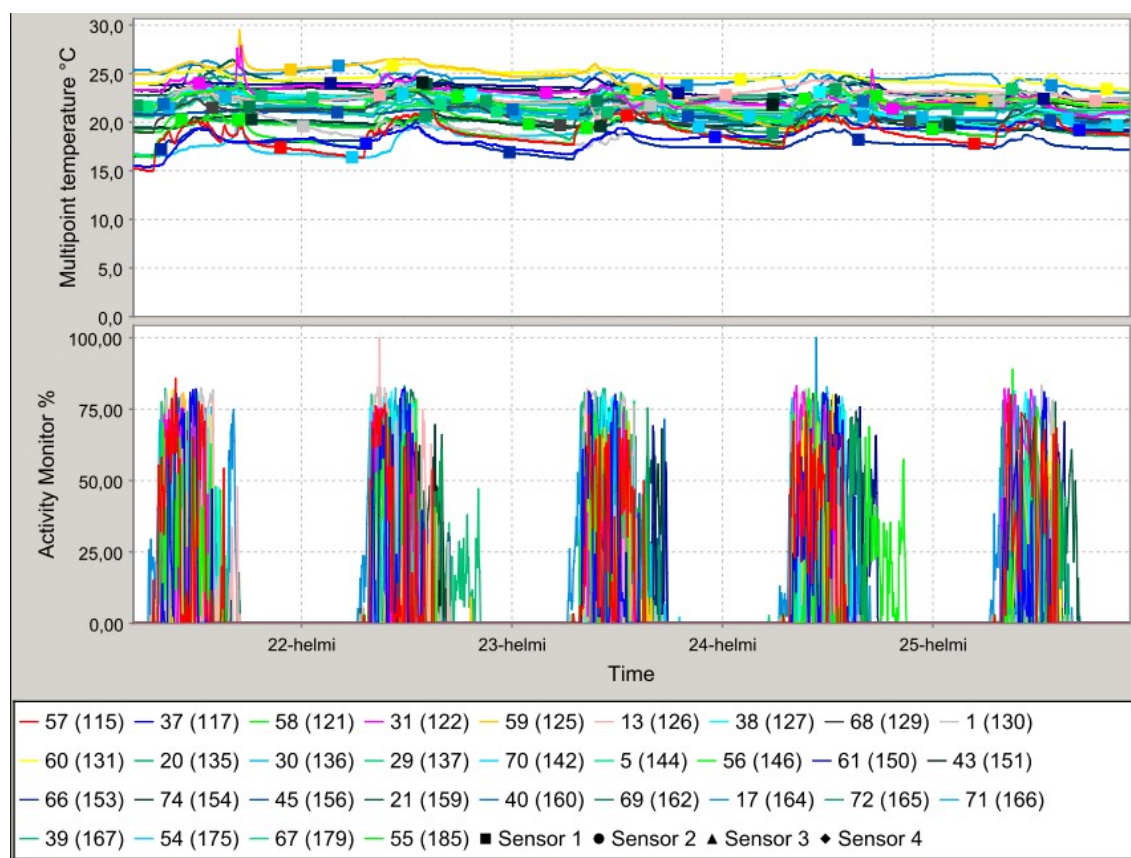


Kuva 7.10. Koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat tammi-toukokuussa 2011 (otettu huomioon kuukauden jokaisen vuorokauden kaikki mittaustulokset laskettaessa kuukausikeskiarvoja).

Kuvasta 7.9 nähdään, että lähes 80 % mittauspisteiden tammi-toukokuun kuukausittaisista keskiarvolämpötiloista on ollut välillä 21–24 °C. Kuukausittaisten keskiarvolämpötilojen keskihajonnat ovat kuvan 7.10 mukaan olleet pääasiassa välillä 0,5–1,5 °C. Suurempia keskihajontoja on kuitenkin selkeästi enemmän kuin koulun A osalta. Liitteessä 9 on vielä esitettyä koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimi- ja maksimiarvot. Liitteen 9 kuvasta L9.2 nähdään, että lämpötilojen maksimiarvot

koulun B tiloissa ovat olleet suhteellisen korkeita mittausjakson aikana. Eniten kuvassa L9.2 pistää silmään se, että kuukausittaiset maksimilämpötilat ovat olleet melko korkeita lämmityskaudella helmikuusta huhtikuuhun. Selittäväksi tekijäksi löytyi lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilan virheellinen ohjaus ja toimimattomat termostaattiset patteriventtiilit. Maalis-huhtikuussa lämmityspattereiden tehot olivat samassa säätöasennossa kuin helmikuun kovien pakkasten aikaan siihen asti kunnes, kiinteistöhoitaja tuli säätämään lämpöjä pienemmäksi huhtikuun lopulla. Tämän seurauksena koulun B tiloissa oli erityisesti huhtikuussa hyvin korkeita lämpötiloja. Käyttäjät ovat pyrkineet pienentämään korkeita sisälämpötiloja lisääntyneellä tuuletusräppänoiden käytöllä, joka on entisestään lisännyt lämmönkulutusta.

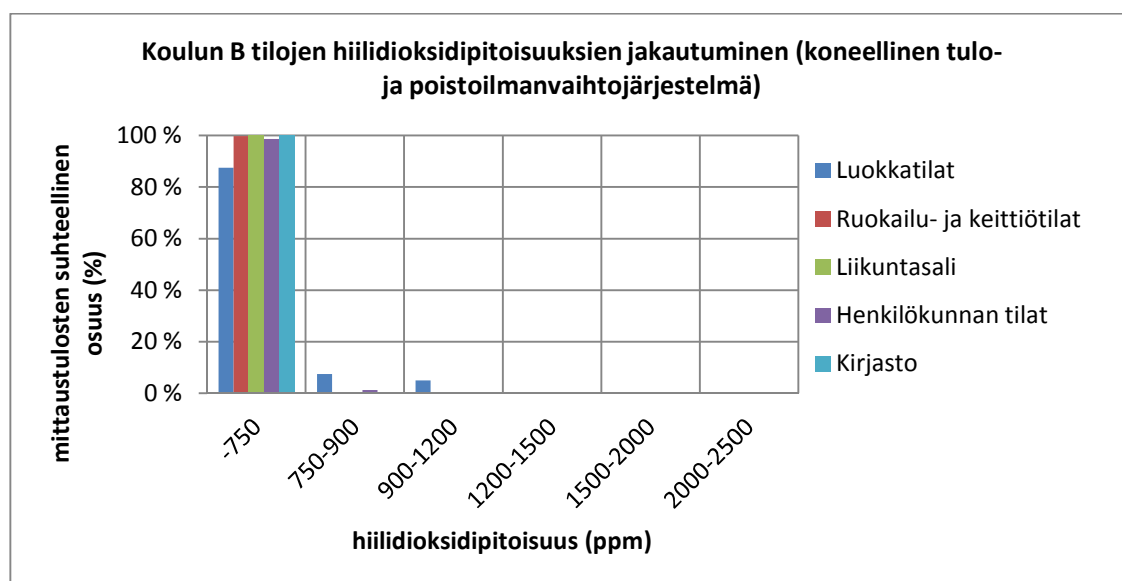
Alla olevassa kuvassa 7.11 on vielä esitettyä lämpötilojen ja aktiviteetin (liikkeentunnistusanturi) vaihtelua yhdeltä helmikuun viikolta kaikissa koulun B luokkatiloissa. Luokkatilojen numerointi on esitettyä kuvan alla ja suluissa on mittalaitteen tunnistenumero. Liitteessä 2 on esitettyä koulun B numeroidut pohjapiirustukset. Kuvasta 7.11 nähdään, että lämpötilojen hajonta on suurempaa kuin koulussa A (kuva 7.4). Lisäksi koulussa B on suhteellisen paljon melko lämpimiä tiloja, varsinkin kun otetaan huomioon, että kyseessä on helmikuu eli talven 2011 kylmin kuukausi. Käyttöasteen lämpötilaa nostava vaikutus käy myös hyvin ilmi kuvasta 7.11.



Kuva 7.11. Koulun B luokkatilojen lämpötilojen ja aktiviteetin (liikkeentunnistusanturi) vaihtelua aikavälillä 21.2.2011 klo 8-25.2.2011 klo 16.

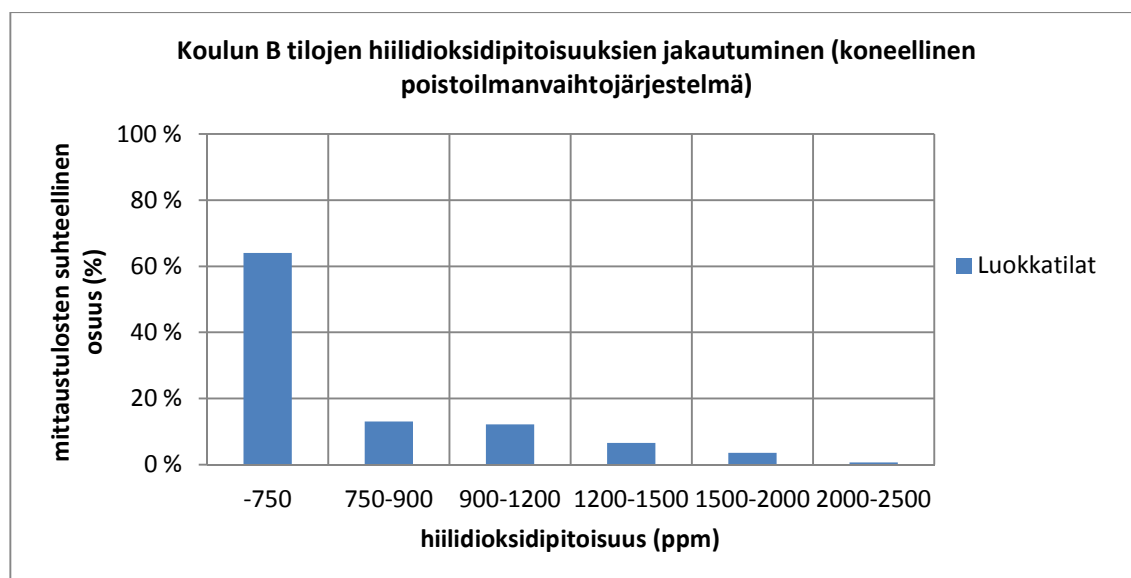
7.2.2. Ilmanlaatu

Kuten edellisessä luvussa jo mainittiin, niin koulussa B oli sisäilmasto-ongelmia tehdyn sisäilmastokyselyn perusteella (Sahakari 2011). Tätä ovat tukeneet myös tehdyt mittaukset. Ongelmia ilmaantui pääasiassa koneellisen poistoilmanvaihdon alueella ja sielläkin erityisesti kolmannen kerroksen luokkatiloissa. Koulun B osalta hiilidioksidipitoisuuksien jakautuminen on esitetty erikseen koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän sekä koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän osalta. Kuvissa 7.12 ja 7.13 on esitetty mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelua koulun B eri tiloissa. Pystyakselilla on jälleen esitettynä alueelle kuuluvien mittaustulosten suhteellinen osuus prosentteina. Mittaustulokset on huomioitu vain arkipäiviltä aikaväliltä klo 8-16.



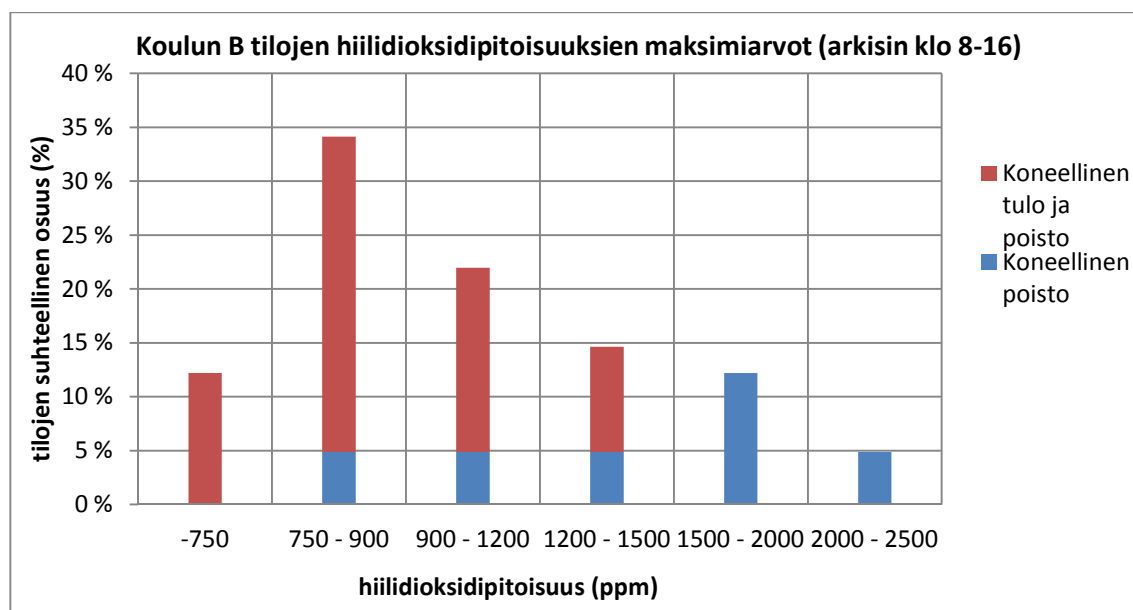
Kuva 7.12. Koulun B koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän tilojen hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelu (arkisin klo 8-16).

Kuvasta 7.12 nähdään, että koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella ilman laatuun liittyviä ongelmia ei juuri esiinny. Lähes kaikki hiilidioksidipitoisuudet olivat mittausaikana alle 750 ppm. Luokkatilojen osalta hiilidioksidipitoisuus ylitti rakentamismääräyskokoelmassa olevan raja-arvon 1200 ppm muutaman kerran. On kuitenkin huomioitava, että tilat ovat olleet käytössä pääosin välillä klo 8-14, mutta mittaustulokset on analysoitu aikavälille klo 8-16.



Kuva 7.13. Koulun B koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän tilojen hiilidioksidipitoisuuksien vaihtelu (arkisin klo 8-16).

Kuvasta 7.13 nähdään, että koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella raja-arvot ylittyvät useammin. Kuvassa 7.14 on vielä esitettyä koulun A tilojen hiilidioksidipitoisuuksien maksimien jakautuminen jaettuna koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmään sekä koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään.



Kuva 7.14. Koulun B tilojen hiilidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot (arkisin klo 8-16).

Kuvasta 7.14 nähdään, että koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella hiilidioksidipitoisuuden maksimi-arvot ovat suurempia. Mitatuista tiloista 5 % saavuttaa jopa yli 2000 ppm maksimi-arvon. Sisäilmaongelmat keskittyivät erityisesti koulun kolmannen kerroksen tiloissa 54–60 (liite 2), joissa on koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä. Korkeiden hiilidioksidipitoisuuksien syyksi selvisi, että kyseisten tilojen koneel-

lisen poistoilmanvaihdon huippuimuri oli ollut pois toiminnasta noin kymmenen vuotta. Tilojen ilmanvaihto oli siis toiminut painovoimaisena. Koulun kiinteistönhoitajalla, vahtimestarilla eikä käyttäjillä ollut tietoisia kyseisestä huippuimurista. Huippuimuri oli jäänyt laajennuksen yhteydessä manuaalikäyttöiseksi ja sen käyttökytkin sijaitti muualla kuin muiden huippuimureiden. Käyttäjät ovat valittaneet usean vuoden ajan tilojen huonoa ilmanlaatua, mutta palautteeseen ei ole kiinnitetty tarpeeksi huomiota kiinteistönhoitajien ja kunnan teknisen johdon osalta. Huonon ilmanlaadun johdosta koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella olevien tilojen tuuletusräppänoitä oli jätetty auki jopa yöksi. Tämä on vaikuttanut myös omalta osaltaan koulun B suureen lämmönkuluutukseen.

Alla on vielä esitettyä kuva hiilidioksidipitoisuuden vaihtelusta yhdessä ongelmallisen alueen eli koulun B kolmannen kerroksen koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella olevasta luokkatilasta. Siitä nähdään, että hiilidioksidipitoisuus ylittää melko nopeasti, alle tunnissa, raja-arvot 1200 ppm ja 1500 ppm luokkatilassa. Mittausaikana tilan ilmanvaihtoa hoitava huippuimuri ei ollut päällä.



Kuva 7.15. Hiilidioksidipitoisuus koulun B luokkatilassa 57 aikavälillä 7.3.2011 – 8.3.2011 eli maanantaista tiistaihin.

7.2.3. Lämpökamerakuvaus

Koulun B ilmanpitävyyttä ei ole mitattu, mutta lämpökamerakuvausten perusteella koulussa havaittiin paljon vuotokohtia, jotka selittävät myös osaltaan koulun B suurta läm-

mönkulutusta. Vuotokohtia oli varsinkin ikkunoiden ja tuuletusräppäneiden saumoissa. Joissakin tuuletusräppäneissä ei ollut ollenkaan tiivisteitä tai tiivisteet olivat huonot ja jotkin tuuletusräppänet eivät menneet kunnolla kiinni. Kuvassa 7.16 on esimerkkinä lämpökamerakuvia koulun B tuuletusräppänen ja ikkunan saumojen lämpövuodoista sekä valokuva erään tuuletusräppänen huonosta tiivisteestä.



Kuva 7.16. Lämpökamerakuva koulun B erään luokkatilan tuuletusräppänestä ja valokuva tuuletusräppänen tiivisteistä sekä lämpökamerakuva koulun B ikkunan saumojen lämpövuodoista, 24.2.2011. Vasemmanpuoleisessa lämpökamerakuvassa on merkitty vaaleansinisellä ne kohdat, joissa lämpötila on alle 0°C .

Lämpökamerakuvauksissa kävi myös ilmi, että koulun liikuntasali on reilusti ylipaineinen ulkoilmaan nähden. Syyksi selvisi tilan selvästi alimitoitettu poistoilmavaihto. Tilassa on kaksi suurta tuloilmakonetta ja kaksi pientä huippuimuria. Tilan ylipaineisuus aiheuttaa talvella kondenssiriskin seinärakenteisiin.

7.2.4. Ilmanvaihtokanavien ja –venttiilien ilmavirtojen mittaus

Koulun B kokonaisilmavirtoja määritettäessä pyrittiin mittaamaan jokaisen yksittäisen tuloilmakoneen ilmavirrat. Koneellisen poistoilmavaihtojärjestelmän tuloilmavirtoja arvioitiin mitattujen yksittäisten poistoilmaventtiileiden ilmavirtojen perusteella. Taulukossa 7.6 on esitettyä koulun B tuloilmakoneiden, ilmanvaihtokoneen ja huippuimureiden vaikutusalueet ja käyntiajat. Taulukon arvoissa on huomioitu myös vuosia poissa käytössä ollut huippuimuri, jonka ilmavirrat voitiin mitata sen käyttökytkimen löytyminen jälkeen. Ilmanvaihtuvuutta laskettaessa kyseinen huippuimuri on jätetty huomioida. Sillä ei ole kuitenkaan juuri vaikutusta lopputulokseen, koska sen ilmavirta on kokonaisuuden kannalta suhteellisen pieni.

Taulukossa 7.6 esitetyt liikuntasalin tuloilmakoneet TK01 ja TK1 olivat normaalien käyntiaikojen vastaisesti helmikuun 2011 lopusta huhtikuun loppuun asti päällä ympärivuorokautisesti. Liikuntasalin tuloilmakoneet oli asetettu käymään ympärivuorokautisesti helmikuun lopulla yksittäistä viikonloppua varten, koska kyseisessä tilassa oli yöpyjiä viikonlopun ajan. Kyseisen viikonlopun jälkeen kohteeseen tuli töihin uusi kiinteistöhoitaja, eikä edellinen kiinteistöhoitaja ollut huomannut mainita asiaa tehtävänluovutuksen yhteydessä. Tehtyä toimenpidettä ei ollut myöskään kirjattu ylös mihinkään eikä kohteessa ole rakennusautomaatiojärjestelmää, mistä asia olisi voinut näkyä. Asia

selvisi vasta huhtikuun loppupuolella, jolloin kiinteistöhoitaja muutti tuloilmakoneiden käyntiajat oikeiksi. Suurelta osin tästä johtuen myöhemmin esiteltävät koulun B mittausjakson maalisi- ja huhtikuun lämmönkulutukset ovat suurempia kuin tammi- ja helmikuussa, vaikka kuukautinen keskilämpötila on tammi- ja helmikuussa kylmempi. Ilmanvaihtokoneiden käyttö näkyy myös selkeästi sähkönkulutuksessa. Tosin maalisi- ja huhtikuun suuriin lämmönkulutuksiin on varmasti vaikuttanut myös virheellinen menoveden lämpötilan säätö, toimimattomat termostaattiventtiilit ja joidenkin tilojen huonosta ilmanlaadusta seurannut ahkera tuuletusräppäneiden käyttö.

Taulukko 7.6. Koulun B tuloilmakoneiden, ilmanvaihtokoneen ja huippuimureiden vaikutusalueet (tilojen numeroinnit liitteessä 2) ja käyntiajat.

Tuloilmakone /ilmanvaihtokone /huippuimuri	Vaikutusalue	Käyntiajat arkisin ⁽¹⁾	Lisätietoja
TK01 (TK-4)	liikuntasali länsi	7.00–18.00	ajastinkytkin muuna aikana ma-pe klo 18–21 ja la-su klo 11–16
TK1	liikuntasali itä	7.00–18.00	ajastinkytkin muuna aikana ma-pe klo 18–21 ja la-su klo 11–16
TK2	luokat uusi puoli (itä)	6.00–15.00 ⁽²⁾	-
TK3	ruokala	6.00–15.00 ⁽²⁾	-
Kirjaston TK	kirjasto	? ⁽³⁾	käyntiaikaa ei saatu selville
Allergialuokan iv-kone	allergialuokka (tila 13)	6.00–15.00 ^{(2), (3)}	ainoa koulun ilmanvaihtokone lämmön talteenotolla, käyntiaikaa ei saatu selville
Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, huippuimurit ⁽⁴⁾	luokat vanha puoli (länsi)	6.00–15.00	yksi huippuimuri manuaalikäyttöinen, jonka koulun vahtimestari kytkee päälle tullessaan töihin

⁽¹⁾käyntiajat katsottu ilmanvaihtokoneiden kyljissä olevista lapuista
⁽²⁾puoliteholla aikavälillä klo 6.00–8.00
⁽³⁾kirjaston ja allergialuokan koneiden käyntiaikoja ei saatu selville, mutta allergialuokan ilmanvaihtokoneen käyntiaika arvioitu samaksi kuin muiden luokahuoneiden
⁽⁴⁾koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän yksittäisten poistoilmaventtiilien mittauksilla on pyritty arvioimaan rakennukseen myös sisään tulevan korvausilman määrää

Taulukossa 7.7 on esitetty koulun B tulo- ja poistoilmavirrat painotettuna käyntiajoilla siten, että on huomioitu tuloilmakoneen mahdolliset eri tehoalueella toimivat käyntiajat. Tuloilmakoneiden, ilmanvaihtokoneen ja yksittäisten koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän poistoilmaventtiilien ilmavirrat on laskettu yhtälöiden (17)–(20) avulla. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän osalta ikkunoiden yläpuolella olevien rakojen kautta sisään tuleva tuloilmavirta on arvioitu 10 % pienemmäksi kuin koneellinen poistoilmavirta. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella toimivien poistoilmakoneiden ja huippuimureiden poistoilmavirroiksi on arvioitu 5 % tuloilmakoneiden ilmavirtoja suuremmat ilmavirrat liikuntasalia lukuun ottamatta. Liikuntasali on selkeästi ylipaineinen tehtyjen tutkimusten perusteella, jolloin sinne tulee enemmän tuloilmaa kuin poistuu. Näin ollen sen osalta on arvioitu tuloilmavirran olevan 5 % suurempaa kuin poistoilmavirran.

Taulukko 7.7. Koulun B käyntiaikojen tehoalueilla painotetut ilmavirrat.

Tuloilmakone/ilmanvaihtokone/huippuimuri	Tuloilmavirta, q (dm ³ /s)	Poistoilmavirta, q (dm ³ /s)
TK01(TK-4) + HI ⁽¹⁾	1 422	1 351
TK1 + HI ⁽¹⁾	998	948
TK2 + PK/HI ⁽²⁾	1 467	1 540
TK3 + PK/HI ⁽²⁾	622	653
Allergialuokan iv-kone ⁽³⁾	131	123
Kirjaston TK + PK ⁽²⁾	143	150
Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, korvausilma/HI ⁽⁴⁾	911	1 012
Summa	5 694	5 778

⁽¹⁾liikuntasali oli selkeästi ylipaineinen tehtyjen lämpökamerakuvausten perusteella, joten liikuntasalin huippuimureiden poistoilmavirran on arvioitu olevan 5 % pienempi kuin tuloilmakoneiden tuloilmavirta
⁽²⁾luokkien ja ruokalan poistoilmakoneiden ja huippuimureiden ilmavirtoja ei ole mitattu, mutta niiden ilmavirrat on arvioitu 5 % suuremmiksi kuin tuloilmakoneiden tuloilmavirrat
⁽³⁾allergialuokan ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmavirta ovat mitattuja arvoja
⁽⁴⁾koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella tuloilmavirta eli ikkunoiden yläpuolella olevien rakojen kautta tuleva korvausilma on arvioitu 5 % poistoilmavirtaa pienemmäksi

Koulun A kokonaistuloilmavirraksi saadaan taulukon 7.7 mukaan 5 694 dm³/s ja poistoilmavirraksi 5 778 l/s. Laitteiden keskimääräinen käyntiaika on 11,7 h eli hiukan yli tunti enemmän kuin koulussa A. Koulun B koneelliseksi ilmanvaihtuvuudeksi saadaan poistoilmavirtaukselle 1,1 1/h yhtälön (12) avulla, kun jätetään vuotoilmavirta ja vuosikautia pois päältä ollut huippuimuri huomioimatta sekä käytetään rakennuksen ilmatilavuutta 18 677 m³.

Koulussa A esiintyvät ilmavirrat ovat melko suuria, mutta ainoastaan yhdessä luokkakohtaisessa ilmanvaihtokoneessa on poistoilman lämmön talteenotto. Tuloilman lämmitys tuloilmakoneilla hoidetaan siis pääosin kaukolämmön avulla ulkoilman lämpötilasta sisäänpuhalluslämpötilaan. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella korvausilman lämmitys hoidetaan tilojen lämmityksen kautta. Puutteellinen poistoilman lämmön talteenotto on merkittävä selittävä tekijä koulun B suureen lämmönkulutukseen.

7.2.5. Suureen lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät

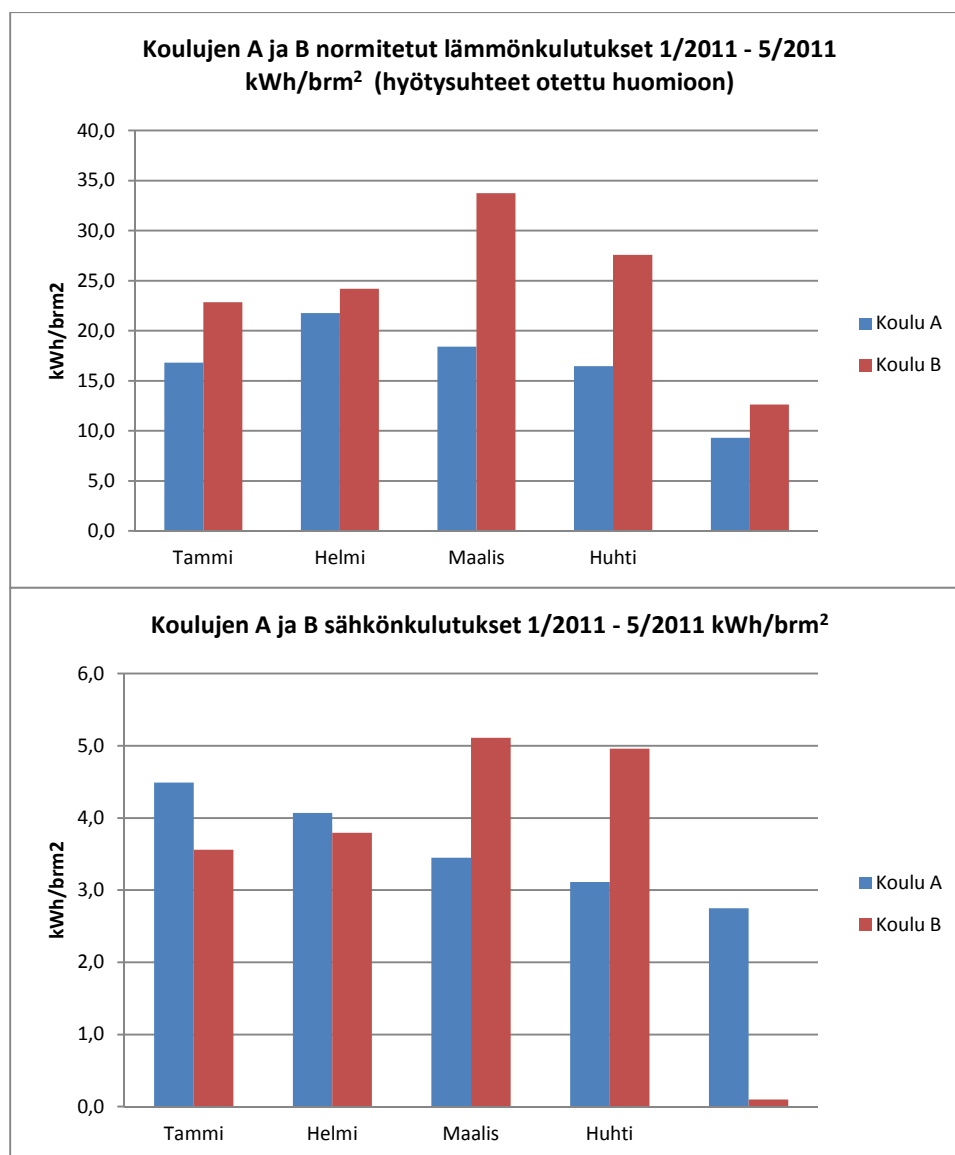
Tehtyjen mittausten, seurannan ja kyselyjen perusteella on yritetty etsiä yksityiskohtaisia selittäviä tekijöitä koulun B suureen lämmönkulutukseen. Alla olevaan taulukkoon 7.8 on koottu lämmönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä, joita on analysoitu tarkemmin luvussa 7.3. Taulukkoon 7.8 on koottu myös kiinteistöhoitoon ja käyttäjiin liittyviä asioita, jotka ovat selvinneet koulun B tarkemman mittauksen ja seurannan aikana. Taulukossa on viitattu myös sisäilmastokyselyyn, joka teetettiin koulun A henkilökunnalle (Sahakari 2011).

Taulukko 7.8. Koulun B lämmönkulutukseen vaikuttavia tekijöitä.

Mikä	Millainen	Lisätietoja
Lämmöneristys		
Alapohja	$U_{ap} = 0,13 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,16 \text{ W/Km}^2$	laskennallinen
Yläpohja	$U_{yp} = 0,18 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,09 \text{ W/Km}^2$	laskennallinen
Ulkoseinät ⁽¹⁾	$U_{us} = 0,30 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,17 \text{ W/Km}^2$	laskennallinen, keskimääräinen
Ovet ja ikkunat ⁽²⁾	$U_{ovet} = U_{ikkunat} = 2,55 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $1,0 \text{ W/Km}^2$, ikkunoita 18 % julkisivualasta	arvioitu
Ilmanpitävyys	paljon vuotokohtia	lämpökamerakuvaus
Ilmanvaihtojärjestelmä	vanha puoli: koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, uusi puoli: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä	5 tuloilmakonetta, 1 tulo/poistokone, 2 poistokonetta, useita huippuimureita
Ilmanvaihdon riittävyys	sisäilmastokyselyn mukaan huono ilmanvaihto varsinkin vanhalla puolella, ilmanvaihtuvuus 1,1 1/h	sisäilmastokysely ja mittaukset
Poistoilman lämmön talteenotto ja sen hyötysuhde ⁽¹⁾	vain yhdessä luokkakohtaisessa iv-koneessa LTO	ei mitattu, merkityksetön kokonaisuuden kannalta
Tuloilman jälkilämmitys	kaukolämmöllä	suurentaa lämmönkulutusta
Lämmitysjärjestelmä	kaukolämpö vesipattereilla	lämmönvaihtimet uusittu vuosina 2000–2001, lämmönsäätökäyrässä vikaa, monet termostaattiset patteriventtiilit viallisia
Tilojen käyttöaika	luokkatilat pääosin klo 8-14, liikuntatilat ma-pe klo -21 + la-su 11–16, muissa tiloissa jonkin verran iltakäyttöä	kysely käyttäjiltä
Kiinteistönhoito	kiertävä (14 kohdetta), ei tunne kohdetaan hyvin	kiinteistönhoitaja vaihtui helmikuun 2011 lopussa
Käyttäjät	käytetty ikkunatuuletusta huonon ilmanlaadun ja korkeiden sisälämpötilojen johdosta	sisäilmastokysely ja paikan päällä käynti
Lämpötilaolosuhteet	kuumia/vetoisia ja lämpötilaltaan vaihtelevia tiloja	mittaukset ja sisäilmastokysely
Ilman laatu	korkeita hiilidioksidipitoisuuksia varsinkin koulun vanhalla puolella	mittaukset ja sisäilmastokysely
⁽¹⁾ osa ulkoseinästä maanvastaista, laskettu keskimääräinen U-arvo		
⁽²⁾ vanhan ja uuden puolen ikkunat kaksilasisia, mutta uudella puolella toinen lasi on eristyslasi		

7.3. Suurimmat erottavat tekijät koulujen välillä

Tässä luvussa on tarkoitus käydä läpi suurimpia erottavia tekijöitä koulun A ja B välillä, mitkä selittävät kulutuseroja erityisesti kyseisten koulujen lämmönkulutusten välillä. Kuvassa 7.17 on esitettyä koulun A ja B kuukausitasolla normitetut lämmönkulutukset sekä kyseisten koulujen sähkönkulutukset mittausjaksolta 1/2011-5/2011. Koulu A ja B sijaitsevat eri kunnissa, mutta saman vertailupaikkakunnan alueella, johon myös normitus on tehty. Lämmöntuottojärjestelmien hyötysuhteet on myös otettu huomioon taulukon 2.7 mukaisesti. Koulun B toukokuun sähkönkulutus on kuvassa virheellinen.



Kuva 7.17. Koulujen A ja B lämmön- ja sähkönkulutus mittausjaksolta 1/2011-5/2011 (lämmönkulutukset normitettu ja on huomioitu myös lämmöntuottojärjestelmien hyötysuhteet).

Kuvassa 7.17 näkyy hyvin koulun B poikkeuksellisen suuri lämmön- ja sähkönkulutus maaliskuussa. Suurentuneisiin lämmönkulutuksiin on vaikuttanut ympäristöolosuhteista helmikuun lopusta huhtikuun loppuun päällä olleet liikuntasalin ilmanvaihtokoneet sekä ulkolämpötilan mukaan tapahtuvan menoveden lämpötilan virheellinen ohjaus. Koulun B lämmön- ja sähkönkulutuksen trendin pitäisi olla samantyyppinen kuin koulun A mittausjaksolla tammikuusta toukokuuhun. Alla olevaan taulukkoon 7.9 on koottu pienen/suuren lämmönkulutuksen kannalta merkittäviä eroja kouluissa A ja B. Pienen lämmönkulutukseen vaikuttavat syyt on merkitty vihreällä ja suureen lämmönkulutukseen vaikuttavat syyt punaisella.

Taulukko 7.9. Pienen/suuren lämmönkulutuksen kannalta merkittäviä eroja kouluissa A ja B (pieneen lämmönkulutukseen vaikuttavat syyt merkitty vihreällä ja suureen lämmönkulutukseen vaikuttavat syyt punaisella).

Mikä	Koulu A	Koulu B
Lämmöneristys		
Alapohja	$U_{ap} = 0,12 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,16 \text{ W/Km}^2$	$U_{ap} = 0,13 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,16 \text{ W/Km}^2$
Yläpohja	$U_{yp} = 0,52 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,09 \text{ W/Km}^2$	$U_{yp} = 0,18 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,09 \text{ W/Km}^2$
Ulkoseinät	$U_{us} = 0,91 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,17 \text{ W/Km}^2$	$U_{us} = 0,30 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $0,17 \text{ W/Km}^2$
Ovet ja ikkunat	$U_{ovet} = U_{ikkunat} = 2,00 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $1,0 \text{ W/Km}^2$, ikkunoita 18 % julkisivualasta	$U_{ovet} = U_{ikkunat} = 2,55 \text{ W/Km}^2$ D3 2011: $1,0 \text{ W/Km}^2$, ikkunoita 27 % julkisivualasta
Ilmanpitävyys	$n_{50} = 1,8 \text{ l/h}$, $q_{50} = 4,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ D3 2008: $n_{50} = 2,0 \text{ l/h}$; D3 2011: $q_{50} = 2,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, vertailuarvo	paljon vuotokohtia
Ilmanvaihtojärjestelmä	koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto	vanha puoli: koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, uusi puoli: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä
Ilmanvaihdon riittävyys	sisäilmastokyselyn mukaan riittävä ilmanvaihto	sisäilmastokyselyn mukaan huono ilmanvaihto varsinkin vanhalla puolella
Poistoilman lämmön talteenotto ja sen hyötysuhde ⁽¹⁾	kaikissa iv-koneissa LTO, hyötysuhde keskimäärin 53 % (tuloilma), vaihteluväli 49–75 %	vain yhdessä luokkakohtaisessa iv-koneella LTO
Tuloilman jälkilämmitys	sähköpatteri	kaukolämpö
Lämmitysjärjestelmä	öljykattila vesipattereilla	kaukolämpö vesipattereilla, lämmönsäätökäyrässä vikaa, monet termostaattiventtiilit viallisia
Tilojen käyttöaika	pääosin klo 8-14, liikuntasalissa iltakäyttöä muutamana iltana viikossa	luokkatilat pääosin klo 8-14, liikuntatilat ma-pe klo -21 + la-su 11–16, muissa tiloissa jonkin verran iltakäyttöä
Kiinteistönhoito	kiertävä, tuntee kohteensa hyvin, käy paikalla säännöllisesti ja pyrkii hoitamaan työnsä hyvin	kiertävä (14 kohdetta), ei tunne kohdettaan hyvin
Käyttäjät	muutaman tilan osalta käytetään ikkunatuuletusta	usean tilan osalta käytetty ikkunatuuletusta huonon ilmanlaadun johdosta
Lämpötilaolosuhteet	paikoitellen melko viileitä lämpötiloja lämmityskaudella	kuumia/vetoisia ja lämpötilaltaan vaihtelevia tiloja
Ilman laatu	ei suuria puutteita mittausten ja kyselyjen perusteella	korkeita hiilidioksidipitoisuuksia varsinkin koulun vanhalla puolella

Taulukosta 7.9 nähdään, että lämmöneristävydestä ei löydetä selkeätä syytä pieneen tai suureen lämmönkulutukseen. Koulun B osalta jotkin rakenteet ovat laskennalliselta U-arvolta jopa parempia kuin koulussa A. Tosin koulun B osalta ikkunoiden osuus julkisivualasta on suurempi kuin koulussa A. Ikkunoiden U-arvo on rakenteista

huonoin, jolloin sen merkitys myös korostuu. Ilmanpitävyyden osalta löydetään selkeä ero poikkeaviin lämmönkulutuksiin. Koulun A ilmanpitävyys on erinomainen, sillä mitattu ilmanvuotoluku n_{50} on parempi kuin voimassa olevien rakentamismääräysten laskennassa käytettävä vertailuarvo (D3 2008, s.11). Koulussa B ei suoritettu ilmanpitävyyssmittauksia, mutta lämpökamerakuvauksilla todettiin koulussa olevan paljon vuoto-kohtia etenkin ikkunoiden ja tuuletusräppänöiden saumojen kautta.

Taloteknisten järjestelmien osalta on myös eroja koulujen välillä. Koulussa A on kaikissa ilmanvaihtokoneissa poistoilman lämmön talteenotto. Koulussa B ei lämmön talteenottoa ole kuin yhdessä luokkakohtaisessa ilmanvaihtokoneessa. Ilmanvaihto on siellä toteutettu pääosin erillisillä tulo- ja poistoilmakoneilla sekä huippuimureilla. Lisäksi koulussa B tuloilman lämmitys hoidetaan kokonaan kaukolämmöllä. Koulussa A tuloilman jälkilämmityksessä käytetään sähköpattereita, joka vähentää öljylämmityksen tarvetta kohteessa. Ilmanvaihdon osalta koulun B lämmönkulutusta on lisäksi nostanut jo mainittu liikuntasalin ilmanvaihtokoneiden ympärivuotokautinen käyttöaika helmikuun lopusta huhtikuun loppuun.

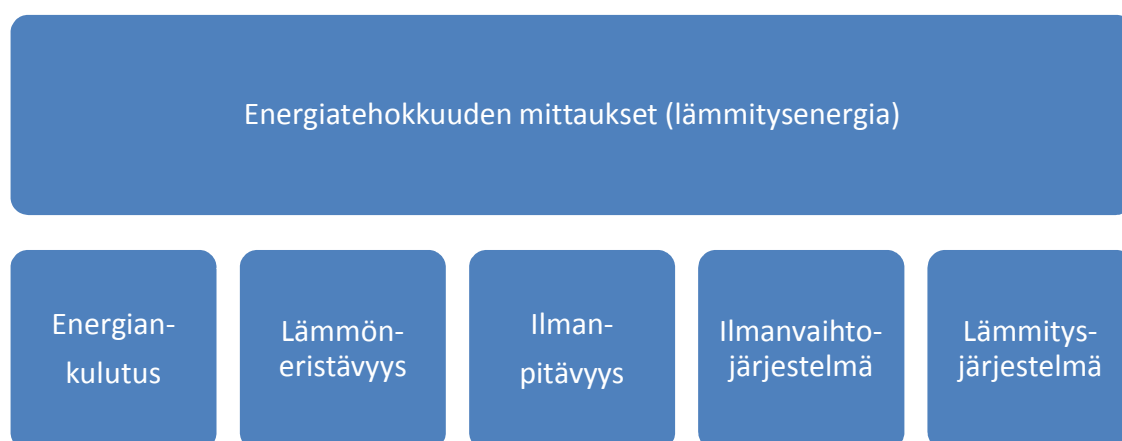
Lämmönjako molemmissa kohteissa hoidetaan vesipattereiden avulla. Koulun B lämmitysjärjestelmässä on kuitenkin joitakin lämmönkulutukseen vaikuttavia vikoja. Ulkoilman lämpötilan mukaan säätyvä vesipattereiden menoveden lämpötilan säätö ei ole toiminut koulussa B, sillä maaliskuussa patteritehot olivat samat kuin helmikuun kovien pakkasten aikaan. Näinä kuukausina sisälämpötilat olivat monissa tiloissa hyvin korkeita lisäten ikkunatuuletusta ja lämmönkulutusta. Monet termostaattisista patteriventtiileistä ovat myös viallisia, joten silläkään asiaan ei ole voitu juuri vaikuttaa.

Tilojen käyttöajan osalta koulu B on huomattavasti suuremmalla käyttöasteella nostaen sen lämmönkulutusta. Koulussa A ei taas ole juuri ilta- ja viikonloppukäyttöä. Yksi suurimmista koulujen A ja B erottavista tekijöistä näyttää kuitenkin olevan kiinteistönhoito. Jo vuonna 1965 koulujen lämmitykseen ja ilmanvaihtoon liittyvässä tutkimuksessa mainittiin, että ”koulujen lämmitys- ja iv-laitteiden käytössä ja kunnossa esiintyviä puutteita voitaisiin huomattavasti vähentää asianmukaisen huollon ja riittävän selväpiirteisten ja myös velvoittavien käyttöohjeiden avulla” (Tuomola & Siitonen 1965). Tämä asia ei ole miksikään muuttunut vuosien saatossa. Koulun B puutteellisen kiinteistönhoidon hyvänä esimerkkinä toimii koulun B kolmannen kerroksen vanhan puolen tilojen huono ilmanlaatu. Käyttäjät olivat valittaneet kyseisten tilojen ilmanlaadusta jo vuosia, mutta asiaan ei ole kunnolla paneuduttu. Mittausten aikana selvisi, että kyseisiä tiloja palvellut huippuimuri oli ollut poissa käytöstä noin kymmenen vuotta.

Koulun B kiinteistönhoidossa esiintyneet puutteet eivät ole ainoastaan kiinteistönhoitajan ammattitaidon syy. Kiinteistönhoitajan vastuualueella on 14 kiinteistöä ja hän sanoi työn olevan hyvin kiireistä. Liian pienien resurssien myötä kiinteistöissä ei ehditä tekemään muuta kuin pakollinen työ. Ennakoivaan huoltoon ja energiansäästöön liittyvät toimet eivät näin ollen ajan puutteen vuoksi ole tulleet kysymykseen. Rakennus on päästetty huonoon kuntoon, eikä käyttäjien palautteeseen tilojen lämpötiloista ja ilmanlaadusta ole suhtauduttu siihen kuuluvalla vakavuudella. Jos johto ei suhtaudu vakavasti asioihin, niin ei sitä voi odottaa alaisiltakaan.

8. MITTAUSJÄRJESTELY RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDEN JA SISÄILMASTON ARVIOINTIIN

Tässä luvussa on tarkoitus esitellä mittausjärjestely, jolla voidaan kohtalaisen hyvin analysoida koulurakennuksen energiatehokkuus ja sisäilmasto. Ehdotettua mittausjärjestelyä voidaan myös hyödyntää muissa julkisissa rakennuksissa. Kaiken lähtökohtana on pidetty sitä, että energiatehokkuus ei saisi mennä terveellisyyden edelle. Käyttäjille on taattava riittävät sisäilmaolosuhteet energiatehokkuudesta riippumatta. Hyvää mittausjärjestelyä on käsitelty sekä energiatehokkuuden ja sisäilmaston osalta. Kuvissa 8.1 ja 8.2 on esitetty, mihin osa-alueisiin energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittaukset voidaan jakaa. Energiatehokkuuden mittauksissa on painotettu erityisesti lämmitysenergian kulutusta.



Kuva 8.1. Energiatehokkuuden mittaukset osa-alueittain (lämmitysenergia painotettuna).



Kuva 8.2. Sisäilmaston mittaukset osa-alueittain.

Energiatehokkuuden mittaukset voidaan kuvan 8.1 mukaan jakaa viiteen eri pääalueeseen käsiteltäessä erityisesti lämmitysenergiaa. Ne ovat energiankulutus, lämmöneristävyys, ilmanpitävyys sekä ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmä. Kuvan 8.2 mukaisissa sisäilmaston mittauksien pääalueissa on ennen kaikkea huomioitu rakennuksen käyttäjille suunnattu sisäilmastokysely. Se on erittäin tehokas tapa selvittää koulurakennuksen sisäilmasto-ongelmat ja paikantaa ne tiettyihin tiloihin. Ongelmien paikantamisen jälkeen aletaan selvittää, mistä ongelma johtuu tehden tilanteesta riippuen lämpötiloihin, vetoon ja ilmanlaatuun liittyviä mittauksia sekä muita tarvittavia sisäilmamittauksia.

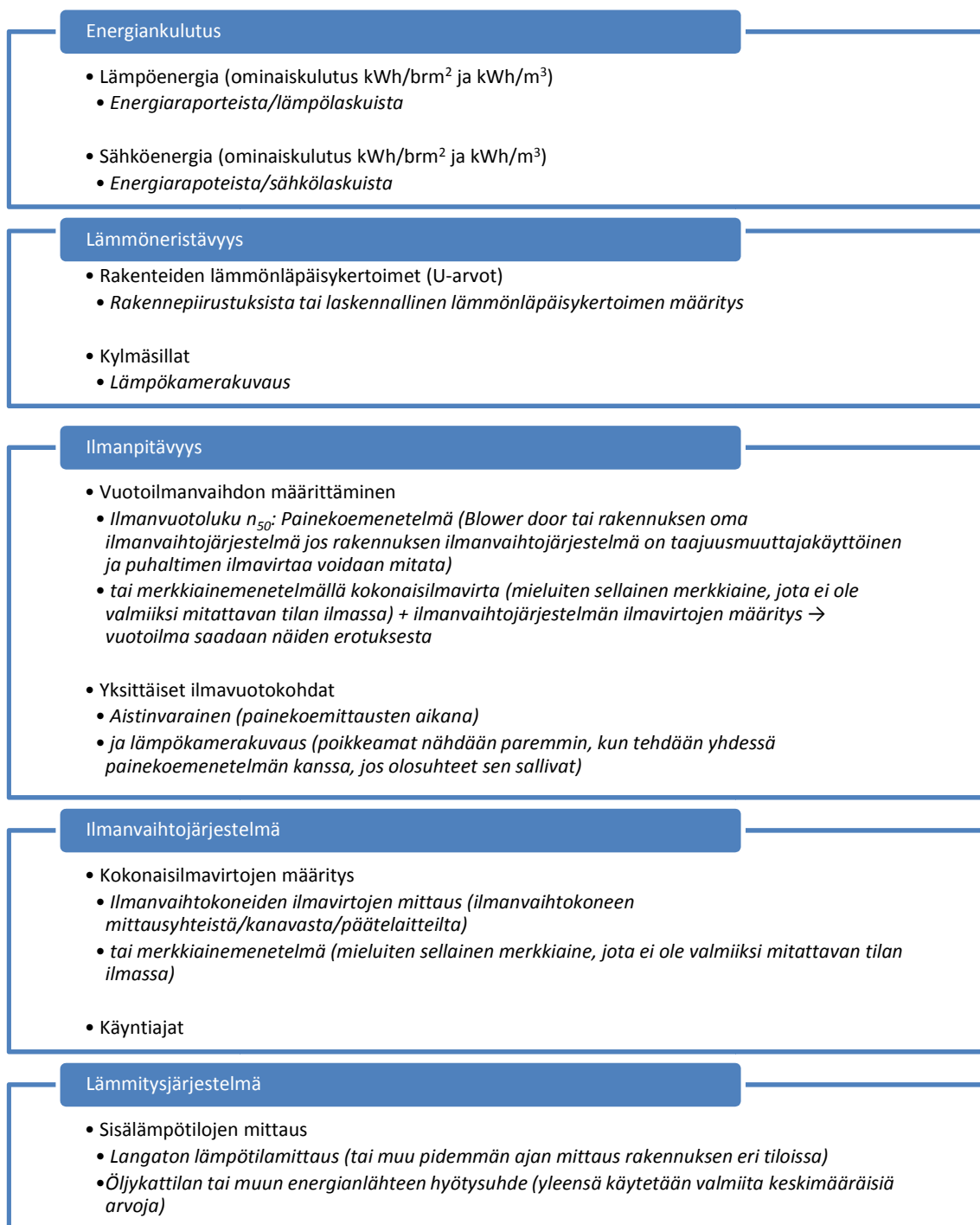
Kuvista 8.1 ja 8.2 nähdään, että energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksissa on paljon kiinnekohtia toisiinsa. Huono lämmöneristävyys ja ilmanpitävyys voivat aiheuttaa viileitä sisälämpötiloja ja vetoa. Huonosti säädetty lämmitysjärjestelmä voi taas aiheuttaa korkeita, kylmiä ja/tai vaihtelevia lämpötiloja. Puutteellinen ja alimitoitettu ilmanvaihto voi taas aiheuttaa sisäilmahaittoja huonontaan ilmanlaatua. Liian suureksi mitoitettu ilmanvaihto voi taas aiheuttaa vetoa. Nämä kaikki osatekijät heijastuvat edelleen energiankulutukseen.

Kuvien 8.1 ja 8.2 mukaisia energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksien osaluueita on avattu enemmän kuvissa 8.3 ja 8.4, missä on esitelty jokaiseen osa-alueeseen liittyviä mittausmenetelmiä. Käydään ensin läpi kuva 8.3. Rakennuksen ominaiskuluksista saadaan hyvä kuva siitä onko rakennus energiatehokas vai ei. Energiatehokkuusindikaattoreiden käytöstä esiintyvistä vääristymistä johtuen olisi hyvä käyttää molempia energiatehokkuusindikaattoreita kWh/brm² ja kWh/m³. Lämpö- ja sähköenergiankulutus saadaan tyyppillisesti energiaraporteista, mutta jos niitä ei ole niin kulutukset nähdään lämpö- ja energialaskuista. Kulutuksia vertailtaessa lämmönkulutus pitäisi normittaa.

Lämmöneristävyteen liittyvissä mittauksissa olisi selvitettävä rakennuksen rakenteiden lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot. Ilmanpitävyyden osalta olisi hyvä selvittää mittausten avulla rakennuksen vuotoilman suuruus. Paras menetelmä on painekoemenetelmä, joka voidaan tehdä joko rakennuksen ulko-oveen asennettavalla Blower door -laitteistolla tai rakennuksen omalla ilmanvaihtojärjestelmällä. Rakennuksen oman ilmanvaihtojärjestelmän käyttö edellyttää sitä, että puhaltimet olisivat taajuusmuuttajakäyttöisiä eli niiden ilmavirtaa voitaisiin muuttaa. Niiden on oltava myös mitattavia. Vuotoilmanvaihto voitaisiin määrittää myös merkkiainemenetelmällä, mutta tällöin olisi mitattava myös ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirta, koska menetelmä antaa kokonaisilmanvaihtuvuuden. Yksittäisiä vuotokohtia voidaan tarkastella aistinvaraisesti painekoemittausten aikana tai lämpökamerakuvauksella.

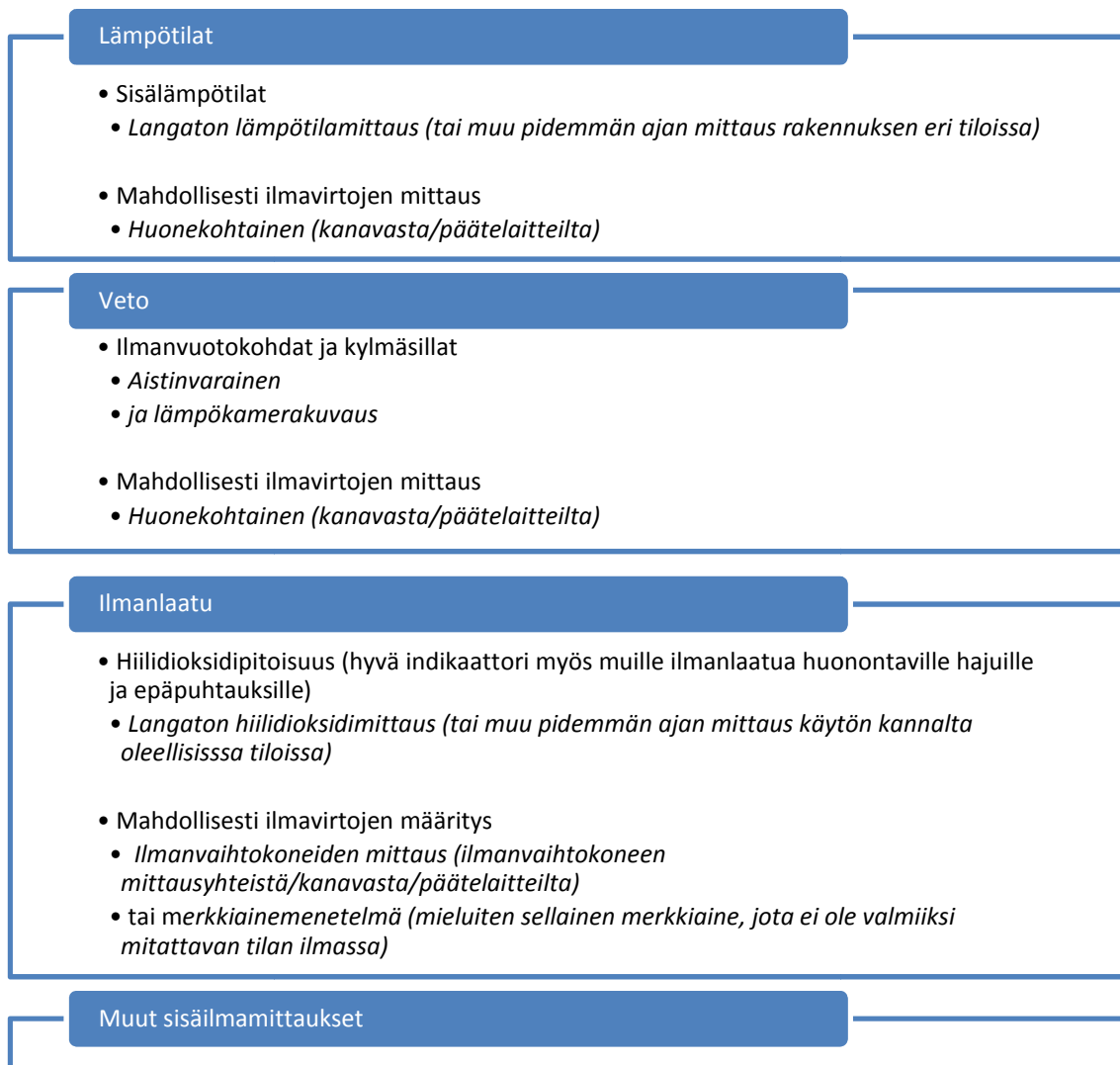
Ilmanvaihtojärjestelmän mittaukset voidaan selvittää joko jo mainitulla merkkiainemenetelmällä, jos tiedetään vuotoilmanvaihtuvuus tai määrittämällä ilmanvaihtokoneiden ilmavirrat ilmanvaihtokoneilta, -kanavista tai päätelaitteilta. Mitä suurempia kokonaisuuksia saadaan mitattua kerralla rakennuksen kokonaisilmavirtoja laskettaessa, sitä pienempi on mittausvirhe. Jos halutaan selvittää yksittäisten tilojen ilmavirtoja ja hakea sieltä säästöpotentiaalia, on ilmavirrat mitattava huonekohtaisesti kanavasta tai

päätelaitekohtaisesti. Kanavamittauksissa olisi hyvä käyttää mittausmenetelmänä viiden pisteen menetelmää. Yksittäisten päätelaitteiden mittaukset olisi taas paras mitata paineyhteillä ja käyttää valmistajien säätöoppaita, jos mahdollista. Lämmitysjärjestelmän osalta saadaan hyvä tuntuma lämmön säädön toiminnasta ja lämmönjaon tasaisuudesta mittaamalla sisälämpötiloja. Pitäisi myös huomioida lämmitysjärjestelmän hyötysuhde.



Kuva 8.3. Energiatieteiden mittausmenetelmiä kuvan 8.1 mukaisiin osa-alueisiin jaoteltuna.

Sisäilman mittausten osalta mittausjärjestelyehdotus on puutteellinen, sillä tässä diplomityössä tehdyt sisäilman mittaukset eivät ole olleet kovin laajoja. Sen johdosta neljäntenä sisäilman mittauksiin liittyvänä osa-alueena on mainittu muut sisäilmamittaukset, joka sisältää kaikki sisäilmamittaukset, joita ei ole mainittu. Ennen sisäilman mittauksia olisi hyvä tehdä edellä mainittu sisäilmastokysely, jonka jälkeen aletaan mitata ongelmatiloja, joissa on esiintynyt lämpötiloihin, vetoon ja/tai ilmanlaatuun liittyviä ongelmia. Lämpötilojen osalta olisi hyvä käyttää langatonta lämpötilojen mittausta, kuten energiatehokkuuden mittauksissa esitellyn lämmitysjärjestelmän toiminnankin osalta. Tässä työssä esitelty langaton mittausteknologia on osoittautunut hyväksi mittausmenetelmäksi, jos tarkoituksena on seurata lämpötilaolosuhteita yhtä aikaa useammassa eri tilassa. Samaan järjestelmään on hyvä kytkeä myös langaton hiilidioksidipitoisuuden mittausta, jolla voidaan mitata ilmanlaatua. Vetomittausten osalta voidaan käyttää aistinvaraista havainnointia ja/tai lämpökamerakuvausta. Jokaisen osa-alueen osalta on mainittu myös huonekohtainen ilmavirtojen määrittäminen, sillä ilmanvaihdolla on vaikutusta lämpötiloihin, vetoon ja ilmanlaatuun.



Kuva 8.4. Sisäilmaston mittausten menetelmiä kuvan 8.2 mukaisesti osa-alueisiin jaoteltuna.

9. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä on käsitelty energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittausmenetelmiä kahdessa eri koulurakennuksessa liittyen projektiin Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen. Energiatehokkuuden osalta on painotettu erityisesti lämmönkulutusta, koska projektiin liittyneessä esiselvityksessä varsinkin lämmönkulutuksessa on huomattu olevan suuri hajonta jopa saman rakennustyyppin sisällä rakennusvuodesta riippumatta (Kalema & Sahakari 2008). Sisäilmasto on myös keskeinen osa työtä, sillä energiatehokkuus ei saisi koskaan mennä ihmisten terveyden edelle. Koulut on valittu mittauksiin kolmen eri kunnan rakennuskannasta painottaen lämmönkulutusta ja yksinkertaista muotoa, jotta koulua olisi helppo mallintaa erilaisilla simulointimalleilla. Toinen mitatuista kouluista, koulu A, on omannut pienen lämmönkulutuksen ja toinen koulu eli koulu B on omannut suuren lämmönkulutuksen. Simulointimallit eivät ole kuitenkaan olleet osa tätä diplomityötä, vaan Erkka Harju-Säntin diplomityötä (Harju-Säntti 2011). Hän on mallintanut koulut A ja B diplomityössään sekä tarkastellut erilaisia energiansäästöinvestointeja ja niiden kannattavuuksia kyseisissä kouluissa.

Tämän työn tarkoituksen on ollut selvittää mistä johtuu mitattujen koulujen pieni/suuri lämmönkulutus käyttäen hyväksi erilaisia energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksia. Energiatehokkuuden mittausten osalta on painotettu erityisesti lämmönkulutukseen liittyviä mittauksia. Työn keskeisenä tavoitteena on ollut myös selvittää mitä mittauksia tarvitaan, että koulujen energiatehokkuus voitaisiin arvioida kohtalaisen hyvin. Lisäksi tavoitteena on ollut riittävien lähtötietojen kerääminen kalibroidun laskentamallin kehitykseen liittyen. Kalibroitu laskentamalli kertoisi tarkemmin rakennuksen mahdollisen energiankulutuksen vähenemisen ennen peruskorjausta tai uudisrakentamista. Laskentamallia ei käsitelty tarkemmin tässä diplomityössä, mutta se on yksi osa projektia Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen, mihin liittyen tämäkin diplomityö on tehty.

Energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksien taustalla on käsitelty laaja mittauksiin liittyvä teoreettinen pohja. Koulurakennusten niin kuin monien muidenkin rakennusten lämmönkulutukseen vaikuttavat monet tekijät. Näitä tekijöitä ovat koulurakennusten osalta ulkovaipan lämmöneristävyys ja ilmanpitävyys, ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmät, rakennusautomaatio ja sen taso sekä koulun kiinteistöhoitajat ja käyttäjät. Koulurakennusten lämmönkulutukseen vaikuttavat tekijät eivät ole siis pelkästään teknisiä. Sähkönkulutuksen osalta merkittävän osan energiasta vie valaistus ja ilmanvaihto, jotka voivat kattaa koulun kokonaissähkönkulutuksesta jopa 71 %.

Mitatuissa kouluissa on käytetty langatonta mittausteknologiaa kyseisten koulujen tilojen lämpötilaolosuhteiden ja ilmanlaadun selvittämiseksi. Käytössä on ollut lähes 200 langatonta mittaustellettä eli mittaus on ollut hyvinkin kattava. Lämpötilaolosuhteisiin liittyen on mitattu tilojen sisälämpötiloja ja ilmanlaadun mittauksissa tilojen hiilidioksidipitoisuuksia. Laajan langattoman mittauksen lisäksi molemmissa kouluissa on

tehty lämpökamerakuvaus ilmavuotojen ja kylmäsiltojen havainnollistamiseksi ja ilmanvaihtokoneiden ilmavirtojen määrittäminen. Molemmista kouluista on saatu myös lämmön- ja sähkönkulutustietoa tunti-, viikko- ja/tai kuukausitasolla. Koulun A osalta on myös suoritettu ilmanpitävyysmittaus painekoemenetelmällä sekä määritetty ilmanvaihtokoneiden lämmön talteenoton hyötysuhteita käyttäen hyväksi langattomia mittalaitteita. Koulun B osalta lämmön talteenoton hyötysuhteita ei ole määritetty, koska koulussa on ainoastaan yksi luokkakohtainen lämmön talteenoton sisältä ilmanvaihtokone, joka on merkityksen kokonaisuuden kannalta.

Työssä vertailtiin myös kouluja A ja B sekä pyrittiin näin etsimään selittäviä tekijöitä niiden poikkeaviin kulutuksiin. Koulu A on ilmanpitävyydsmittausten mukaan hyvin tiivis rakennus, kun taas koulussa B havaittiin paljon ilmavuotoja tehdyn lämpökamerakuvausten perusteella. Selittäviä tekijöitä koulun A pieneen lämmönkulutukseen ovat myös hyvä poistoilman lämmön talteenotto kaikissa ilmanvaihtokoneissa, melko pieni käyttöaste ja paikoitellen melko viileät sisälämpötilat. Ilmanlaadussa ei myöskään huomattu olevan ongelmia, joka usein lisää ikkunatuuletusta ja näin ollen lämmönkulutusta. Koulun B suureen lämmönkulutukseen vaikuttaa huonon ilmanpitävyyden lisäksi puutteellinen poistoilman lämmön talteenotto, viallinen menoveden lämpötilan säätö ja vialliset termostaattiset patteriventtiilit ja melko koulun korkea käyttöaste. Lisäksi ilmanlaadun osalta havaittiin paljon ongelmia, joka aiheutti paljon ikkunatuuletusta, sillä tuuletusräppänoitä jätettiin auki jopa yöksi. Ikkunatuuletukseen vaikutti myös lämmitysjärjestelmän viasta johtuvat korkeat sisälämpötilat.

Koulujen A ja B poikkeavien kulutuksien selittävät tekijät eivät olleet kuitenkaan pelkästään teknisiä, sillä rakennusten kiinteistönhoidon tasossa oli selkeä ero. Koulun A kiinteistönhoitaja tunsi hyvin kohteensa, kävi paikalla säännöllisesti sekä pyrki hoitamaan työnsä hyvin. Hänellä oli vastuualueellaan yhteensä yhdeksän kohdetta. Koulun B kiinteistönhoitajalla oli vastuualueellaan 14 kiinteistöä ja hän oli tullut tehtävään helmikuun 2011 loppupuolella. Koulun B kiinteistönhoitajalla oli työssään niin kiire, ettei hän kerinnyt hoitamaan työssään juuri muuta kuin pakolliset tehtävät. Kiinteistönhoitajan vaikutusta suureen energiankulutukseen koulussa B kuvaavat lämmitysjärjestelmän huono toiminta ja noin kahdeksi kuukaudeksi ympärivuorokautisesti päälle jääneet tuloilmakoneet. Koulun B huono ilmanlaatu selittyi osittain sillä, että kuuden luokkatilan ilmanvaihtoa hoitava huippuimuri oli ollut noin kymmenen vuotta pois käytöstä kenenkään siitä tietämättä. Varsinkin kyseisten tilojen ilmanvaihdosta käyttäjät olivat valittaneet usein, mutta asiaan ei ollut puututtu kovinkaan syvällisesti. Vika ei ole kuitenkaan pelkästään kiinteistönhoidossa vaan myös kunnan rakennuskannasta vastaavista henkilöistä. Jos esimiehet eivät välitä rakennusten energiatehokkuudesta ja käyttäjien terveellisyydestä, niin ei sitä voi odottaa alaisiltakaan.

Luvussa 8 on esitelty tarkemmin energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksiin ehdotettu mittauspaketti, jolla voitaisiin kohtalaisen hyvin arvioida erityisesti koulurakennusten energiatehokkuuden ja sisäilmaston tilaa. Mittausmenetelmiä voidaan tosin hyödyntää myös muissa rakennuksissa. Käytettävä mittausmenetelmä riippuu paljon myös siitä millainen mitattava kohde on. Ei voida siis antaa yhtä yleispätevää ohjetta

kaikkien olemassa olevien koulurakennusten energiatehokkuuden ja sisäilmaston mittauksiin.

Euroopan Unionin asettamat tavoitteet ja määräykset ilmastonmuutoksen hidastamiseksi tulevat koko ajan tärkeämmiksi. Tässä on vastuu ennen kaikkea julkisella sektorilla, jonka velvollisuutena on toimia esimerkkinä. Tärkeänä osa-alueena asiassa toimii rakennusten energiatehokkuuden parantaminen. Euroopan komissio on vuoden 2011 energiatehokkuussuunnitelmaan liittyneessä tiedonannossaan maininnut, että julkista rakennuskantaa olisi korjattava 3 % vuodessa lattia-alasta. Se tarkoittaa Euroopan tasolla julkisen korjauskannan kaksinkertaistamista. (Euroopan komissio 2011, s.6). Lisäksi uusien rakennusten tulisi olla lähes nollaenergiataloja vuonna 2020 ja julkisten rakennusten osalta jo aikaisemmin (Euroopan Unionin neuvosto 2011, s.33). Näihin tavoitteisiin pääsemiseksi on oltava luotettavia mittareita, joilla rakennusten energiatehokkuutta voitaisiin arvioida. Energiatehokkuutta on pystyttävä siis mittaamaan riittävän hyvin. Lisäksi olisi kyettävä etukäteen mallintamaan rakennukset siten, että suunniteltu energiatehokkuustaso todella vastaisi suunniteltua. Tämä vaatii entistä tarkempia laskentamalleja luotettavien tulosten aikaansaamiseksi ja olennaisena osana toimii luotettavien lähtötietojen saaminen. Korjauskohteissa tämä tarkoittaa riittävän laajoja ja luotettavia energiatehokkuuden mittauksia, jotta nykytilan perusteella voitaisiin arvioida mahdollisia säästöpotentiaaleja.

LÄHTEET

- Airaksinen, M. 2009. Ene-58.3102 Sisäilmastotekniikka. Luentokalvot 2009. VTT & LVI-tekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu.
- Alanne, K. 2010. Ene-58.3113 Ilmanvaihtotekniikka. Luentokalvot 2010. Aaltoyliopiston Teknillinen korkeakoulu.
- Alfano, F., Bellia, L., Boerstra, A., Dijken, F., Lanniello, E., Lopardo, G., Minichiello, F., Romagnoni, P., Silva, M. 2010. Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools, Part 1 Principles, REHVA GUIDEBOOK. Turkey, REHVA. 121 p.
- Asumisterveysohje. 2003. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003: Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Helsinki, Sosiaali- ja terveysministeriö. 88 s.
- Asumisterveysopas. 2005. Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen (STM:n oppaita 2003:1) soveltamisopas. Pori, Ympäristö ja Terveys-lehti. 184 s.
- Aumala, O. 1999. Mittaustekniikan perusteet. Helsinki, Otatieto Oy. 223 s.
- Boverket och Energimyndigheten. 2007. Energianvändning & innemiljö i skolor och förskolor – Förbättrad statistik i lokaler, STIL2. Energimyndighetens publikationsservice, ER 2007:11. 2002 s. + liitt. 37 s.
- C2. 1998. Kosteus, Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki, Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 16 s.
- C4. 2002. Lämmöneristys, Ohjeet 2003. Helsinki, Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 24 s.
- D2. 2008. Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2010. Helsinki, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 26 s. + liitt. 11 s.
- D3. 2008. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2010. Helsinki, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 14 s.
- D3. 2011. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 27 s. + liitt. 8 s.

D5. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet 2007. Helsinki, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 55 s. + liitt. 17 s.

Dallas Semiconductor & Maxim. Datasheet DS620. Low-voltage, $\pm 0,5$ ° C accuracy digital thermometer and thermostat. [WWW]. 15 s. [viitattu 5.12.2011]. Saatavissa: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/90572/DALLAS/DS620.html>

Dynamet. Technical data sheet TDS0057. Premier carbon dioxide infrared sensor, certified version. [WWW]. 10 s. [viitattu 5.12.2011]. Saatavissa: <http://www.dynamet.com/infrared-sensor-data/tds0057.pdf>

Energiatehokkuus ja parhaat käytännöt: Tietopohjan- ja tarpeiden kartoitus. 2008. Sektoritutkimuksen neuvottelukunta, Kestävä kehitys. 39 s.

Energiatodistusopas 2007. 12.1.2009. Rakennuksen energiatodistus ja energiatehokkuusluvun määrittäminen. Ympäristöministeriö. 37 s. + liitt. 110 s.

Energimyndigheten. Energianvändning i lokaler (STIL2). [WWW]. [viitattu 8.9.2011]. Saatavissa: <http://energimyndigheten.se/stil2>

Energin i våra lokaler, Resultat från Energimyndighetens STIL2-projekt, Delrapport från Energimyndighetens projekt Förbättrad energistatistik i samhället. 2010. Eskilstuna, Energimyndigheten. 24 s.

EnerKey. [WWW]. [viitattu 1.12.2011]. Saatavissa: <http://www2.enerkey.com/>

Euroopan komissio. KOM(2011) 109 lopullinen. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle, Energiatehokkuussuunnitelma 2011. [WWW]. [viitattu 10.12.2011]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:FI:PDF>

Euroopan Unionin neuvosto. Direktiivi 2008/0223 (COD). [WWW]. [viitattu 10.12.2011]. Saatavissa: <http://register.consilium.europa.eu/pdf/fin/10/st05/st05386.fi10.pdf>

FläktWoods. Päätelaitteet. [WWW]. [viitattu 1.12.2011]. Saatavissa: <http://www.flaktwoods.fi/tuotteet/paatelaitteet/>

Haahtela. [WWW]. [viitattu 1.12.2011]. Saatavissa: <http://www.haahtela.fi/>

Haakana, M., Soitinaho, U. 1999. Kiinteistöhoitohenkilöstön motivointi energiansäätöön, Kokemukset koulukohteista. Espoo, VTT, VTT Tiedotteita. 43 s. + liitt. 15 s.

Harju-Säntti, E. 2011. Energiansäästöinvestointien kannattavuuden arvioiminen koulu- rakennuksissa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. 112 s.

Hemmilä, K., Saarni, R. 2002. Ikkunaremontti. Helsinki, Rakennustieto Oy. 115 s.

Hietala, H., Kaivanto, K. 2004. Työpaikalla nähtävänä oltava lainsäädäntö 2004 ja yhteistoimintalaki. Hämeenlinna, Talentum Media Oy. 442 s.

Hyttinen, Marko. 2011. Tutkijatohtori, Ympäristötieteen laitos, Itä-Suomen yliopisto. Tampere. Sähköpostihaastattelu 26.9.2011.

Ilmatieteen laitos. Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. [WWW]. [viitattu 8.9.2011]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Helsinki, Asunto- ja rakennusosasto, Ympäristöministeriö, Ympäristöministeriön moniste 122. 35 s.

Ilmavirtojen mittaus- ja säätöopas. 2010. FläktWoods. Maaliskuu 2010. [WWW]. [viitattu 29.9.2011]. Saatavissa: <http://www.flaktwoods.fi/aaf939c0-af71-4df4-9f84-b5513b9ed6f3>

Kalema, T., Sahakari, T. Julkisten rakennuksien energiatehokkuus. Sektoritutkimuksen neuvottelukunta, Kestävä kehitys 4-2008. 64 s.

Kalema, T. 2008. KSU-6120 Rakennusten konetekniset laitteet. Luentokalvot 2008. Konstruktiotekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto.

Kauppinen, T., Kovanen, K., Ojanen, T. 2009. Tiivis rakennus säästää energiaa ja parantaa sisäilmaa. Rakennuslehti, 11.6.2009. [WWW]. [viitattu 30.8.2011]. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/uutiset/lehtiarkisto/18253.html>

Kauppinen, T. 2010. Rakennusten ilmanpitävyys. Rakennustieto Oy, Rakentajain kalenteri 2011. Hämeenlinna, Rakennusmestarit ja –insinöörit AMK RKL ry, Rakennustietosäätiö RTS. s. 123–131.

Keski-Opas, J. 2010. LVI-järjestelmien suunnittelu. Opetus, lukuvuosi 2009–2010.

Kimrok Oy. [WWW]. [viitattu 29.9.2011]. Saatavissa: <http://www.kimrok.fi/>

Kouhia, I., Nieminen, J., Pulakka, S. 2010. Rakennuksen ulkovaipan energiakorjaukset. Espoo, VTT, Tutkimusraportti VTT-R-04017-10. 51 s.

Kurnitski, J. Palonen, J., Enberg, S., Ruotsalainen, R. 1996. Koulujen sisäilmasto – rehtorikysely ja sisäilmastomittaukset. Espoo, LVI-tekniikan laboratorio, Konetekniikan osasto, Teknillinen korkeakoulu. 57 s. + liitt. 3 s.

Malota, Tomasz. 2011. Technical Manager, Dynamant Ltd. Tampere. Sähköpostihastattelu 25.11.2011.

Mills, A.F. 1999. Basic heat & Mass Transfer. Prentice Hall, Second edition. 993 p.

Mittausverkko. Automaattinen langaton mittausverkko. Tietokonetekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. [WWW]. [viitattu 19.9.2011]. Saatavissa: <http://www.tkt.cs.tut.fi/research/daci/mittausverkko/>

Moreall Oy. [WWW]. [viitattu 29.9.2011]. Saatavissa: <http://www.moreall.fi/>

Motiva Oy. Kulutuksen normitus. [WWW]. [viitattu 8.9.2011a]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiankayton_tehostaminen/kiinteistojen_energianhallinta/kulutuksen_normitus

Motiva Oy. Lämmitysverkoston perussäätö. [WWW]. [viitattu 8.9.2011b]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/lammitysverkoston_perussaato/

Motiva Oy. Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. [WWW]. [viitattu 8.9.2011c]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiankayton_tehostaminen/kiinteistojen_energianhallinta/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi/

Mäkitalo, E. 2010. Eri kuntien koulujen kulutusvertailua lämmitysvuoden 2009 osalta (yhteensä 110 koulua). Tampere, Konstruktiotekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisematon selvitys.

Mäkiö, E., Malinen, M., Neuvonen, P., Vikström, K., Mäenpää, R., Saarenpää, J., Tähti, E. 1994. Kerrostalot 1960–1975. Helsinki, Rakennustieto Oy. 288 s.

Määttä, L. 2011. Tiedotustilaisuus case – kohteissa mittauksiin liittyen. Product Manager, Wirepas Oy.

NT VVS 019. 1988. Buildings – Ventilation Air: Local Mean Age, Nordtest Method. Nordisk Innovations Center (NICE), Edition 2, Approved 1988-09. 11 p.

NT VVS 055. 1987. Buildings – Total Outdoor Air Inflow, Nordtest Method. Nordisk Innovations Center (NICE), Approved 1987-06. 11 p.

OKKA – säätiö. Kestävän kehityksen sertifiointi. [WWW]. [viitattu 9.9.2011]. Saatavissa: http://www.okka-saatio.com/kestavan_kehityksen_sertifiointi.php

Paloniitty, S. 2010. Rakennuksen vaipan ilmatiiviys ja tiiviysmittaus, Suurten rakennusten tiiviyn mittaaminen. [WWW]. Sisäilmastoseminaari 17.3.2010. 27 s. [viitattu 5.12.2011]. Saatavissa: http://www.sisailmayhdistys.fi/files/attachments/seminaari2010/sauli_paloniitty-2_170310.pdf

Paloniitty, S. Kauppinen, T. 2011. Rakennusten lämpökuvaus. Porvoo, Rakennusteollisuus RT ry, Suomen Rakennusmedia Oy. 77 s. + liitt. 42 s.

Pentti, M. 2010. RTEK-3530 Eristysrakenteet, luentokalvot. Rakennustekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto.

Ratu 1213-S. 2005. Rakennuksen lämpökuvaus. Lämpökuvaus, raportointi ja tilaaminen. Ohjetiedosto. Rakennusteollisuus RT ry. 8 s. + liitt. 26 s.

RIL 66. 1969. Asuinrakennusten lämmöneristysnormit 1969. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Vammala. 26 s.

Sahakari, T. 2011. Koulujen sisäilma – kysely. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Konstruktiotekniikan laitos. 9 s.

Sensirion. Datasheet SHT11, Humidity and temperature sensor. [WWW]. 11 s. Saatavissa: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf

Seppänen, O. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto, Rauma, LVI-Kustannus Oy. 349 s.

Seppänen, O., Seppänen, M. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Jyväskylä, Sisäilmayhdistys ry. 279 s.

SFS 5512. 1989. Ilmastointi. Ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa. Helsinki, Suomen standardoimisliitto SFS. 14 s.

SFS-EN 13829. 2000. Thermal performance of buildings, Determination of buildings, Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 20 s. + liitt. 7 s.

Sherman, M.H. 1990. Tracer-Gas Techniques For Measuring Ventilation in a Single Zone. In: Building and Environment. Vol. 25, No. 4. Great Britain, Pergamon Press. pp. 365-374.

Sirén, K. 1995. Ilmastointitekniikan mittaukset. Helsinki, Tietonova Oy. 272 s. + liitt. 19 s.

Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmayhdistys ry, Rakennustietosäätiö RTS. 39 s.

Subjin Insulation Services. [WWW]. [viitattu 13.7.2011] Saatavissa: <http://itsnotyourwindows.com/sisservices.php?id=11>

Suomen virallinen tilasto (SVT). Rakennukset ja kesämökit [WWW]. Helsinki, Tilastokeskus. [viitattu: 6.9.2011]. Saatavissa: <http://tilastokeskus.fi/til/rakke/meta.html>

Suomen Ympäristökasvatuksen Seura (SYS). Vihreä Lippu. [WWW]. [viitattu 9.9.2011]. Saatavissa: <http://www.vihrealippu.fi/pages/285.php>

Tuomola, T., Siitonen, V. 1965. Koulujen lämmitys ja ilmanvaihto. Helsinki, Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Julkaisu 95. 46 s. + liitt. 7 s.

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). Energiatohokkuus. [WWW]. [viitattu 23.8.2011]. Saatavissa: <http://www.tem.fi/?s=2586>

Urho, P. 2003. Lämpökameran tulosten luotettavuus kiinteistökuvauksessa. Insinööri-työ. Hämeen ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma.

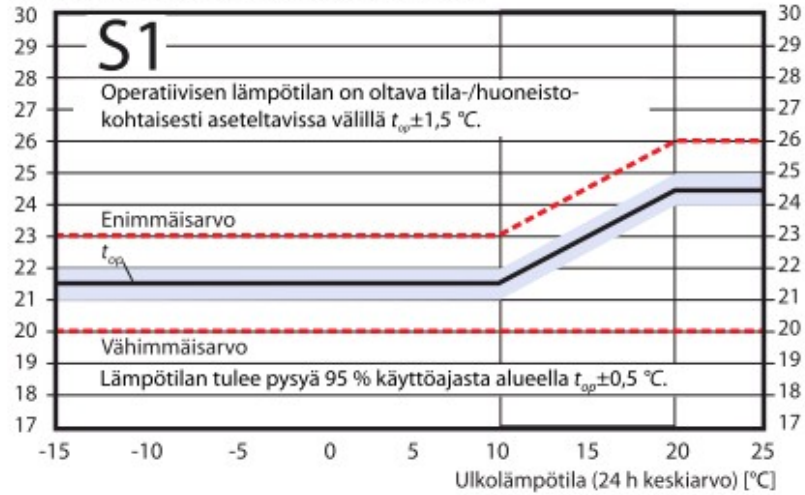
Vinha, J. 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka, Luentomoniste 2011, Osa 1. Rakennustekniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. 520 s.

Virta, J. 2003. Terveellinen sisäilmasto, Sisäilmastotietoa rakentajille, sisäilmastaselvitysten tekijöille ja kiinteistöjen omistajille. Espoo, Työsuojelurahasto. 67 s.

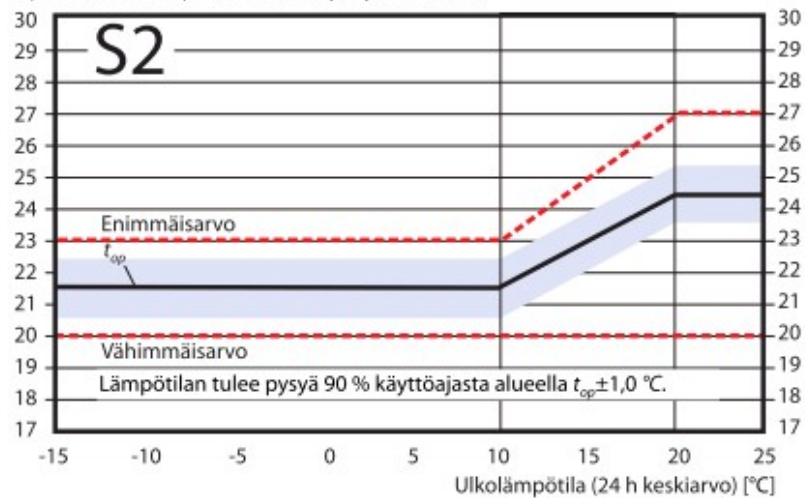
Wirepas Oy. [WWW]. [viitattu 19.9.2011]. Saatavissa: <http://www.wirepas.com>

LIITE 1: SISÄILMASTOLUOKAT S1-S3

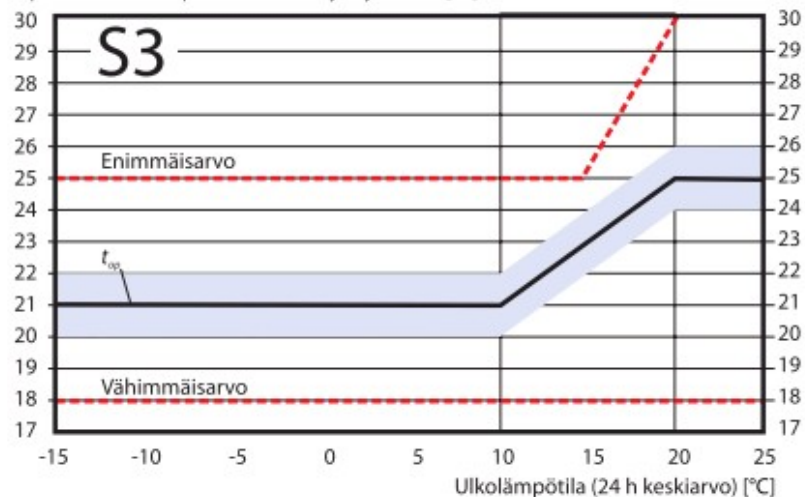
Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä [°C]



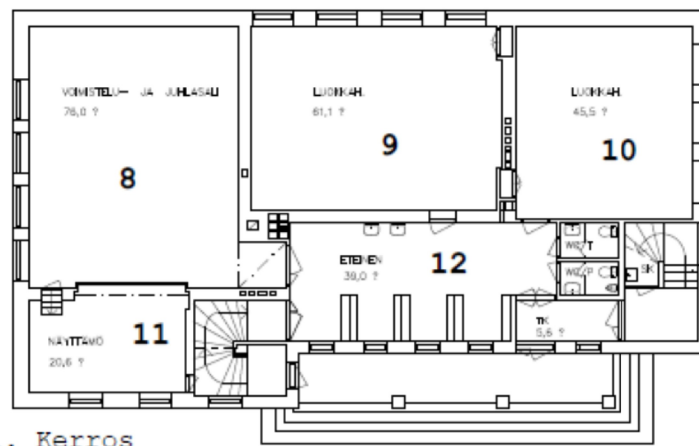
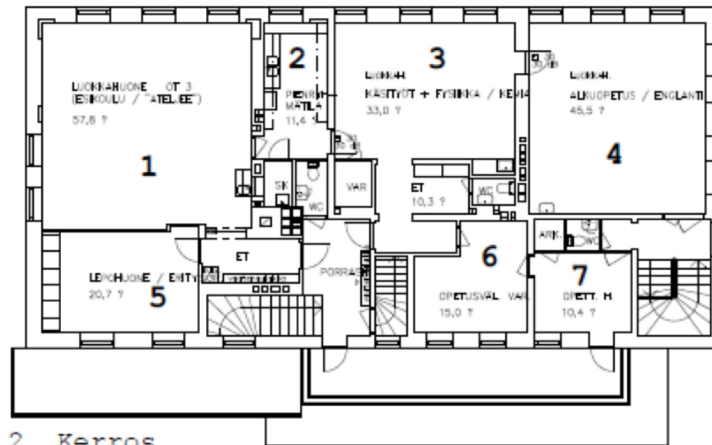
Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä [°C]

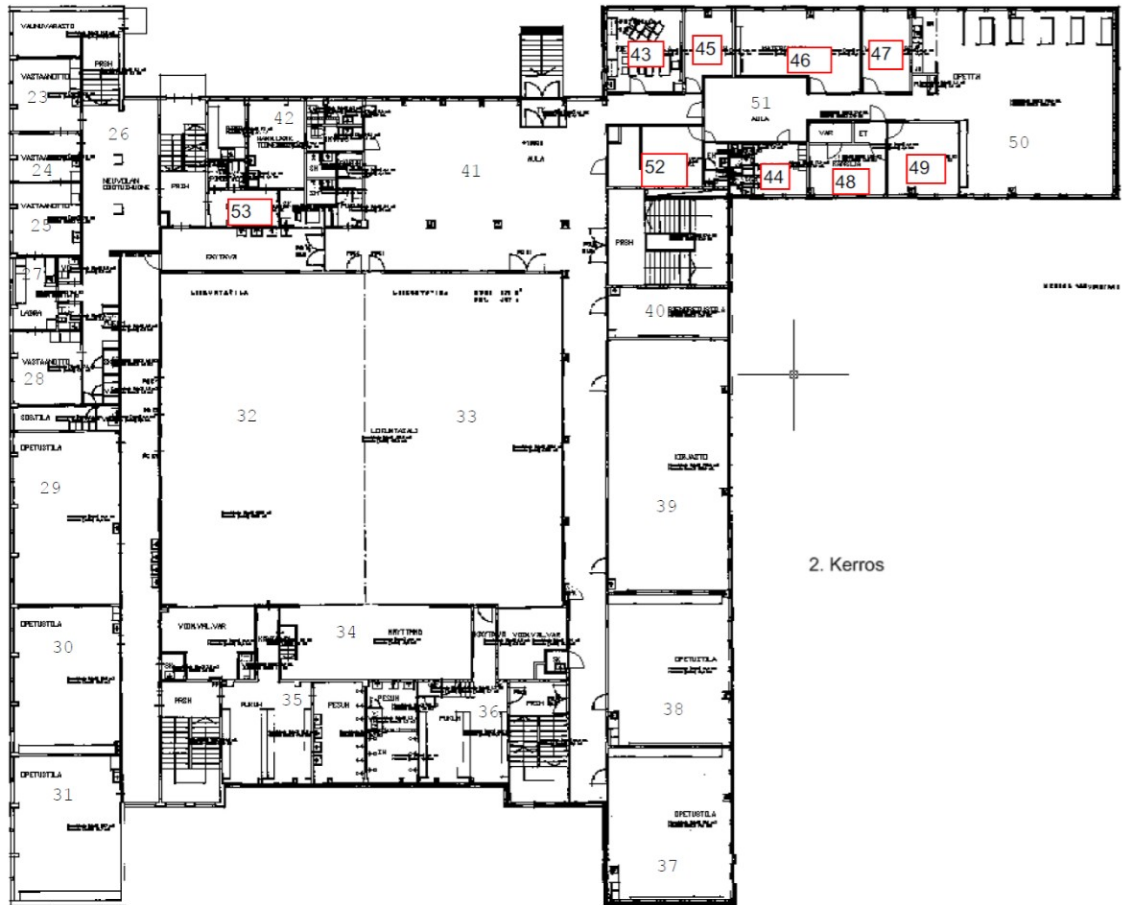


Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä [°C]



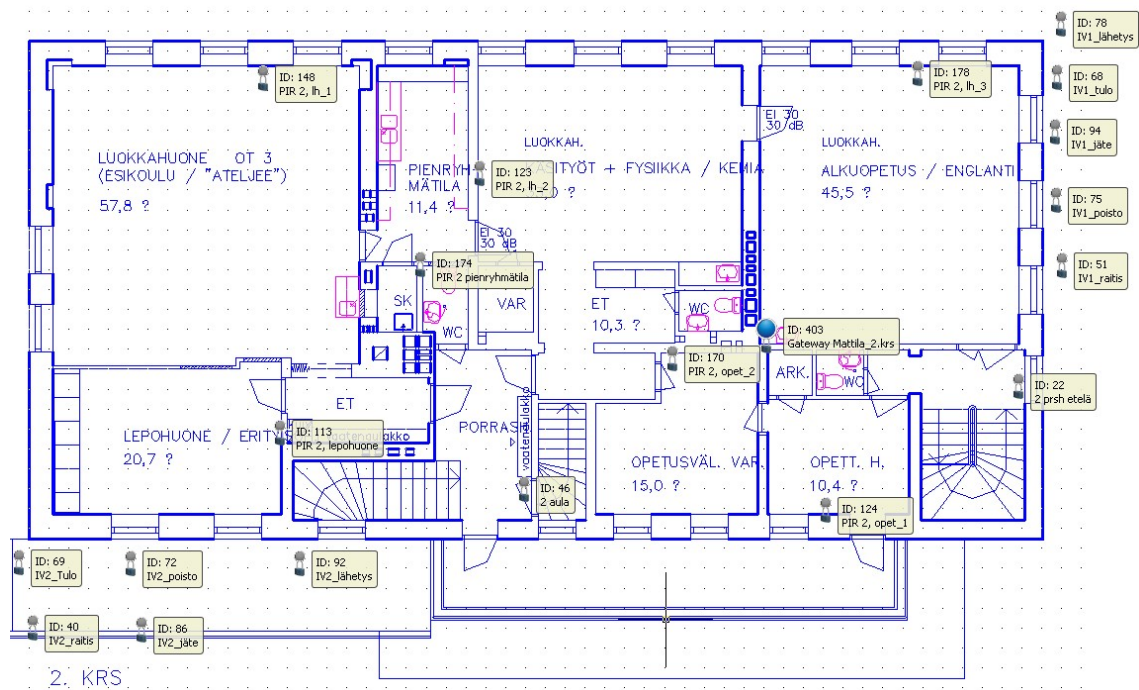
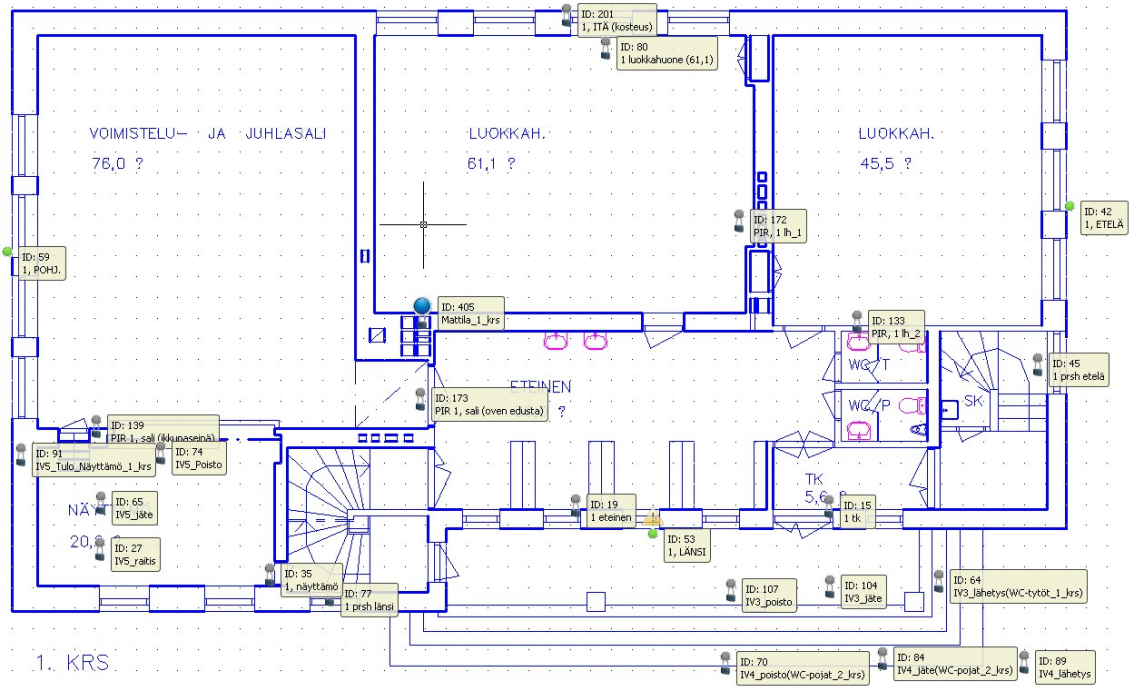
LIITE 2: KOULUN A NUMEROIDUT POHJAPIIRUSTUKSET



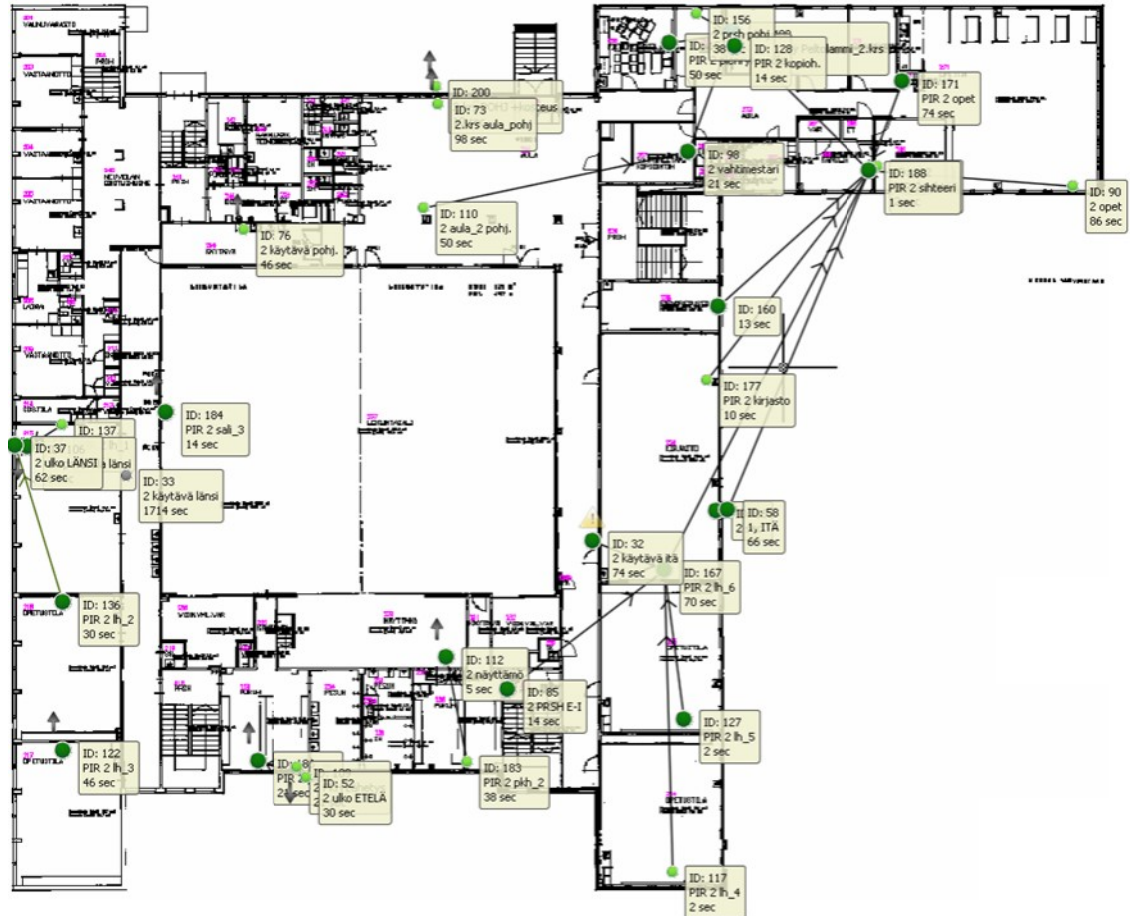




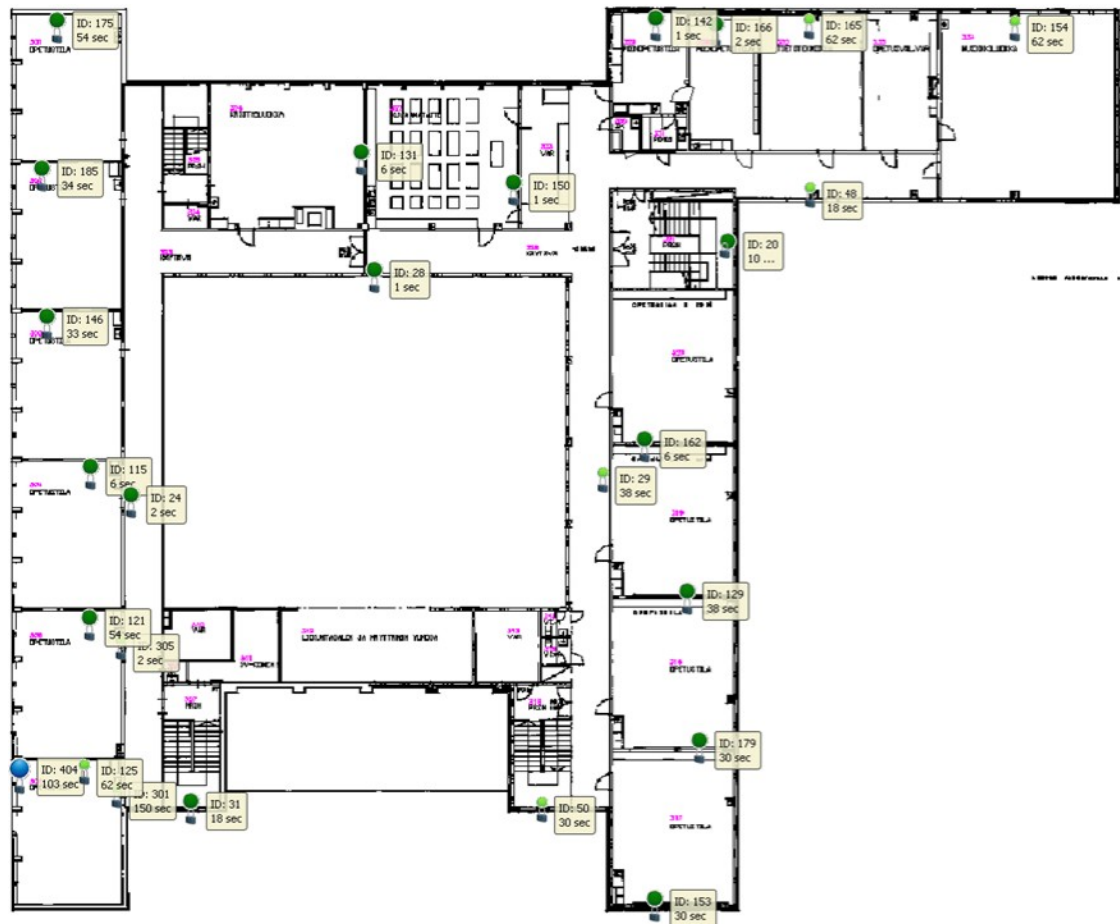
LIITE 4: KOULUN A ENSIMMÄISEN JA TOISEN KERROKSEN LANGATON MITTAUSJÄRJESTELY



LIITE 5: KOULUN B ENSIMMÄISEN JA TOISEN KERROKSEN LANGATON MITTAUSJÄRJESTELY



2. krs

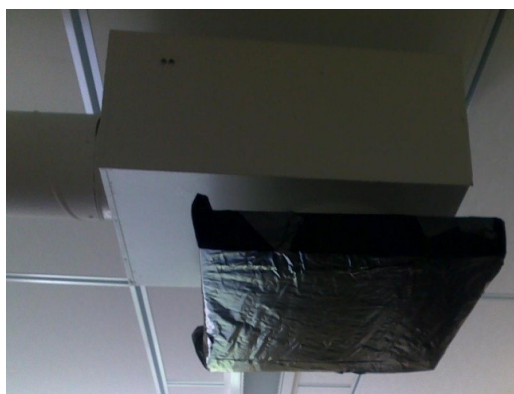


3. krs

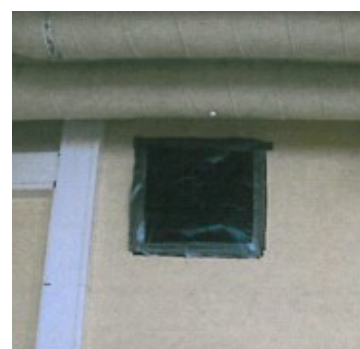
LIITE 6: KOULUN A ILMANPITÄVYYSMITTAUS- TEN MITTAUSJÄRJESTELYÄ



Kuva L6.1. Ilmanvaihtokoneiden teippaukset.

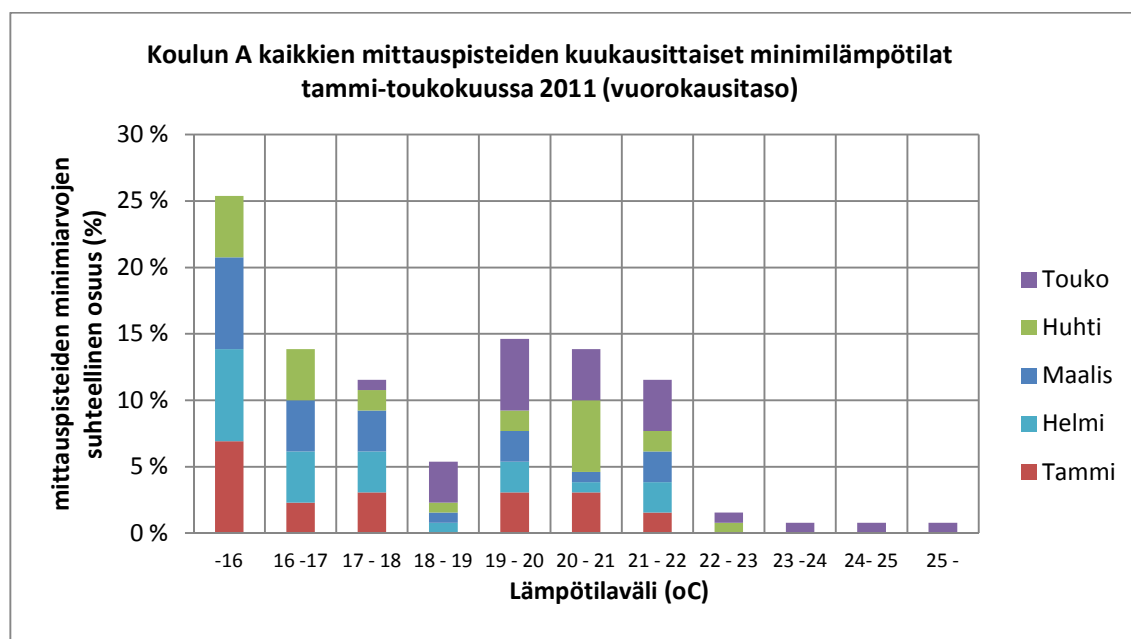


Kuva L6.2. Ullakotilassa sijaitsevan ilmanvaihtokoneen poisto- ja tuloilmaventtiilien teippaus.

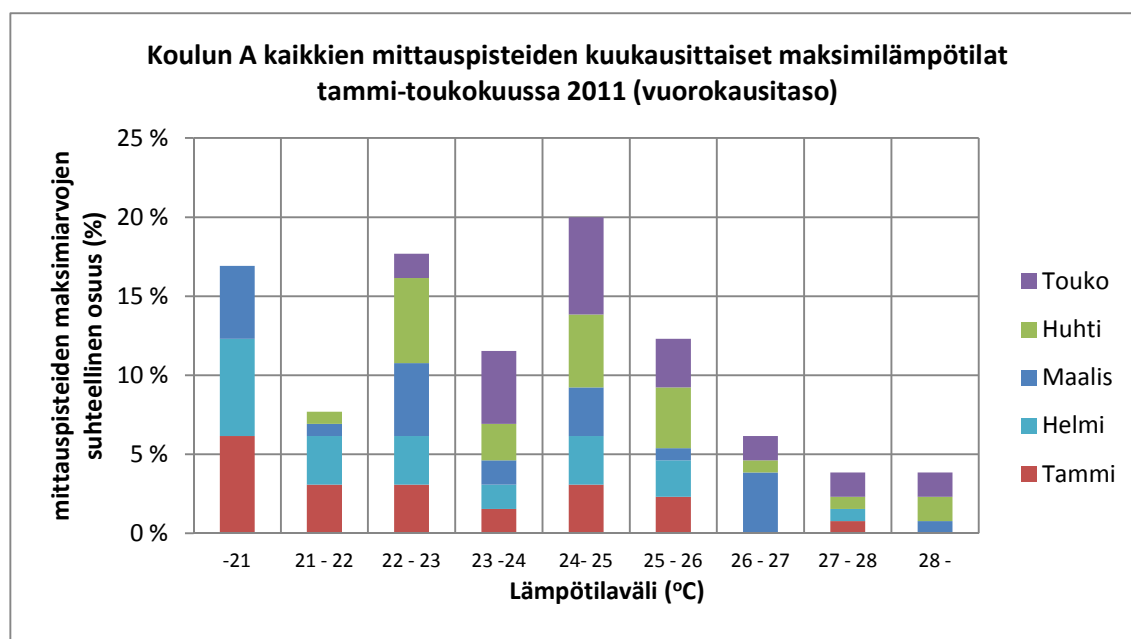


Kuva L6.3. Kellarikerroksessa sijainneen liesituulettimen ja raitisilmaventtiilien (pukuhuoneet) teippaus. Oikealla olevassa kuvassa on vielä esitettyä vanhan painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän poistoilmakanavien teippaus.

LIITE 7: KOULUN A KAIKKIEN MITTAUSPISTEIDEN KUUKAUSITTAISET MINIMI- JA MAKSIMI-LÄMPÖTILAT

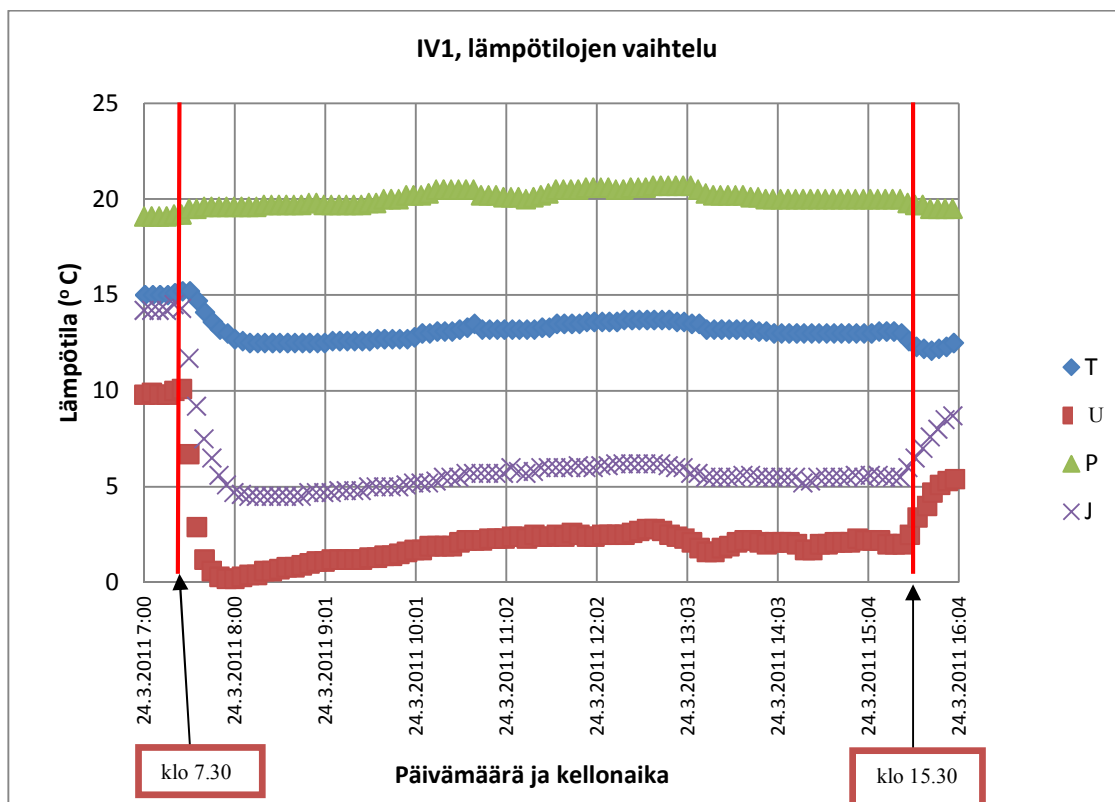


Kuva L7.1. Koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimilämpötilat tammi-toukokuussa 2011.



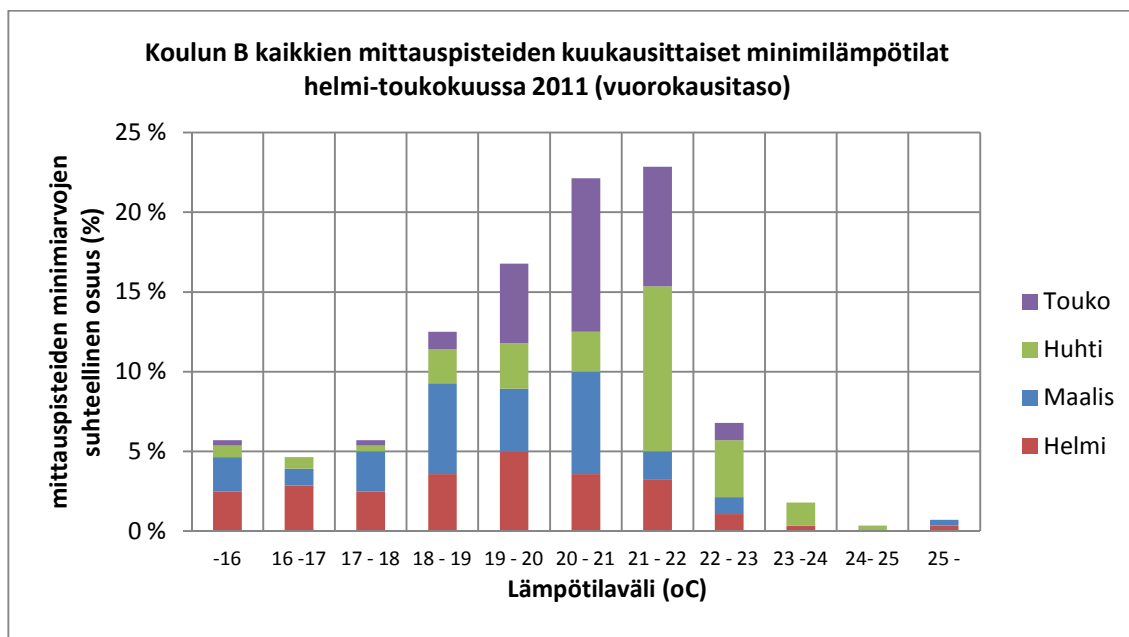
Kuva L7.4. Koulun A kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset maksimilämpötilat tammi-toukokuussa 2011.

LIITE 8: ILMANVAIHTOKONEIDEN KÄYNTIAIKOJEN MÄÄRITYS KOULUSSA A

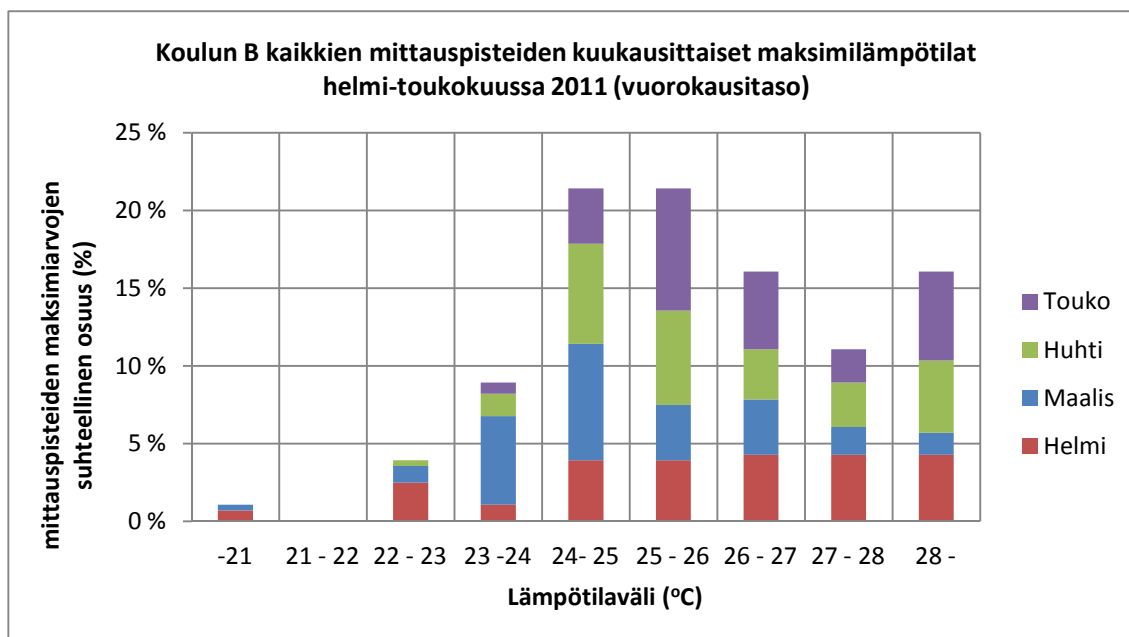


Kuva L7.1. Esimerkki koulun A ilmanvaihtokoneiden käyntiaikojen määrittämisestä, IV1. Tulo- (T), ulko- (U), poisto- (P) ja jäteilmän (J) lämpötilojen vaihtelu päivän aikana. Ilmanvaihtokoneen käynnistys- ja sammumisaika katsottu kohdista, missä lämpötilat ovat alkaneet muuttua.

LIITE 9: KOULUN B KAIKKIEN MITTAUSPISTEIDEN KUUKAUSITTAISET MINIMI- JA MAKSIMI-LÄMPÖTILAT



Kuva L9.1. Koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset minimilämpötilat helmi-toukokuussa 2011.



Kuva L9.2. Koulun B kaikkien mittauspisteiden kuukausittaiset maksimilämpötilat helmi-toukokuussa 2011.