

Ville Rantala

Langattoman anturiverkon hyödyntäminen sisäolosuhdemittauksissa

Metropolia ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
30.5.2011

Tekijä Otsikko	Ville Rantala Langattoman anturiverkon hyödyntäminen sisäolosuhdemittauksissa
Sivumäärä Aika	38 sivua + 3 liitettä 30.5.2011
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI, tuotantopainotteinen
Ohjaaja	lehtori Jorma Säteri
<p>Tässä työssä tutkittiin Metropolian Leppävaaran toimipisteen sisäolosuhteita langattoman mittausanturiverkon avulla. Mittauksen tarkoituksena oli saada mahdollisimman kattava kuva mitattavan alueen sisäolosuhteista. Langattomat mittausanturit mittasivat luokkahuoneista huonelämpötiladataa, jota analysoitiin ja käsiteltiin haluttuun muotoon.</p> <p>Mittausantureiden lähettämän datan analysoinnin avuksi luotiin uusi sisäilmastoindeksi. Indeksillä mahdollistettiin yksinkertaisen, väreihin pohjautuvan järjestelmän avulla esittämään sisäolosuhteiden laatua. Huonetilan sisäilmanlaatu pystyttiin esittämään helppolukuisin diagrammiesityksin.</p> <p>Merkittävistä luokkahuoneista laadittiin indeksin avulla diagrammit. Mittaustulosten perusteella laskettiin rakennuksen luokkahuoneiden sisäolosuhteiden yhden päivän keskiarvo. Laskennan tuloksena rakennus ei saavuttanut niitä tavoitteita, joihin sitä verrattiin. Indeksillä käyttöä helpottamaan on tulevaisuudessa mahdollista luoda tietokoneohjelma, joka luo diagrammit automaattisesti. Indeksillä voidaan jatkossa kehittää koskemaan myös muita suureita sisäolosuhteiden arvioinnissa.</p>	
Avainsanat	langaton, anturiverkko, huonelämpötila, indeksi, sisäolosuhteet, sisäilmasto

Author Title	Ville Rantala Using wireless sensor networks in indoor air quality measurements
Number of Pages Date	38 pages + 3 appendices 30 May 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructor	Jorma Säteri, senior lecturer
<p>The purpose of this final year project was to perform indoor air quality measurements at the Leppävaara campus of the Metropolia University of Applied Sciences with the help of a wireless sensor network. The aim was to get an extensive view of the indoor air quality in the classrooms with room temperature measurements.</p> <p>A new indoor environmental quality index was created for the analysis of the room temperature data. The index enabled a simple color-based, easy-to-read presentation of the data.</p> <p>The indoor environmental quality index was used to create indoor air quality diagrams about the most important classrooms in the building. Of the results, an average was calculated for the quality of the indoor environment in the whole building. The results showed that the given targets were not reached. The index can be used to evaluate the indoor environmental quality in any building. As further study a computer program could be created to assist calculating the indoor environmental quality results. Also, the index can be developed to be used with other parameters, like the concentration of CO₂.</p>	
Keywords	wireless, sensor network, room temperature, IEQ, IAQ

Sisällys

Lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	Lämpöolosuhteet	2
2.1	Lämpöolojen perusteet	2
2.2	Optimilämpötila	2
2.3	Lämpötasapaino ja viihtyvyys	3
2.4	Lämpöaistimus ja tyytymättömien osuus	3
2.5	Nykyiset luokitukset ja standardit sisäilmaston laadun arviointiin	5
2.5.1	Sisäilmastoluokitus 2008	5
2.5.2	Eurooppalainen sisäilmastostandardi CEN 15251	6
3	Sisäilmastoindeksi	8
3.1	Indeksin kehitystyö	8
3.2	Indeksin teoria	8
3.3	Liikennevaloesitys	10
4	Langaton anturiverkko	11
4.1	Mittauslaitteiston esittely	11
4.1.1	Mittausantureiden tekniset tiedot	12
4.1.2	Mittausantureiden mittaustarkkuuden arviointi	12
4.2	<i>Wirepas Control Panel</i> -käyttöliittymä	14
5	Mittausjärjestelyt	15
5.1	Rakennuksen esittely	15
5.2	Antureiden sijoitus	16
5.2.1	Mittausantureiden sijoitus huonetiloissa	16
5.2.2	Mittausantureiden sijaintipöytäkirja	17
5.3	Ulkolämpötiladata	17
6	Mittaustulokset	18
6.1	Mittausajankohta	18
6.2	Vuorokauden keskilämpötilamittaukset	18
6.3	Huoneistokohtaiset mittaustulokset	18
6.4	Luokahuonekohtainen tarkastelu	19

6.4.1	Luokkahuone ETYA1112	19
6.4.2	Luokkahuone ETYA1121	20
6.4.3	Luokkahuone ETYA1149	22
6.4.4	Atk-luokkahuone ETYA1125	24
6.4.5	Luokkahuone ETYA1123	25
6.4.6	Seminaariluokkahuone ETYA1146	27
6.4.7	Atk-luokkahuone ETYA1141	28
6.4.8	Luokkahuone ETYA2131	30
6.4.9	Atk-luokkahuone ETYA2130	31
6.4.10	Atk-luokkahuone ETYA2123	32
6.5	Koko rakennuksen yhden päivän keskiarvo	34
6.6	Muita mahdollisia esitystapoja	35
6.7	Mittausten ongelmat	36
6.8	Mittaustulosten ja jatkotoimenpiteiden pohdintaa	36
7	Yhteenveto	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Lämmöntuotto ja lämmöneristävyystaulukot	
	Liite 2. Mittauslaitteiden sijaintipöytäkirja	
	Liite 3. Rakennuksen pohjakuvat	

Lyhenteet ja määritelmät

CEN	<i>European committee for standardization.</i> Yksityinen voittoa tavoittelematon järjestö, jonka päätehtävänä on edistää eurooppalaista standardisointia.
CLO	Vaatetuksen lämmöneristävyys.
IAQ	<i>Indoor air quality.</i> Rakennusten sisäilman laatuun liittyvä termi.
IEQ	<i>Indoor environmental quality.</i> Rakennusten sisäilman laatuun liittyvä termi.
MET	Aineenvaihdunnan lämmöntuotto. 1 met = 58,2 W/m ²
MMEA	Mittaus, monitorointi ja ympäristöarviointi. Tekesin rahoittama projekti ympäristötehokkuuden arviointiin ja määrittelyyn.
PMV	<i>Predicted mean vote.</i> Lämpöaistimus.
PPD	<i>Predicted percentage of dissatisfied.</i> Lämpöaistimuksia vastaavat tyytymättömien osuudet.
SHOK	Strategisen huippuosaamisen keskittymä. Suomeen vuodesta 2008 alkaen perustettujen yritysten, yliopistojen ja tutkimuslaitosten muodostaman tiiviin yhteistyömuodon nimitys.

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella toimiva konsepti energiatehokkaan ja optimaalisen sisäilmaston määrittämiseen langattoman anturiverkon avulla. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, miten langattoman anturiverkon avulla voidaan kerätä tietoa tilojen sisäolosuhteista ja verrata tietoa haluttuihin tavoitteisiin. Opinnäytetyö on osa laajempaa CLEEN Oy:n viisivuotista MMEA (*Measurement, Monitoring and Environmental Assessment*) *Energy Efficient Indoor Environment* -tutkimushanketta. Tutkimushanke kuuluu Tekesin tukemiin Strategisen huippuosaamisen keskittymiin (SHOK), jonka tarkoituksena on tarjota huipputason tutkimusyksiköille ja tutkimustuloksia hyödyntäville yrityksille uusi tapa tehdä tiivistä ja pitkäjänteistä yhteistyötä keskenään.

Työn tavoitteena on saada edustava kuva Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteen vanhan osan huonetilojen sisäilmasto-olosuhteista. Ensisijaisesti opinnäytetyössä keskitytään sisälämpötilojen mittaukseen, mutta antureilla on mahdollista saada myös ilmankosteus-, hiilidioksidipitoisuus- ja läsnäolodataa. Mittausdataa hyödynnetään tietokannasta niin, että siitä pystytään luomaan sisäilmastoindeksi, joka arvioi sisäilmaston laatua. Sisäilmastoindeksin luomisessa päätyön on tehnyt Jorma Säteri, ja olen toiminut projektissa tutkimusapulaisena. Sen pohjana on käytetty olemassa olevia sisäilmastotavoitteita, kuten Sisäilmastoluokituksen S2-tasoa. Laajempaa näkökulmaa on haettu myös vastaavista kansainvälisistä standardeista.

Rakennuksista aiheutuu n. 30 % Euroopan hiilidioksidipäästöistä. Rakennukset ovat taas tyhjiillään n. 30–40 % käyttöajastaan, mikä mahdollistaisi energiansäästöllisiä optimointimahdollisuuksia. Toisaalta epäoptimaaliset sisäolosuhteet voivat myös aiheuttaa tuottavuuden laskua ja mahdollisia terveysongelmia. (1, s. 3.)

2 Lämpöolosuhteet

2.1 Lämpöolojen perusteet

Sisätilojen oikea lämpötila on tärkein sisäilmastotavoite. Oikea huonelämpötila on edellytys sisätilojen terveellisyydelle ja viihtyvyydelle. Poikkeavuudet oikeasta lämpötilasta voidaan helposti nähdä lisääntyneinä valituksina, terveyshaittana ja työn tuottavuuden laskuna.

Oikean lämpötilan perusta on kehon lämpötasapainon säilyttäminen. Ihmisen ruumiin lämpötilan ei tulisi nousta liian suureksi, yli 37 °C:n. Mitä enemmän tehdään työtä, sitä enemmän lämpöä syntyy. Näin ollen huonelämpötila voi tällaisissa olosuhteissa olla viileä, jotta kasvanut lämpömäärä siirtyisi ympäristöön. Lämpötilaa voidaan pitää oikeana silloin, kun ei pystytä arvioimaan, pitäisikö sen olla suurempi vai pienempi. Tällöin se tuntuu mukavalta, tilassa viihdytään, se ei väsytä eikä aiheuta kylmän tai vedon tunnetta. Lämmön siirtymistä ympäristöön voidaan säädellä vaatetuksella. Mitä enemmän vaatteita on päällä, sitä vähemmän lämpöä siirtyy.

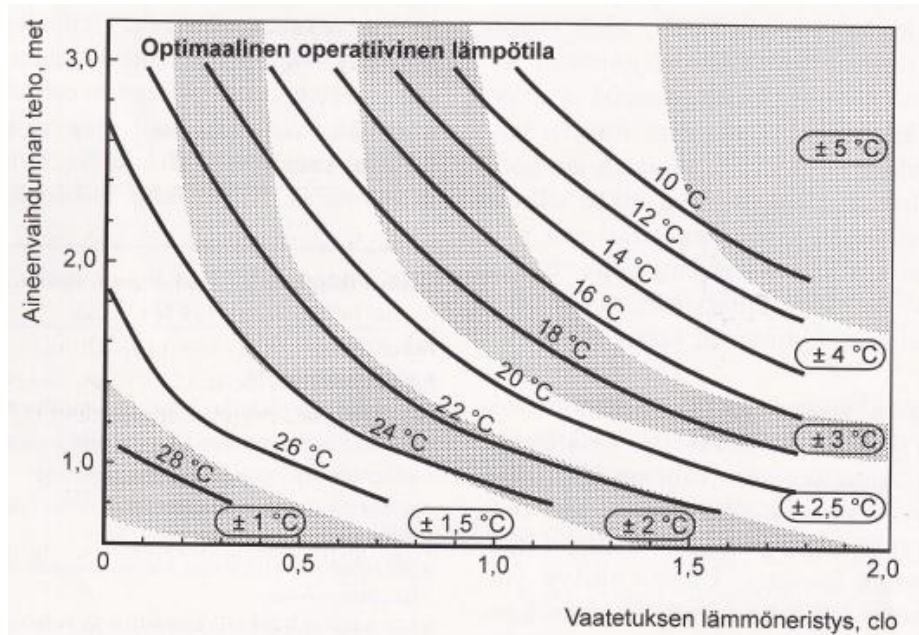
Ihmisten lämpötilan kokemisella on jonkin verran yksilöllisiä eroja, jotka aiheutuvat vaatetuksen, aineenvaihdunnan ja fysiologisten tekijöiden eroista. Tyytyväisten prosentuaalinen osuus on suurimmillaan silloin, kun huonelämpötila tavallisessa työ- ja asuutilassa on 21–23 °C. (2, s. 1.)

2.2 Optimilämpötila

Parhaassa tilanteessa huonetilan käyttäjä pystyy säätämään huonelämpötilan haluamukseen. Optimilämpötilana voidaan pitää sitä lämpötilaa, johon enemmistö on tyytyväinen ja tyytymättömien osuus on pienimmillään. Tyytymättömien osuus riippuu ihmisten vaatetuksen ja lämmöntuoton eroista. Optimaalista lämpötilaa ilmaistaan yleensä operatiivisena lämpötilana, jolloin ilman lämpötila ja huoneen pintalämpötilojen säteily otetaan huomioon. (2, s. 2)

2.3 Lämpötasapaino ja viihtyvyys

Yleisesti on hyväksytty yhteys, joka vallitsee optimilämpötilan, kehon aineenvaihdunnan ja vaatetuksen lämmöneristävyyden välillä. Tuo yhteys on esitetty kuvassa 1. Kuvan arvot pätevät, kun suhteellinen ilmankosteus on 50 % ja ilman keskinopeus enintään 0,1 m/s. (2, s. 2.)



Kuva 1. Optimaalinen operatiivinen lämpötila suhteessa vaatetuksen lämmöneristykseen ja aineenvaihdunnan tehoon (2, s. 2).

Kuvan 1 tulkinnessa tarvitaan liitteessä 1 esitettyjä taulukoita aineenvaihdunnan lämmöntuotoista eri toiminnoissa ja vaatekokonaisuuksien lämmöneristävyyksistä. Kuvan mukaan esim. kovaa fyysistä työtä tekevä ihminen viihtyy paremmin viileämmässä lämpötilassa.

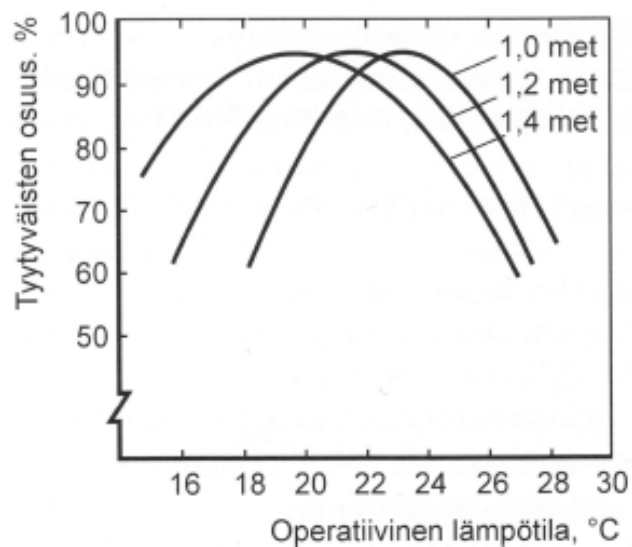
2.4 Lämpöaistimus ja tyytymättömien osuus

Lämpöaistimusta voidaan arvioida 7-pisteisellä PMV-asteikolla (*Predicted Mean Vote*). Optimilämpötila vallitsee silloin, kun tyytymättömien osuus on pienimmillään. Taulukossa 1 on esitetty lämpöaistimusasteikko.

Taulukko 1. Lämpöaistimusasteikko (2, s. 4).

Asteikon PMV arvo	Lämpöaistimus	Tyytymättömien osuus PPD (%)
+3	kuuma	100
2,5		93
+2	lämmin	75
1,5		51
+1	lämpimähkö	25
0,5		10
0	neutraali	5
0,5		10
-1	viileähkö	25
1,5		51
-2	viileä	75
2,5		93
-3	kylmä	100

Kuvassa 2 on esitetty, miten tyytyväisten osuus muuttuu aineenvaihdunnan lämmöntuoton ja operatiivisen lämpötilan mukaan.



Kuva 2. Tyytyväisten osuus suhteessa operatiiviseen lämpötilaan ja aineenvaihdunnan lämmöntuottoon (2, s. 4).

2.5 Nykyiset luokitukset ja standardit sisäilmaston laadun arviointiin

Suomessa Sisäilmayhdistys ry on julkaissut Sisäilmastoluokitus 2008: Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Eurooppalainen CEN ja amerikkalainen ANSI/ASHRAE ovat myös julkaisseet omat standardinsa sisäilmaston tavoitearvoista.

2.5.1 Sisäilmastoluokitus 2008

Sisäilmastoluokitus 2008 soveltuu käytettäväksi työ- ja asuintilojen sisäolosuhteiden arviointiin. Se jakaa sisäilmaston tavoitearvot kolmeen laatutasoon, S1-luokan ollessa paras:

S1: Yksilöllinen sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu on erittäin hyvä eikä tiloissa ole havaittavia hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilman laatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat viihtyisät eikä vetoa tai yllämpenemistä esiinny. Tilan käyttäjä pystyy yksilöllisesti hallitsemaan lämpöoloja. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset erittäin hyvät ääniolosuhteet ja hyviä valaistusolosuhteita tukemassa yksilöllisesti säädettävä valaistus.

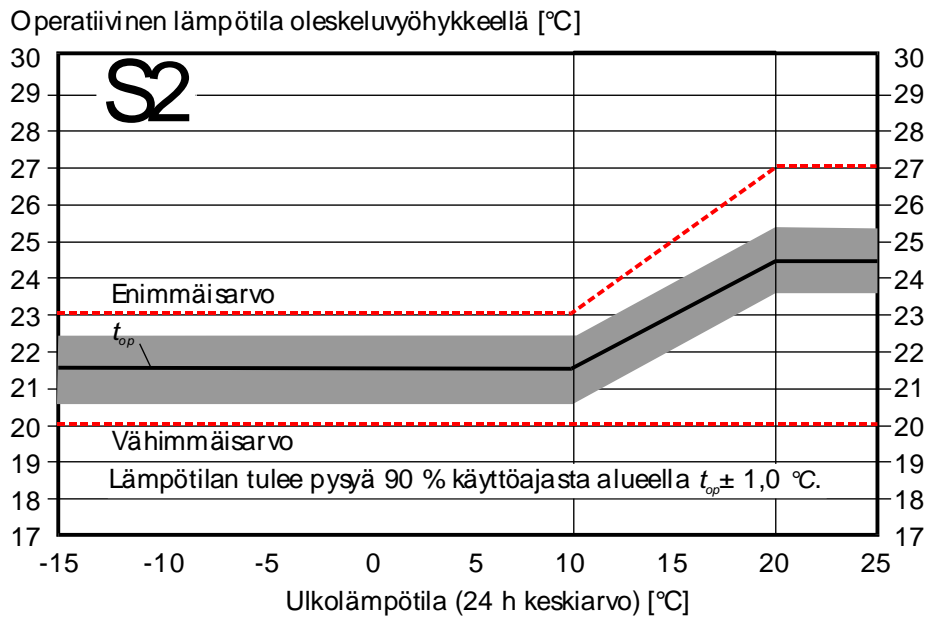
S2: Hyvä sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu on hyvä eikä tiloissa ole häiritseviä hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilman laatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat hyvät. Vetoa ei yleensä esiinny, mutta yllämpeneminen on mahdollista kesäpäivinä. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset hyvät ääni- ja valaistusolosuhteet.

S3: Tyydyttävä sisäilmasto

Tilan sisäilman laatu ja lämpöolot sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset.
(3, s. 10.)

Kuvassa 3 on esitetty S2-luokan huonelämpötilojen tavoitearvot. Tavoitearvot on esitetty operatiivisina lämpötiloina. Sen sijaan on kuitenkin mahdollista käyttää huonelämpötilaa, mikäli huoneen pintalämpötilat eivät merkittävästi poikkea huonelämpötilasta.



Kuva 3. Huonelämpötilan tavoitearvot Sisäilmastoluokituksen S2-tason mukaan (4, s. 3).

Sisäilmastoluokitus ottaa hetkelliset poikkeamat lämpötiloissa huomioon olosuhteiden ajallisena pysyvyytenä. Poikkeaman suuruuteen se ei ota kantaa, kunhan sallitut ylä- ja alarajat eivät ylitä. Hiilidioksidipitoisuustavoitteet on esitetty taulukossa 2. Ne koskevat ihmisperäistä hiilidioksidia. Hiilidioksidipitoisuuksissa tarkastellaan yhden tunnin liukuvaa keskiarvoa.

Taulukko 2. Hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvot (3, s. 14).

Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	S1	S2	S3
	<750	<900	<1 200

2.5.2 Eurooppalainen sisäilmastostandardi CEN 15251

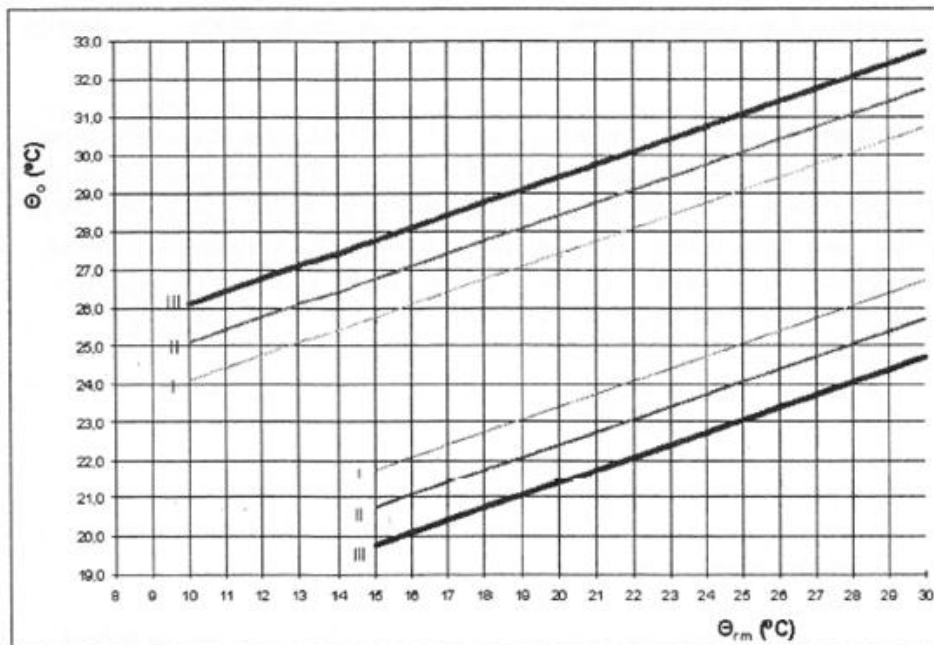
CEN 15251 (*Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*) on eurooppalainen standardi sisäilmaston laadun ja sisäilmastoviihtyvyyden määrittelemiseen. Standardia ei ole suomennettu, joten alla oleva materiaali on esitetty englanniksi.

Taulukko 3. CEN 15251 jakaa sisäilmastoluokat neljään kategoriaan (5, s. 13).

Category	Explanation
I	High level of expectation and is recommended for spaces occupied by very sensitive and fragile persons with special requirements like handicapped, sick, very young children and elderly persons
II	Normal level of expectation and should be used for new buildings and renovations
III	An acceptable, moderate level of expectation and may be used for existing buildings
IV	Values outside the criteria for the above categories. This category should only be accepted for a limited part of the year

Taulukon 3 luokitukset I–III ovat hyvin lähellä Sisäilmastoluokituksen vastaavia luokituksia. Neljäs luokka taas kuvaa tilannetta, joka on kaikkia edellä mainittuja luokituksia huonompi, eikä kohteen tulisi olla siinä kuin korkeintaan rajoitetun ajan vuodesta.

Kuvassa 4 on esitetty sallitut operatiivisen lämpötilan poikkeamat annetuille luokituksille. Ulkolämpötilana käytetään vuorokauden keskilämpötilaa.



Θ_{rm} = Outdoor Running mean temperature °C.

Θ_o = Operative temperature °C.

Kuva 4. CEN 15251:n operatiivisten sisälämpötilojen suunnitteluarvot rakennuksissa, joissa ei ole koneellista jäähdytystä (5, s. 27).

CEN 15251 antaa useita eri tapoja tehdä poikkeamatarkasteluja mittaustuloksiin toisin kuin Sisäilmastoluokitus 2008. Metodissa A annetaan prosentuaalinen aika, jolloin lämpötila saa poiketa tavoitearvoista. Sisäilmastoluokitus 2008 käyttää tätä tapaa lämpötilojen pysyvyysvaatimuksissa. B-metodissa voidaan antaa tietty astetuntimääräraja, jota ei tule ylittää. Tällöin poikkeamia tarkastellaan painotettuna siten, että asteluvultaan suuremmat ylitykset lasketaan painotetusti.

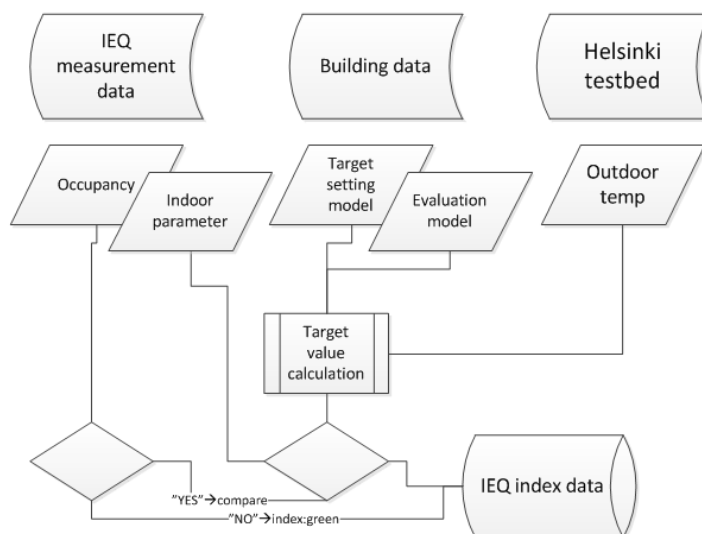
3 Sisäilmastoindeksi

3.1 Indeksien kehitystyö

Sisäilmastoindeksin on luonut lehtori Jorma Säteri, ja sen avulla arvioidaan huonetilan sisäolosuhteiden laatua helppokäyttöisellä liikennevaloesityksellä. Tässä työssä arvioidaan vain huonelämpötilojen vaikutuksia sisäolosuhteisiin. Indeksillä perustuu Sisäilmastoluokitus 2008:n S2-tasoon.

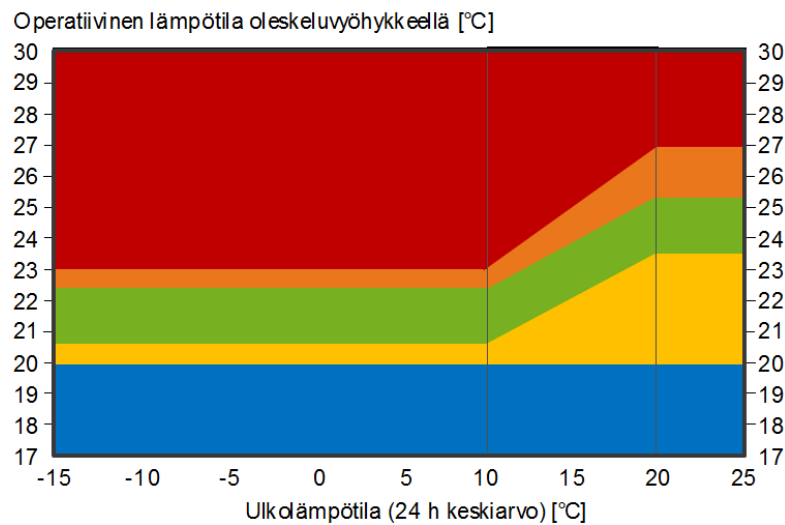
3.2 Indeksien teoria

Kuvassa 5 on esitetty tiedonkeruun ja analysoinnin prosessit. Näistä on tulevaisuudessa tarkoitus kehittää *Helsinki testbed* -tietokanta, jota on mahdollista myöhemmin hyödyntää muissa projekteissa.



Kuva 5. Sisäilmastoindeksin laskennan prosessimalli Jorma Säterin mukaan.

Rakennukselle valitaan haluttu tavoitetaso ja analysoidaan kerätyn datan perusteella, miten hyvin tavoitteisiin päästään. Tavoitetason valintaan vaikuttaa mm. rakennuksen käyttötarkoitus ja valmistumisvuosi. Kuvasta nähdään, että läsnäolodatan hyödyntämistä voidaan pitää vapaaehtoisena. Tässä työssä sitä kuitenkin käytetään niin, että käyttötunnit ovat vakiot. Prosessimalli mahdollistaa myös jatkossa muiden mittauseroimien lisäämisen, joita voivat olla esim. hiilidioksidipitoisuus ja suhteellinen ilmankosteus.



Kuva 6. Sisäolosuhdeindeksin lämpötilojen tavoitearvot.

Kuvassa 6 on esitetty graafinen tulkinta Sisäilmastoluokitus 2008:n S2-tason lämpötilojen tavoitearvoista, joka hyödyntää liikennevaloesitystä. Taulukossa 4 taas on esitetty tavoitearvot matemaattisina funktioina.

Taulukko 4. Huonelämpötilan tavoitearvot matemaattisessa muodossa (3, s. 11).

	S1	S2	S3
Operatiivinen lämpötila $t_{(op)}$ [°C]:			
$t(u) \leq 10$ °C	21,5*	21,5	21
$10 < t(u) \leq 20$ °C	$21,5 + 0,3 \times (t(u) - 10)^*$	$21,5 + 0,3 \times (t(u) - 10)$	$21 + 0,4 \times (t(u) - 10)$
$t(u) > 20$ °C	24,5*	24,5	25
Sallittu poikkeama tavoitearvosta [°C]	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]	$t_{(op)} + 1,5$	$t(u) \leq 10$ °C: $t_{(op)} + 1,5$	$t(u) \leq 15$ °C: 25
		$10 < t(u) \leq 20$ °C:	$t(u) > 15$ °C: $t(u_{max}) + 5$
		$21,5 + 0,4 \times (t(u) - 10)$	
		$t(u) > 20$ °C: 27	
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]	20	20	18
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttäjästä]:			
• toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	-
• asunnot	90 %	80 %	-

* S1-luokassa operatiivisen lämpötilan on oltava tila/huonekohtaisesti aseteltavissa välillä $t_{(op)} \pm 1,5$ °C. Jos samassa huoneessa on useita henkilöitä, käytetään lämpötilan tavoitetasona taulukossa esitettyjä tavoitearvoja.

3.3 Liikennevaloesitys

Sisäilmastoindeksin tulkinna helpottamiseksi käytetään 5-väristä liikennevaloesitystä, joka on esitetty kuvassa 7. Sen tarkoitus on antaa helposti ymmärrettävässä muodossa tietoa käyttäjälle huoneen sisäolosuhteista.

**Kuva 7. Sisäilmastoindeksin 5-pisteinen liikennevaloesitys huonelämpötiloille.**

Siinä vihreä väri on tavoitelämpötila, joka on $21,5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ ulkolämpötilan ollessa korkeintaan 10 °C . Tämän jälkeen sen sallitaan nousta taulukossa 1 esitetyn kaavan mukaan. Keltainen väri esittää tilannetta, jossa ollaan luokan sisällä, mutta alle tavoitelämpötilan. Tässä ollaan, kun operatiivinen lämpötila on $20\text{--}20,5\text{ °C}$. Tavoitelämpötilan ylittävää, mutta luokituksen sisällä olevaa lämpötila-aluetta kuvaa oranssi väri, joka on $22,5\text{--}23\text{ °C}$ ulkolämpötilan ollessa korkeintaan 10 °C ja sen jälkeen nousee taulukon kaavan mukaisesti. Mikäli lämpötila on näiden alueiden ulkopuolella, kuvataan tilannetta punaisella tai sinisellä värillä. Ulkolämpötilana käytetään lämpötilan vuorokauden keskiarvolämpötilaa.

4 Langaton anturiverkko

4.1 Mittauslaitteiston esittely

Projektissa käytettiin suomalaisen Wirepas Oy:n valmistamia langattomia mittausantureita. Yrityksen teknologia on alun perin kehitetty Tampereen teknillisen yliopiston TUTWSN-projektissa (*Tampere university of technology wireless sensor network*) vuosina 2002–2010. Projektissa on ollut käytössä yhteensä 25 kpl mittausantureita ja lisäksi 2 kpl verkkoreittimiä. Mittausantureista 10 kpl on varustettu lämpötila ja valosensoreilla, 10 kpl mittaa edellä mainittujen lisäksi ilmankosteutta ja läsnäolodataa ja 5 kpl kaikkien edellä mainittujen lisäksi hiilidioksidipitoisuutta. Mittausanturit muodostavat langattoman verkon, joka kommunikoi yhteysnoodin kautta verkkopalvelimelle. Palvelimelle on mahdollisuus kirjautua Java-sovelluksen avulla, mittausverkon tunnuksen ja salasanan avulla. Sovelluksessa on monipuoliset työkalut verkon ja mittausdatan tutkimiseen ja mittauksien tulokset voi halutessaan ladata omalle koneelle taulukkomuodossa. Mittalaitteet muodostavat käynnistyttyään automaattisesti verkon ja alkavat suorittamaan mittauksia. Anturit osaavat laajentaa verkkoa niin, että yhteydenpito yhteysnoodille tapahtuu muiden antureiden kautta, jolla voidaan lisätä verkon kantamaa lähes rajattomasti. Mittausverkko on kaikin puolin helppo rakentaa ja saattaa toimintakuntoon.

4.1.1 Mittausantureiden tekniset tiedot

Mittausverkko kommunikoi langattomasti keskenään lisenssivapaalla taajuuskaistalla, joka toimii taajuuksilla 2,4000–2,4835 GHz. Antureiden käyttämän radion kantama sisätiloissa on n. 10–15 m. Lämpötila-anturi on kaikissa mittauslaitteissa Texas Instrumentsin valmistama TMP105. Valovoimakkuusanturi on Agilent ADPS-9002. Sen mittaustuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina, sillä anturin edessä on puoliläpäisevä muovi, joka heikentää anturille saapuvaa valoa merkittävästi. Ilmankosteutta mittaavat anturit sisältävät Parallax SHT11 -ilmankosteusanturin. Hiilidioksidianturi on Figaro CDM4161A. Kaikki muut mittausanturit ovat paristokäyttöisiä, paitsi hiilidioksidianturilla varustetut mittauslaitteet vaativat verkkovirtaa. Myös yhteysnoodit tarvitsevat toimiakseen verkkoyhteyden ja ulkoisen virtalähteen. (6, s. 1–2.)

4.1.2 Mittausantureiden mittaustarkkuuden arviointi

Mittausantureiden toimintaa ja mittaustuloksien tarkkuutta ja poikkeamia haluttiin tutkia ennen varsinaisia huonemittauksia. Kaikki anturit asetettiin samaan huonetilaan niin, että samantyyppiset mittausanturit asetettiin riviin mahdollisimman lähemmäs toisiaan. Huonetila oli normaalissa toimistokäytössä. Referenssimittaukset tehtiin TSI IAQ-Calc 7525 -mittarilla, joka oli kalibroitu joulukuussa 2009. Hiilidioksidimittauksissa mitattiin 40 min keskiarvoa. Koemittaukset suoritettiin 26.12.2010 klo 14.34 toimistohuoneessa ETYA1113. Taulukossa 5 on esitetty mittaustulokset.

Taulukko 5. Koemittausten mittauspöytäkirja.

Mittausanturin numero / funktio	Lämpötila, °C	Suhteellinen ilmankosteus, %	Hiilidioksidipitoisuus, ppm
Referenssimittaus	22,1		
1. Lämpötila	21,8 (-0,3 °C)		
3. Lämpötila	21,5 (-0,6 °C)		
5. Lämpötila	21,4 (-0,7 °C)		
6. Lämpötila	21,8 (-0,3 °C)		
7. Lämpötila	21,5 (-0,6 °C)		
8. Lämpötila	21,5 (-0,6 °C)		
12. Lämpötila	21,9 (-0,2 °C)		
17. Lämpötila	21,4 (-0,7 °C)		
19. Lämpötila	21,5 (-0,6 °C)		
23. Lämpötila	21,6 (-0,5 °C)		
Referenssimittaus	22,0	20,0	
11. Lämpötila-RH	21,4 (-0,6 °C)	17,9 (-2,1 %-yks.)	
14. Lämpötila-RH	21,7 (-0,3 °C)	17,5 (-2,5 %-yks.)	
15. Lämpötila-RH	21,6 (-0,4 °C)	18,0 (-2,0 %-yks.)	
16. Lämpötila-RH	21,4 (-0,6 °C)	17,7 (-2,3 %-yks.)	
18. Lämpötila-RH	21,5 (-0,5 °C)	17,7 (-2,3 %-yks.)	
20. Lämpötila-RH	21,3 (-0,7 °C)	17,8 (-2,2 %-yks.)	
21. Lämpötila-RH	21,4 (-0,6 °C)	19,0 (-1,0 %-yks.)	
22. Lämpötila-RH	21,5 (-0,5 °C)	19,3 (-0,7 %-yks.)	
24. Lämpötila-RH	21,5 (-0,5 °C)	18,0 (-2,0 %-yks.)	
25. Lämpötila-RH	21,4 (-0,6 °C)	17,9 (-2,1 %-yks.)	
Referenssimittaus	21,9	18,7	586
2. Lämpötila-RH-CO2	21,8 (-0,1 °C)	17,4 (-1,3 %-yks.)	616 (+30 ppm)
4. Lämpötila-RH-CO2	22,0 (+0,1 °C)	16,8 (-1,9 %-yks.)	594 (+8 ppm)
9. Lämpötila-RH-CO2	21,9 (-0,0 °C)	17,9 (-0,8 %-yks.)	603 (+17 ppm)
10. Lämpötila-RH-CO2	22,1 (+0,2 °C)	16,3 (-2,4 %-yks.)	579 (-7 ppm)
13. Lämpötila-RH-CO2	21,8 (-0,1 °C)	17,0 (-1,7 %-yks.)	599 (+13 ppm)

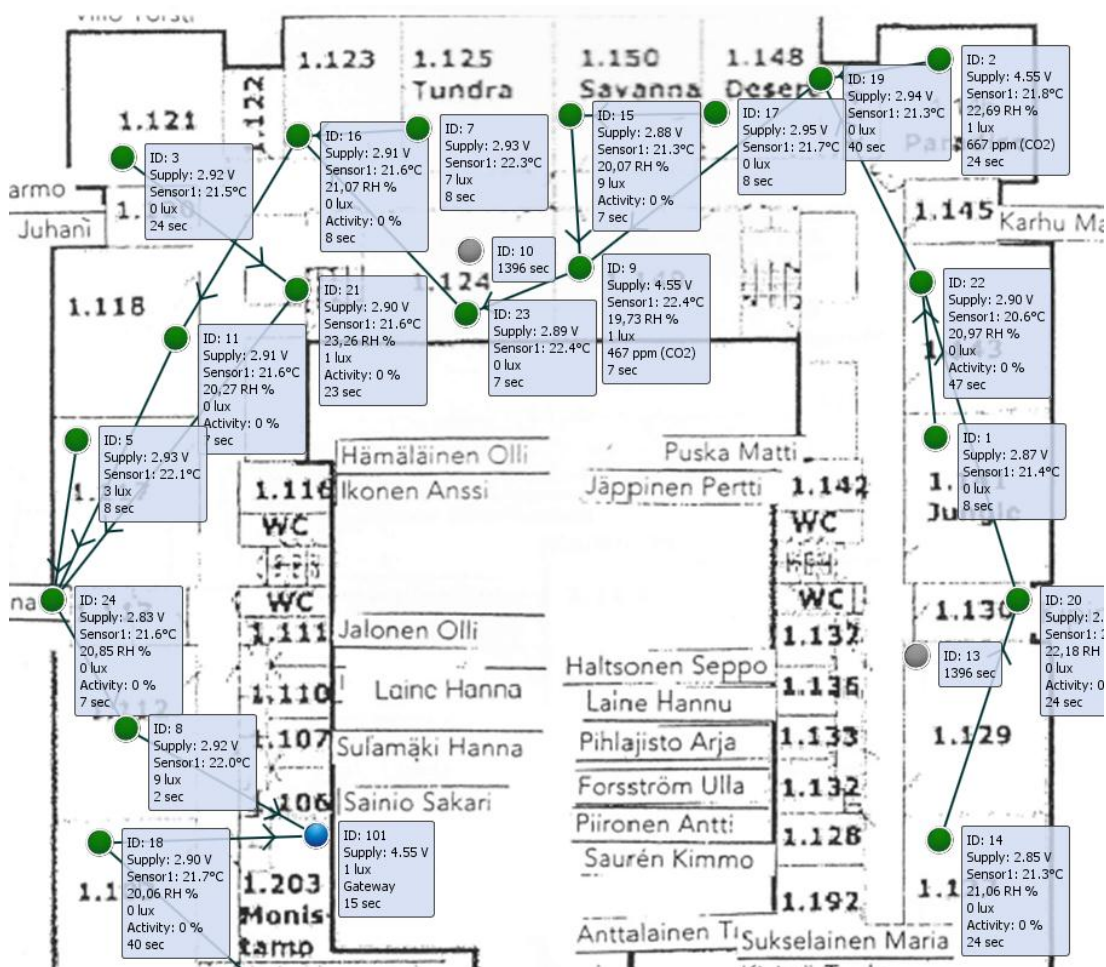
Käytetty testialusta ei vastannut laboratorio-olosuhteita, mutta mittausten perusteella voidaan arvioida ainakin lämpötila- ja hiilidioksidipitoisuusmittausten yltävän riittävään mittaustarkkuuteen.

Wirepas Oy lupaa mittausantureiden mittaustarkkuudeksi lämpötila-antureille vaatimattoman $\pm 2,0$ °C, kosteusantureille $\pm 2,0$ %. Hiilidioksidianturin mittausalue on 400–4000 ppm ja mittaustarkkuus $\pm 20,0$ %. (6, s. 1–2.)

4.2 Wirepas Control Panel -käyttöliittymä

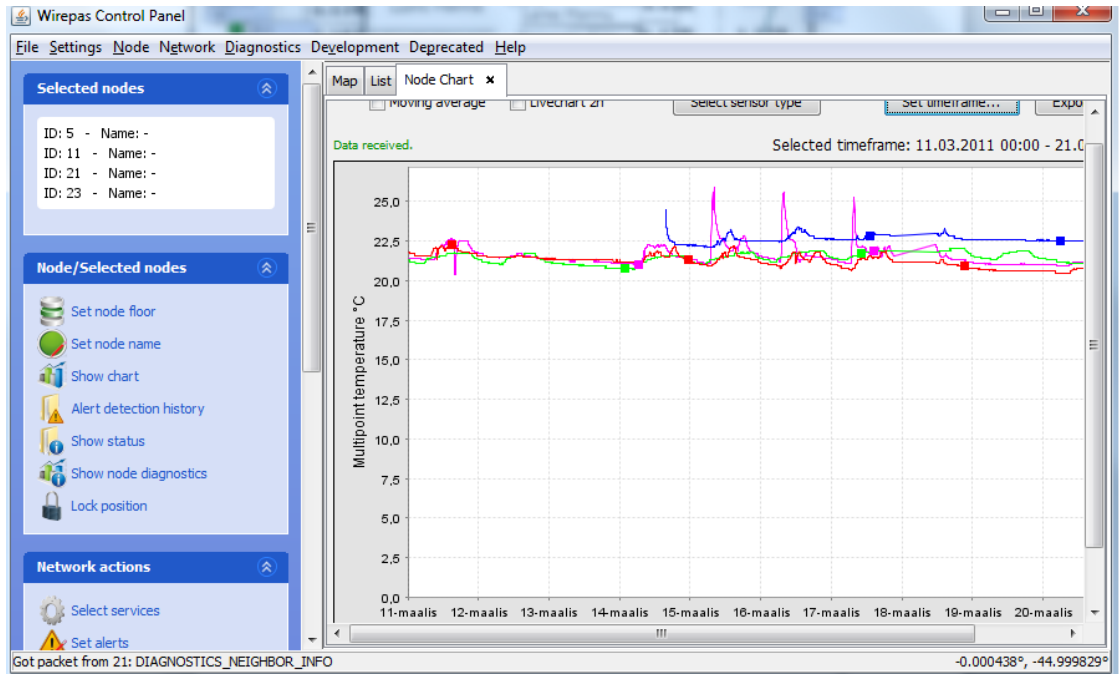
Wirepas Oy:n valmistama langaton verkko hyödyntää helppokäyttöistä Java-pohjaista käyttöliittymää. Yritykseltä täytyy ostaa palvelun vuosisopimus, joka mahdollistaa oman verkon seurannan.

Sovellukseen ladattiin rakennuksen pohjakuvat, jotka helpottaa antureiden seuranta. Sovelluksen perusnäkyästä voidaan seurata mittausantureiden reaaliaikaisia mittausarvoja. Kuvassa 8 on esitetty käyttöliittymän perusnäky. Kuvasta näkee hyvin myös, kuinka antureiden välinen reititys toimii kaukaisimmalta anturilta yhteysnoodille.



Kuva 8. Wirepas Oy:n langattoman anturiverkon käyttöliittymän perusnäky.

Sovellus osaa piirtää mittaustuloksista erilaisia käyriä ja mahdollistaa tulosten siirtämisen taulukkomuotoon. Esimerkki sovelluksen lämpötilakäyrästä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Ohjelman piirtämä lämpötiläkäyrä.

5 Mittausjärjestelyt

5.1 Rakennuksen esittely

Langaton mittausverkko pystytettiin Metropolia ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteessä maaliskuussa 2011. Toimipisteen osoite on Vanha Maantie 6, Espoo. Rakennus on valmistunut vuonna 1988, ja on rakennettu tuolloisen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti. Leppävaaran yksikössä on kirjoilla n. 2 200 opiskelijaa. Rakennus on saanut uuden lisäosan vuonna 2002. Mittaukset keskittyvät ainoastaan rakennuksen vanhaan osaan, jonka sisäolosuhteista pyritään mittausten avulla saamaan mahdollisimman kattava kuva. Rakennukselta ei kuitenkaan edellytetä Sisäilmastoluokituksen S2-luokan sisäolosuhteiden täyttymistä, mutta sitä voidaan pitää hyvänä tavoitetasona. Uudemman osan rakennusautomaatiikkaan on jo liitetty lämpötila-antureita, joten sinne ei ollut yhtä mielenkiintoista lisätä uusia antureita.

Oppilaitoksen tilat ovat käytössä arkisin klo 8–20, 12 tuntia vuorokaudessa. Päiväopetusta annetaan nuorisoasteen ammattikorkeakouluopiskelijoille ja iltaopetus on suunnattu aikuisopiskelijoille, jotka opiskelevat usein työn ohessa. Viikonloppuisin opetusta ei järjestetä, mutta koulun ovet ovat lauantaisin auki. Läsnaolodatan käsittelyn helpottamiseksi oletetaan, että kaikki tilat ovat käytössä arkisin klo 8–20.

Normaali oppitunti kestää 45 minuuttia, jonka jälkeen on 15 minuutin tauko. Poikkeuksena on lounastauko n. 30 minuuttia. Mittauslaitteet on asetettu lähettämään valmistajan suosituksen mukaisesti mittausdataa 5 minuutin välein, jolloin nämä tauot otetaan huomioon mittaustuloksissa.

Luokkahuoneiden huonelämpötilaa säätelevät lämmityspattereiden termostaattiventtiilit. Lisäksi ikkunoihin on asennettu sälekaihtimet, joilla voidaan ehkäistä auringonvalon suoraa vaikutusta huonelämpötilaan. Sälekaihtimien asento on kuitenkin käyttäjien muutettavissa, ja näin ollen auringonpaiste luokkatilaan voi vaikuttaa mittaustuloksiin.

5.2 Antureiden sijoitus

5.2.1 Mittausantureiden sijoitus huonetiloissa

Sisäilmastoluokitus 2008:ssa on esitetty huonelämpötilamittausten vaatimukset. Lämpötilaa tulisi mitata keskeltä huonetta 1,1 metrin korkeudelta lattiasta. Antureiden sijoitus keskelle huonetilaa ei ole kuitenkaan käytännöllistä, ja ne on sijoitettu huoneen sisäseinälle 1,1 metrin korkeudelle. Antureiden viereen asetettiin ilmoitus, joissa pyydetään käyttäjiä olemaan koskematta mittausantureihin. Kuvassa 10 on esitetty kuva mittausanturista. (3, s. 11.)



Kuva 10. Mittausanturi luokkatilassa.

5.2.2 Mittausantureiden sijaintipöytäkirja

Pöytäkirjaan kirjattiin ylös antureiden tarkat sijainnit, joka helpottaa antureiden seuranta. Sen perusteella ne asetettiin käyttöliittymän pohjakuvaan oikeille paikoilleen. Mittauslaitteiden sijaintipöytäkirja löytyy liitteestä 2.

5.3 Ulkolämpötiladata

Sisäilmastoindeksin käytössä tarvitaan lähtötietoina vuorokauden keskilämpötilaa, joka vaikuttaa sallittuihin lämpötilarajoihin. Vuorokauden keskilämpötilat haettiin manuaalisesti Ilmatieteen laitoksen *FMI Testbed* -tietokannasta. Projektissa käytetty mittauspiste sijaitsee Helsingin olympiastadionilla, n. 10 km:n päässä Leppävaarasta.

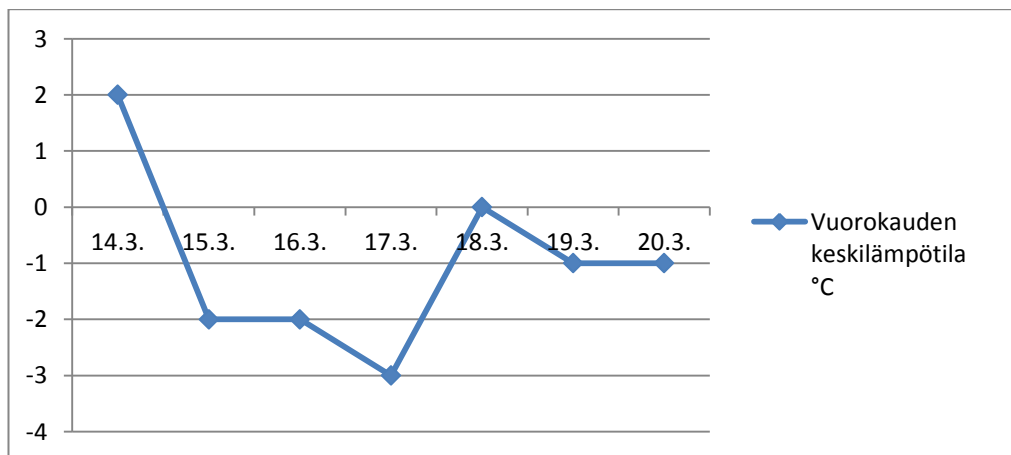
6 Mittaustulokset

6.1 Mittausajankohta

Mittaukset haluttiin saada käyntiin heti, kun mittausanturit saatiin asennettua luokkahuoneisiin. Mittausdatan perusteella hyväksi mittausaikaväliksi havaittiin viikko 11, 14.–20.3.2011. Ajankohdan valinnassa pyrittiin siihen, että luokkahuoneissa olisi normaali käyttökuormitus.

6.2 Vuorokauden keskilämpötilamittaukset

Vuorokauden keskilämpötilat vaihtelivat mittausvälin aikana -3 °C :n ja 2 °C :n välillä. Loppukeväästä lämpötila ei enää juurikaan ollut kovempia pakkasia. Kevätaurinko paistoi mittausviikolla, ja sen voidaan olettaa vaikuttaneen huonelämpötiloihin. Kuvassa 11 on esitetty mittausviikon vuorokausien keskilämpötilat.



Kuva 11. Vuorokauden keskilämpötilat mittausviikolla (7).

6.3 Huoneistokohtaiset mittaustulokset

Mittausten tarkoituksena oli saada mahdollisimman kattava kuva ammattikorkeakoulun vanhan osan sisäolosuhteista. Mittaukset keskittyivät ainoastaan luokkatiloihin, vaikka antureita sijoitettiin myös työhuoneisiin. Jokaista huonetilaa ei käsitellä tässä insinööriyöraportissa yksityiskohtaisesti, vaan samankaltaisia tiloja yhdisteltiin. Huonekohtaisessa analyysissä laadittiin koko viikon kattava liikennevaloesitystä

hyödyntävä graafi, joka esittää sisäolosuhteiden laatua kyseisessä huonetilassa. Lisäksi esitetään perinteinen lämpötiläkäyrä mittaustuloksista.

6.4 Luokkahuonekohtainen tarkastelu

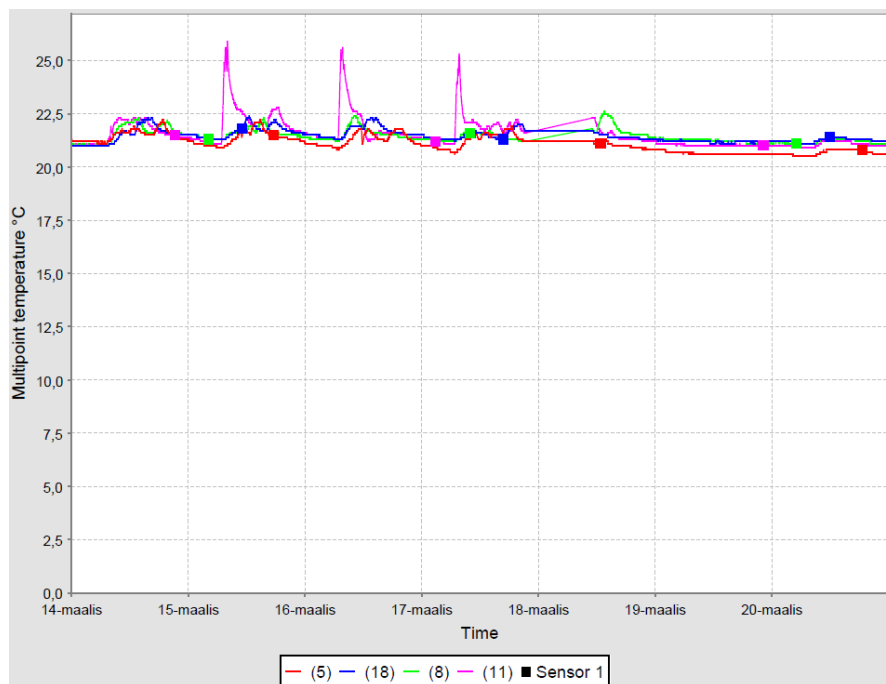
6.4.1 Luokkahuone ETYA1112

Rakennuksen pohjakuvat ovat liitteessä 3. Ensimmäisessä tarkastelussa vertaillaan neljää vierekkäistä luokkahuonetta pohjakuvan vasemmalta reunalta. Taulukosta 6 nähdään, että istumapaikkojen lukumäärät ja ilmanvaihto ovat luokkahuoneissa lähes identtisiä. Istumapaikkojen vertailussa täytyy ottaa huomioon, että luokkahuoneet ovat kuitenkin vain harvoin täysin kuormitettuja.

Taulukko 6. Luokkahuoneiden perustiedot.

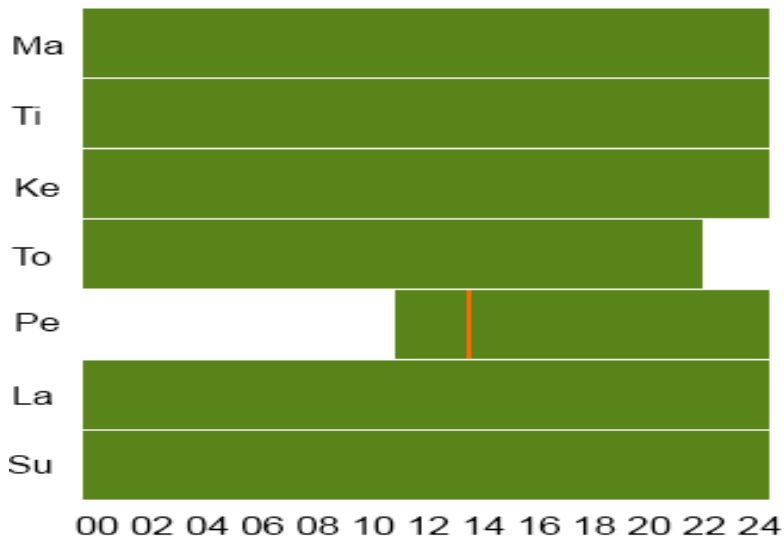
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto ($\pm \text{dm}^3/\text{s}$)
5	ETYA1117	30	258
8	ETYA1112	35	258
11	ETYA1118	30	258
18	ETYA1103	35	258

Kuvassa 12 on esitetty kaikkien neljän luokkahuoneen lämpötiläkäyrät. Anturin 11 korkeat lämpötilapiikit johtuvat aamuauringon paisteesta suoraan mittausanturiin.



Kuva 12. Neljän luokkahuoneen mittausantureiden lämpötiläkäyrät.

Vertailukelpoisimmaksi anturiksi tästä neljän anturin ryhmästä valittiin anturi numero 8. Kuvassa 13 on esitetty sisäilmastoindeksiä ja liikennevaloesitystä hyväksi käyttäen luokkahuoneen sisäolosuhteet. Valkoinen väri kuvaa mittaustuloksien epäjatkuvuuskohtaa, joka johtui teknisestä häiriöstä. Kuvasta nähdään, että luokkahuonetilan sisäilmasto oli mittausten perusteella erinomainen.



Kuva 13. Mittausanturi 8:n sisäilmastoindeksiin perustuva liikennevaloesitys.

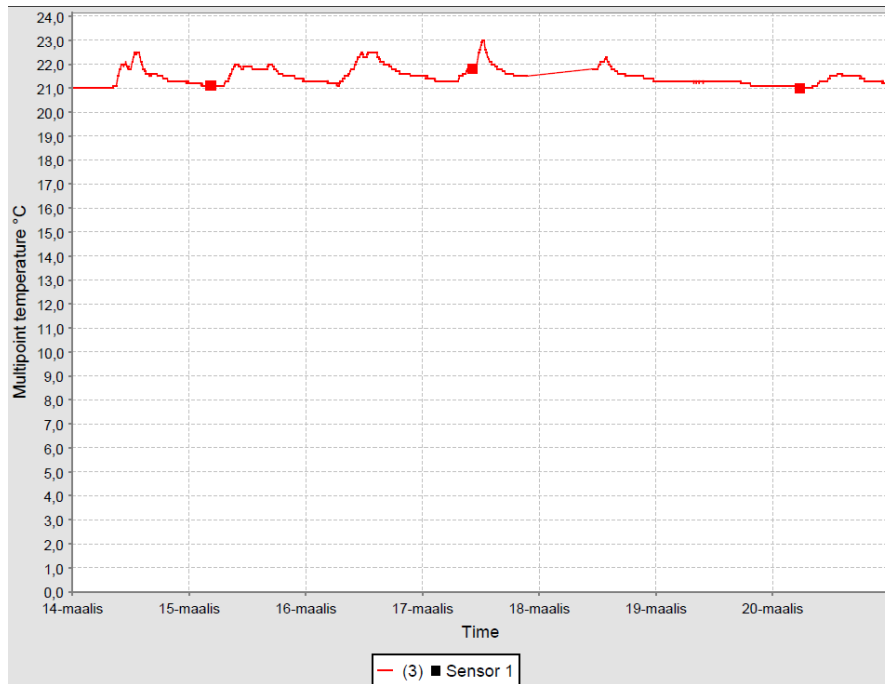
6.4.2 Luokkahuone ETYA1121

Luokkahuone ETYA1121 sijaitsee pohjakuvasta katsottuna vasemmassa ylänurkassa. Nurkkahuoneissa on pieniä ikkunoita, joissa ei ole sälekaihtimia. Ulkoseinäpinta-alaa on kuitenkin enemmän kuin muissa luokkahuoneissa. Taulukossa 7 on esitetty huoneen perustiedot.

Taulukko 7. Luokkahuoneen perustiedot.

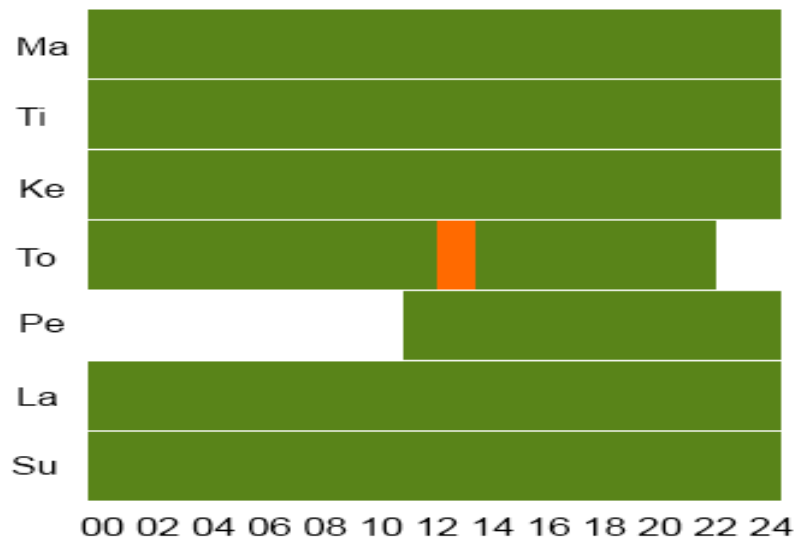
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto (\pm dm ³ /s)
3	ETYA1121	35	258

Huonelämpötilakäyrä on esitetty kuvassa 14. Huonelämpötilan nousut käyttöaikana pysyvät varsin maltillisina.



Kuva 14. Luokkahuoneen ETYA1121 lämpötilakäyrä.

Kuvassa 15 on esitetty sisäilmasto-olosuhteet liikennevaloesitystä hyväksi käyttäen. Tämänkin luokkahuoneen sisäilmasto on esityksen perusteella oikein hyvä.



Kuva 15. Mittausanturi 3:n liikennevaloesitys.

6.4.3 Luokkahuone ETYA1149

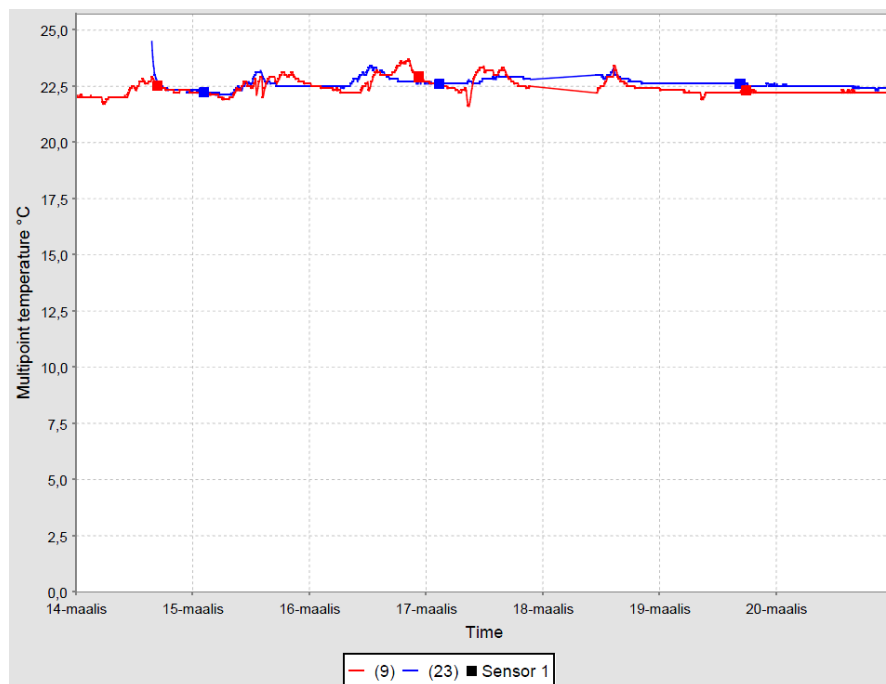
Luokkahuoneet ETYA1149 ja ETYA1124 ovat vierekkäisiä ja lähes identtisiä luokkahuoneita. Ilmanvaihto huoneissa on mitoitettu huomattavasti pienemmälle opiskelijamäärälle kuin luokkahuoneen opiskelupaikat edellyttävät.

Rakentamismääräyskokoelma D2:n (2010) mukaan opiskelutiloissa tuloilmamäärän tulisi olla vähintään 6 dm³/s henkilöä kohden. Näin ollen tuloilmamäärän tulisi olla vähintään 360 dm³/s. Näissä opetustiloissa se on kuitenkin huomattavasti pienempi. Taulukossa 8 on esitetty tarkemmat perustiedot. (8, s. 26.)

Taulukko 8. Luokkahuoneiden perustiedot.

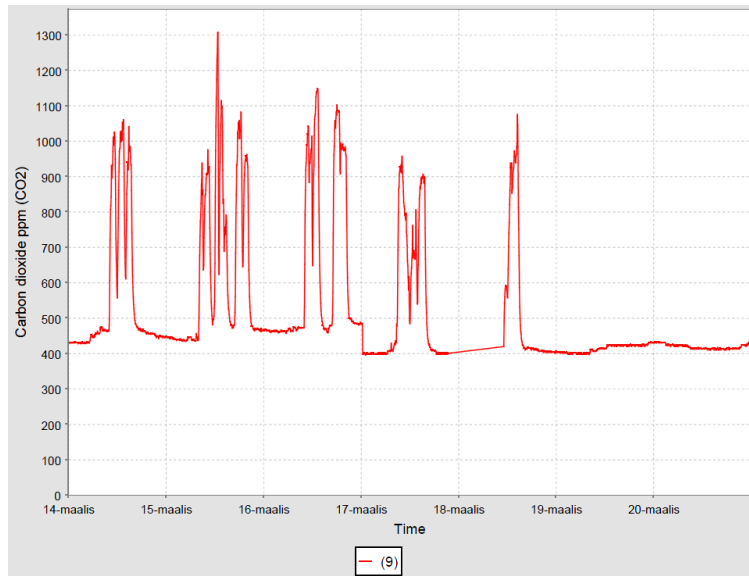
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto (\pm dm ³ /s)
9	ETYA1149	60	258
23	ETYA1124	60	258

Luokkahuoneen ETYA1124:n mittausanturi asennettiin ensimmäisen mittauspäivän aikana, minkä vuoksi anturin 23 mittauksia alkavat vasta maanantai-iltapäivällä. Kuvasta 16 nähdään, että lämpötilat ovat luokkahuoneissa huomattavasti korkeammat kuin edellisissä luokkahuoneissa.



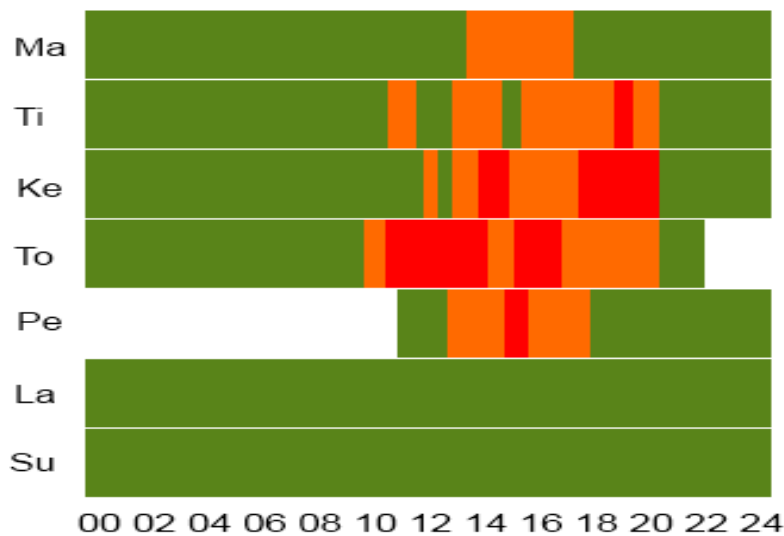
Kuva 16. Kahden luokkahuoneen lämpötilakäyrät.

Luokkahuoneeseen asennettu mittausanturi mittasi myös hiilidioksidipitoisuutta. Kuvasta 17 nähdään, että hiilidioksidipitoisuus nousi ajoittain yli 1 100 ppm:n, mitä voidaan pitää varsin suurena pitoisuutena. Sisäilmastoluokitus 2008:n S2-tason mukaan hiilidioksidipitoisuuden tulisi pysyä alle 900 ppm, kun olosuhteiden pysyvyyttä tarkastellaan hiilidioksidipitoisuuden yhden tunnin liukuvan keskiarvon avulla. (3, s. 14.)



Kuva 17. Luokkahuoneen ETYA1149 hiilidioksidipitoisuuskäyrä.

Kuvan 18 liikennevaloesityksestä voidaan helposti nähdä, että huonetilassa on selkeitä ongelmia liian suuren huonelämpötilan takia. Suuret opiskelijamäärät luokkatiloissa ovat todennäköisesti suurin yksittäinen syy ongelmiin.



Kuva 18. Mittausanturi 9:n liikennevaloesitys.

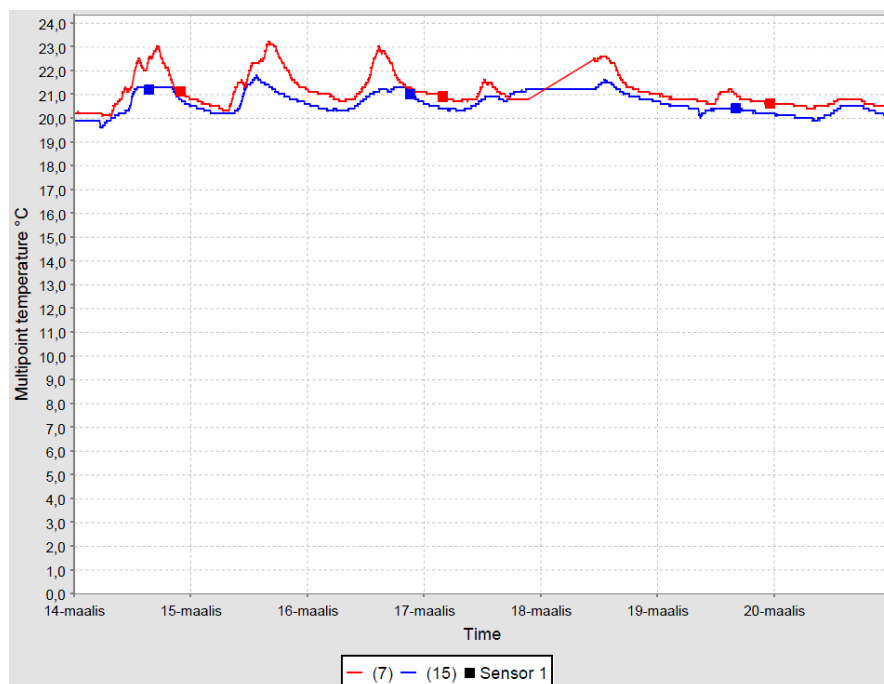
6.4.4 Atk-luokkahuone ETYA1125

Luokkahuoneet ETYA1125 ja ETYA1150 ovat lähes identtisiä atk-luokkahuoneita. Taulukossa 9 on esitetty huoneiden perustiedot. Luokkahuoneissa on atk-pääteasemia yhtä paljon kuin istumapaikkoja, ja näistä aiheutuu luonnollisesti ylimääräistä lämpökuormaa.

Taulukko 9. Luokkahuoneiden perustiedot.

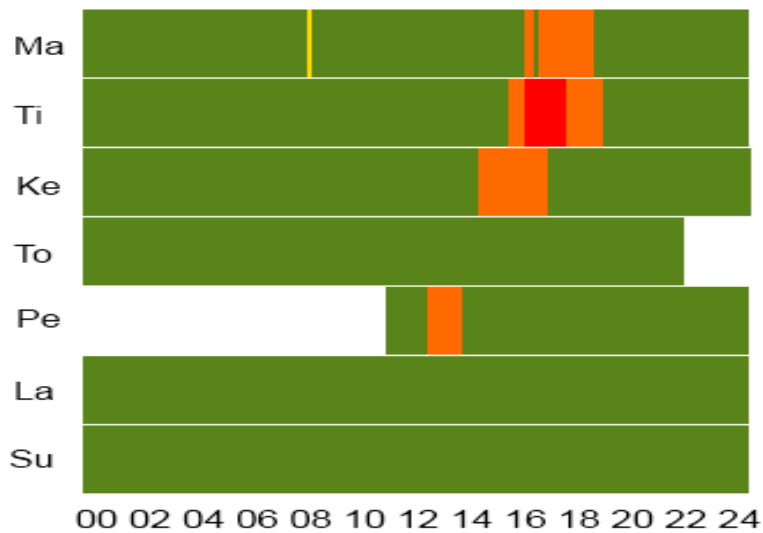
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto ($\pm \text{dm}^3/\text{s}$)
7	ETYA1.125	25	258
15	ETYA1.150	25	258

Atk-luokkahuoneen ETYA1125 arvioitiin olleen kovemmassa kuormituksessa mittausviikolla, joten siitä laadittiin analyysidiagrammi. Kuvassa 19 on esitetty molempien luokkahuoneiden huonelämpötiläkäyrät.



Kuva 19. Kahden luokkahuoneen lämpötiläkäyrät.

Luokkahuoneissa on kuvan 20 liikennevaloesityksen perusteella havaittavissa iltpäivisin kohtuullisia lämpötilojen nousuja.



Kuva 20. Mittausanturi 7:n liikennevaloesitys.

6.4.5 Luokkahuone ETYA1123

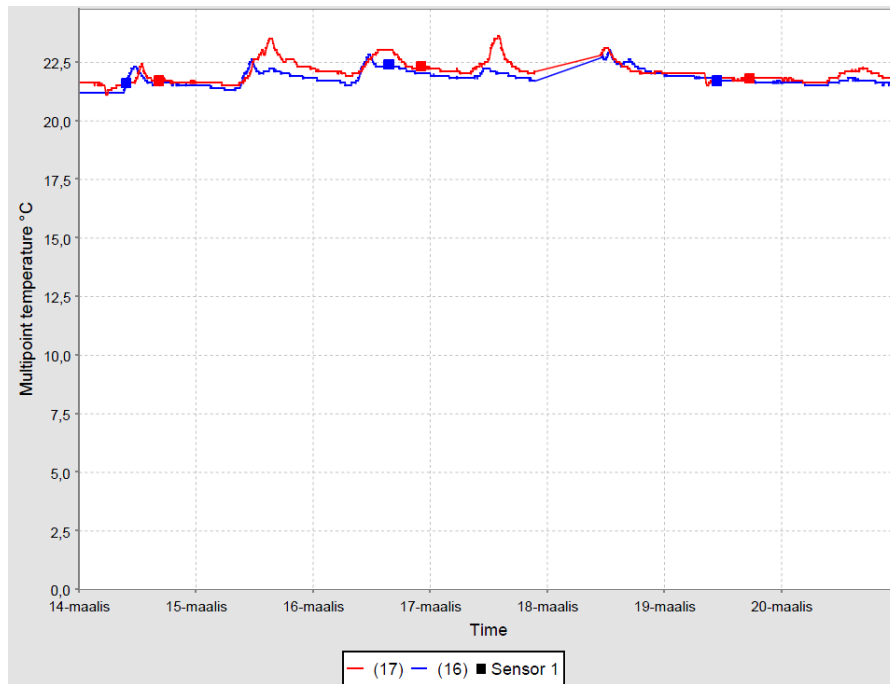
Luokkahuoneet ETYA1123 ja ETYA1148 ovat kooltaan hieman muita luokkahuoneita pienempiä. Myös ilmamäärät ovat hieman muita luokkahuoneita pienemmät.

Taulukossa 10 on esitetty huoneiden perustiedot.

Taulukko 10. Luokkahuoneiden perustiedot.

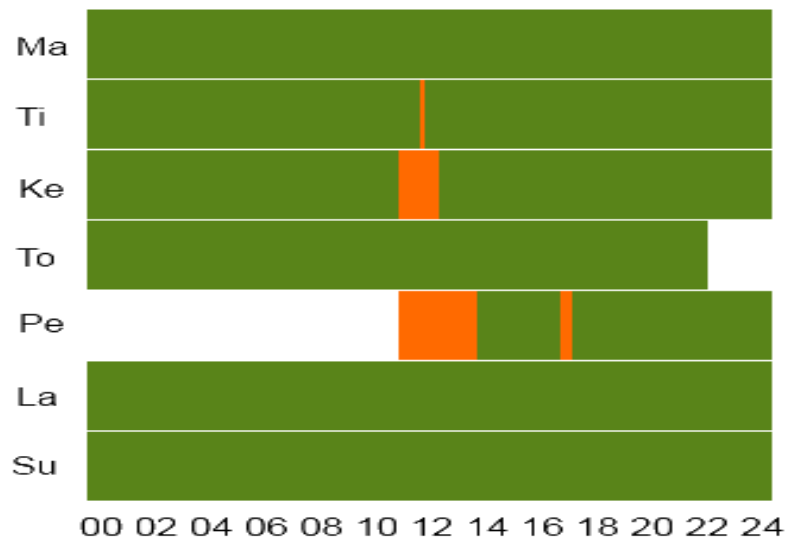
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto (\pm dm ³ /s)
16	ETYA1123	25	180
17	ETYA1148	25	180

Kuvassa 21 on esitetty huonelämpötilakäyrät. Niiden perusteella luokkahuoneiden lämpötilat eivät merkittävästi poikkea toisistaan.



Kuva 21. Kahden luokkahuoneen lämpötilakäyrät.

Kuvan 22 liikennevaloesityksestä nähdään, että luokkahuoneiden sisäolosuhteet ovat varsin hyvät.



Kuva 22. Mittausanturi 16:n liikennevaloesitys.

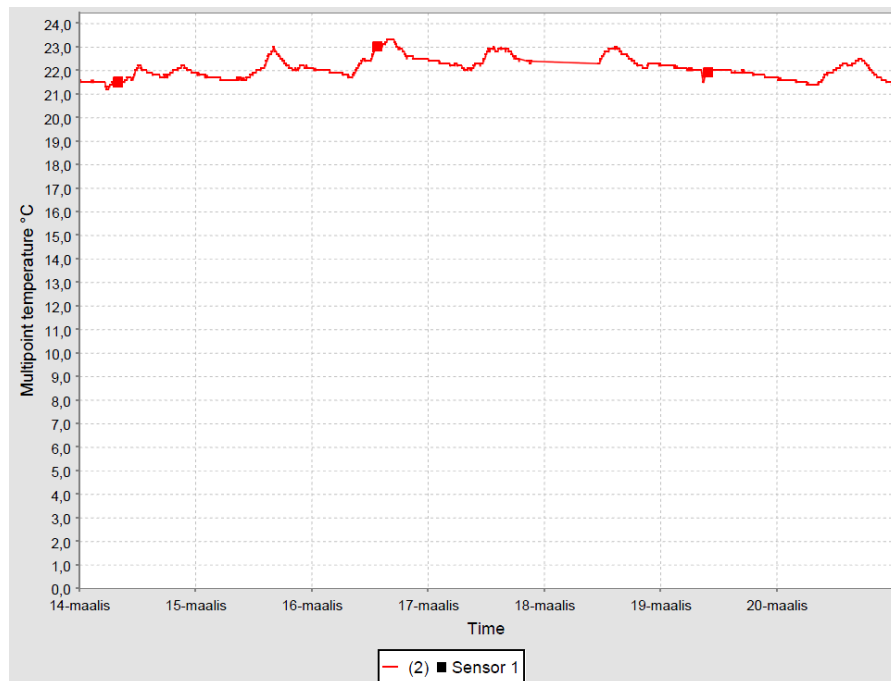
6.4.6 Seminaariluokkahuone ETYA1146

Luokkahuone ETYA1146 sijaitsee pohjakuvan oikeassa ylänurkassa. Luokkahuoneen perustiedot on esitetty taulukossa 11. Luokkahuone toimii pääasiassa seminaarien ja esitysten pitopaikkana.

Taulukko 11. Luokkahuoneen perustiedot.

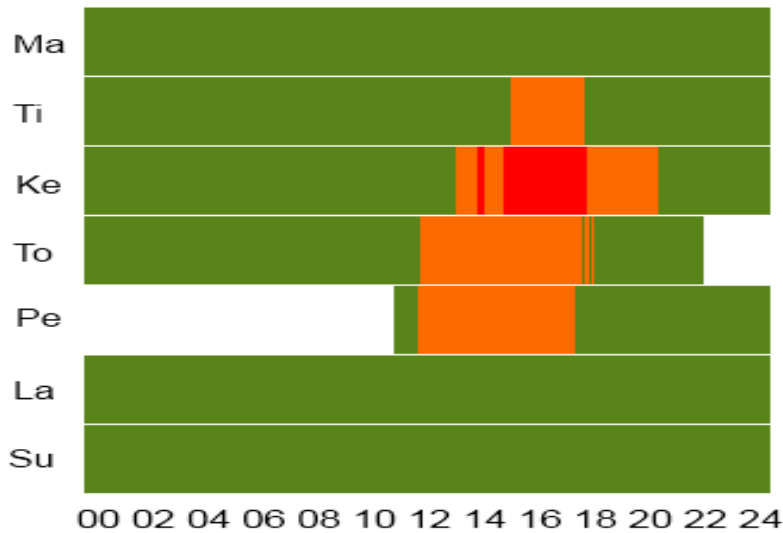
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto ($\pm \text{dm}^3/\text{s}$)
2	ETYA1146	20	264

Luokkahuoneen lämpötiläkäyrä on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Luokkahuoneen ETYA1146:n lämpötiläkäyrä.

Kuvan 24 liikennevaloesityksestä nähdään, että luokkahuoneessa on selkeitä yllämpenemisongelmia iltopäivisin.



Kuva 24. Mittausanturi 2:n liikennevaloesitys.

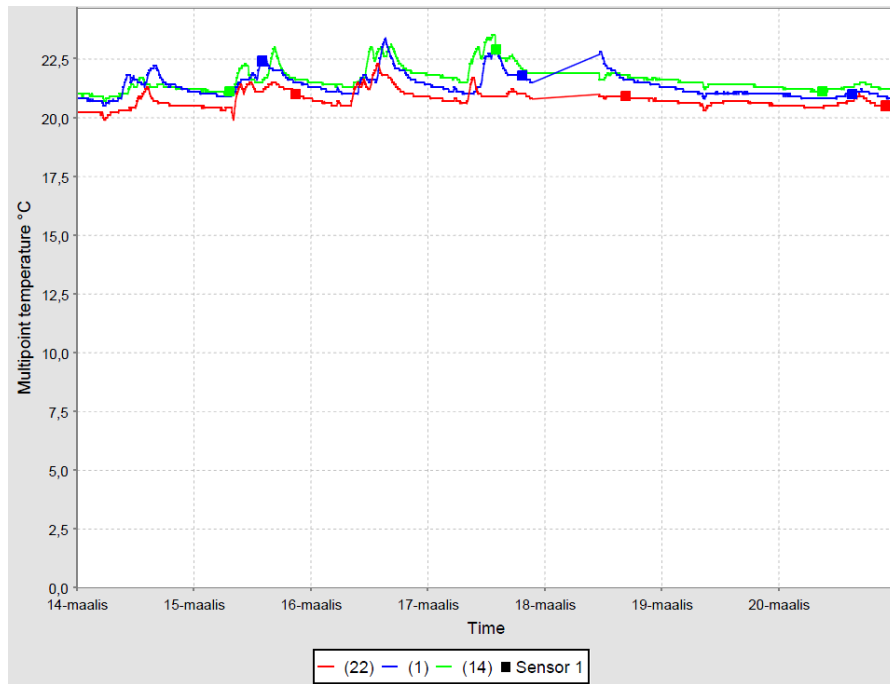
6.4.7 Atk-luokkahuone ETYA1141

Kolmen vierekkäisen luokkahuoneen ryhmä otettiin yhteisvertailuun, sillä niiden lämpötilakäyrät olivat hyvin samankaltaiset. ETYA1141 on lähimpänä näiden tilojen keskimääräistä huonelämpötilaa. Kaksi muuta luokkahuonetta eivät ole atk-luokkia, mutta niiden opiskelijamäärät ovat suurempia, ja näin ollen niissä voi olla vastaava lämpökuorma. Taulukossa 12 on esitetty luokkahuoneiden perustiedot.

Taulukko 12. Luokkahuoneiden perustiedot.

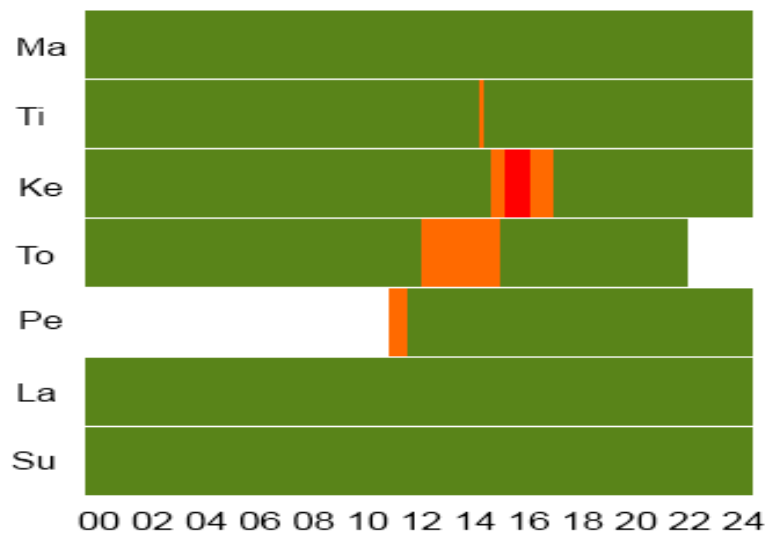
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto (\pm dm ³ /s)
1	ETYA1141	25	258
14	ETYA1127	40	258
22	ETYA1143	40	258

Kuvassa 25 on esitetty kolmen luokkahuoneen lämpötilakäyrät.



Kuva 25. Kolmen luokkahuoneen lämpötilakäyrät.

Kuvan 26 liikennevaloesityksestä nähdään, että näissäkin tiloissa on pieniä yllilämpenemisongelmia.



Kuva 26. Mittausanturi 1:n liikennevaloesitys.

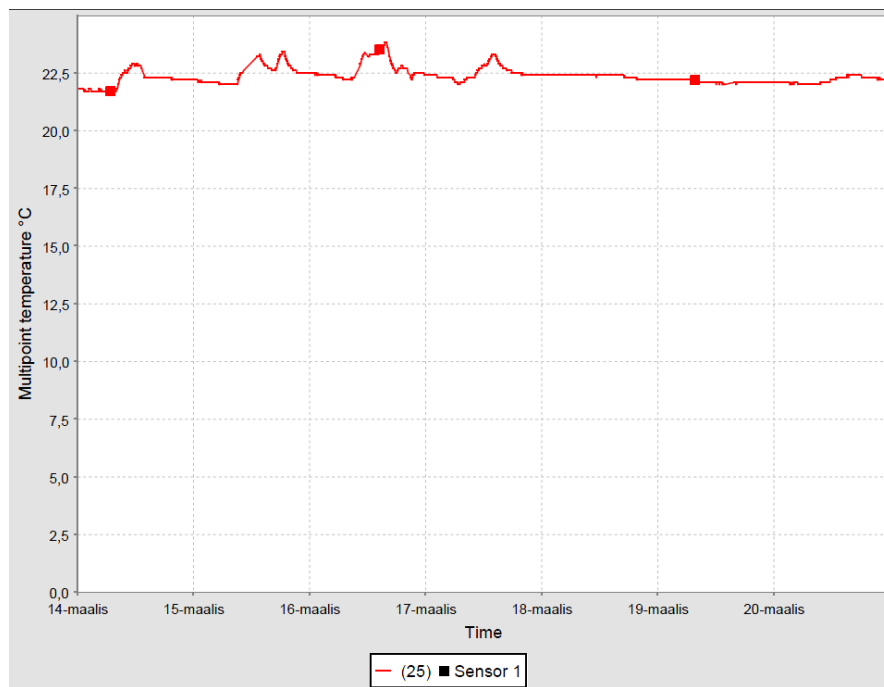
6.4.8 Luokkahuone ETYA2131

Luokkahuone ETYA2131 sijaitsee rakennuksen toisessa kerroksessa. Taulukossa 13 on esitetty luokkahuoneen perustiedot.

Taulukko 13. Luokkahuoneen perustiedot.

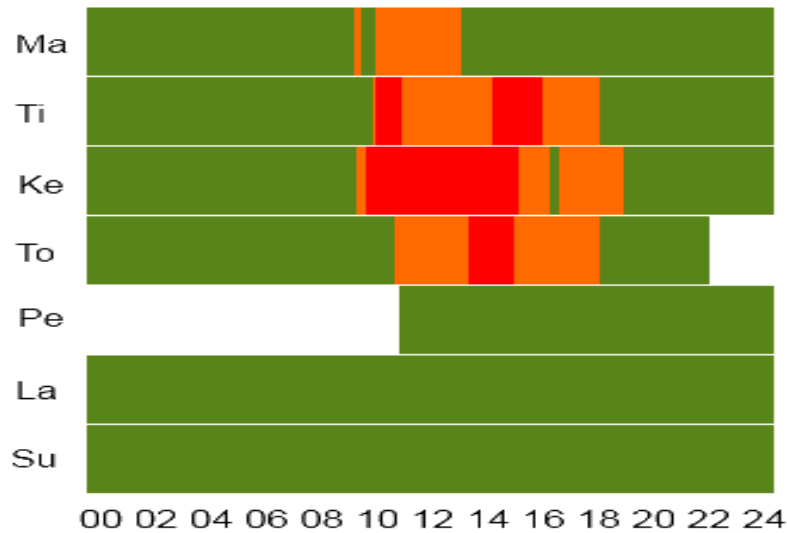
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto ($\pm \text{dm}^3/\text{s}$)
25	ETYA2131	35	258

Kuvan 27 lämpötiläkäyrästä nähdään, että huonelämpötila oli lähes jatkuvasti vähintään 22 °C. Huonelämpötila ei kuitenkaan noussut tästä peruslämpötilasta paljoakaan. Voidaan siis tehdä johtopäätös, että huonetta todennäköisesti lämmitetään liikaa, sillä lämpötila ei juurikaan laske edes yöaikaan.



Kuva 27. Luokkahuoneen ETYA2131 lämpötiläkäyrä.

Kuvan 28 liikennevaloesityksestä nähdään ongelmat liian suurina huonelämpötiloina.



Kuva 28. Mittausanturi 25:n liikennevaloesitys.

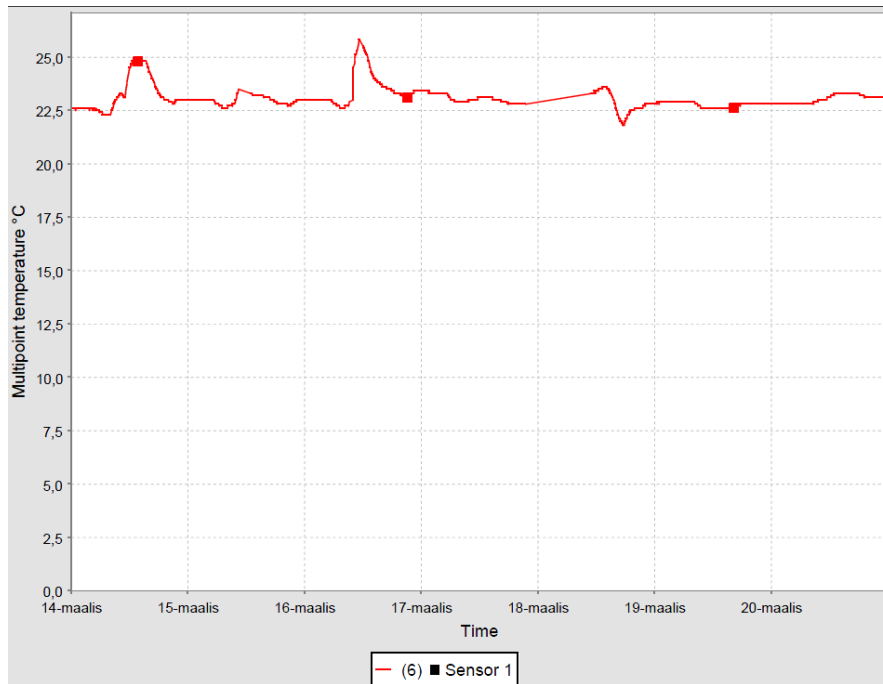
6.4.9 Atk-luokkahuone ETYA2130

Taulukossa 14 on esitetty luokkahuoneen ETYA2130 perustiedot. Atk-luokkahuone sijaitsee rakennuksen toisessa kerroksessa.

Taulukko 14. Luokkahuoneen perustiedot.

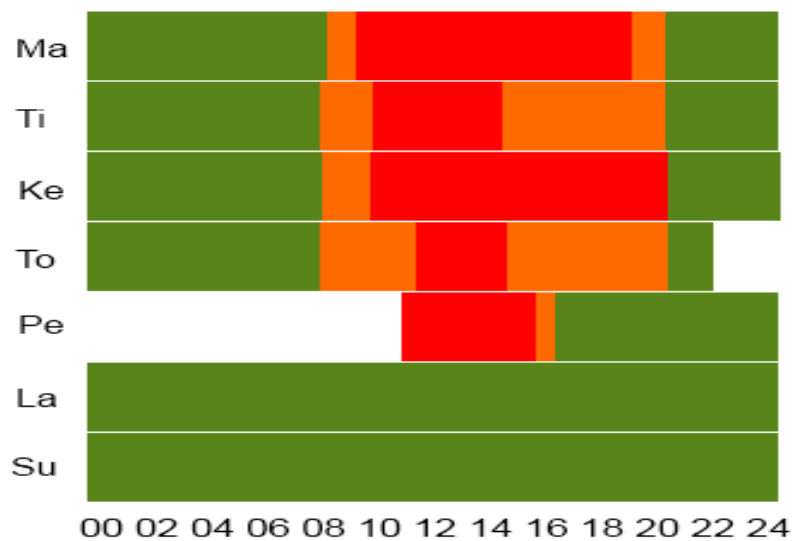
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto (\pm dm ³ /s)
6	ETYA2130	25	258

Kuvassa 29 on esitetty luokkahuoneen lämpötilakäyrä. Epätavalliset lämpötilapiikit maanantain ja keskiviikon kohdalla voivat johtua suoraan mittausanturiin kohdistuneesta auringonpaisteesta.



Kuva 29. Luokkahuoneen ETYA2130 lämpötiläkäyrä.

Kuvan 30 liikennevaloesitys kertoo selvästi, että luokkahuone on liian kuuma.



Kuva 30. Mittausanturi 6:n liikennevaloesitys.

6.4.10 Atk-luokkahuone ETYA2123

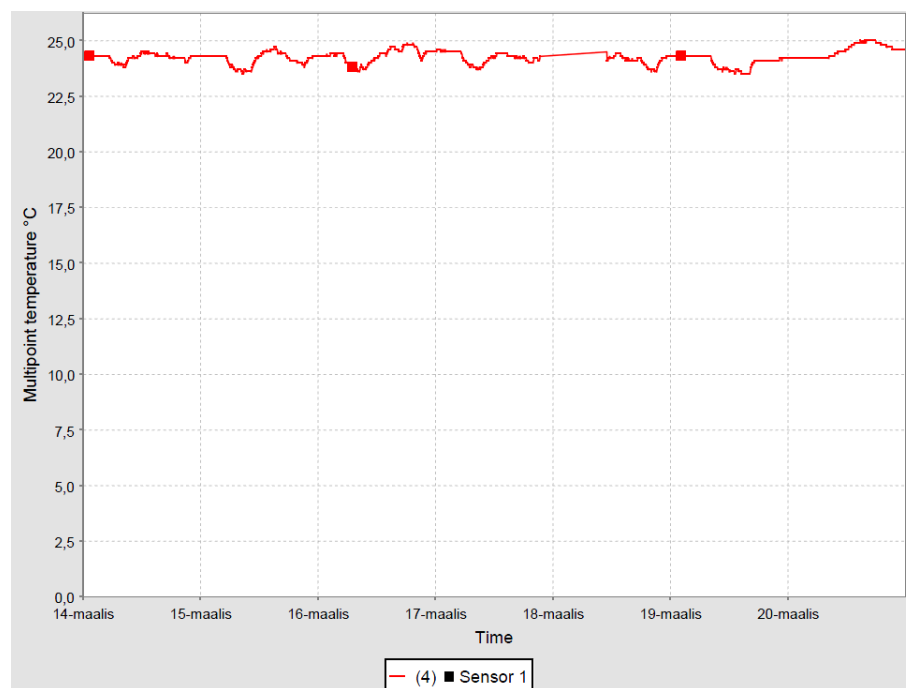
Luokkahuone ETYA2123 sijaitsee rakennuksen toisessa kerroksessa. Siellä on runsaasti tietotekniikkaa, ja se aiheuttaa merkittävää lämpökuormaa. Huonetilassa on myös kaksi

jäähdytyskonetta, mutta ne eivät olleet mittausaikana päällä. Taulukossa 15 on esitetty luokkahuoneen perustiedot.

Taulukko 15. Luokkahuoneen perustiedot.

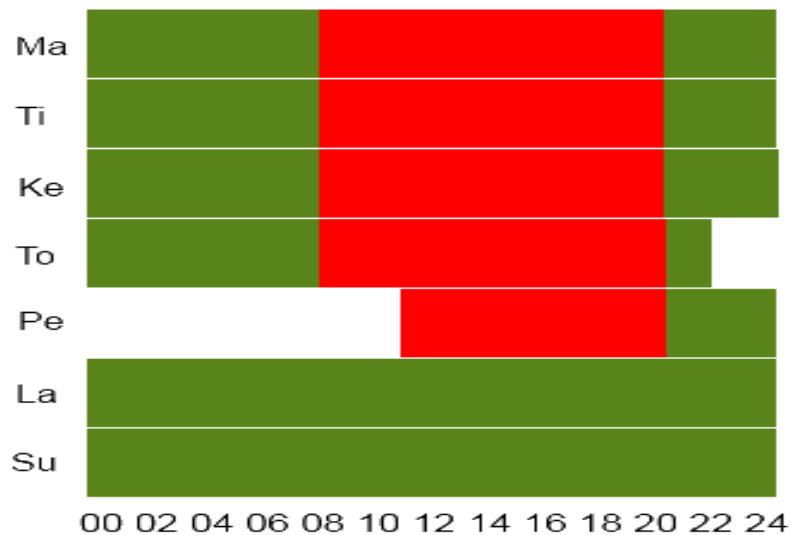
Anturi	Huonetila	Istumapaikkoja (kpl)	Ilmanvaihto ($\pm \text{dm}^3/\text{s}$)
4	ETYA2123	35	258

Kuvassa 31 on esitetty luokkahuoneen lämpötiläkäyrä. Huonelämpötila on selkeästi noussut kohtuuttoman paljon, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että huoneen jäähdytyskoneet eivät olleet toiminnassa.



Kuva 31. Luokkahuoneen ETYA2123 huonelämpötiläkäyrä.

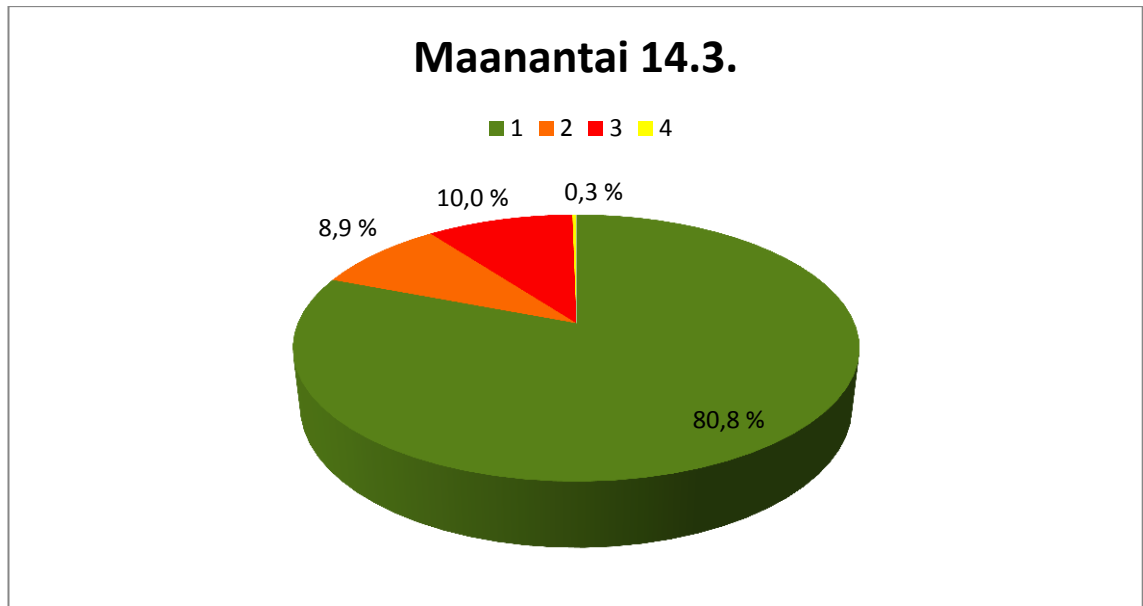
Kuvassa 32 on esitetty liikennevaloesitys sisäolosuhteista. Luokkahuone on jatkuvasti liian kuuma.



Kuva 32. Mittausanturi 4:n liikennevaloesitys.

6.5 Koko rakennuksen yhden päivän keskiarvo

Tässä analyysissä laskettiin luokkahuoneiden määrällisen keskiarvon mukainen sisäilmastoindeksilaskenta yhden päivän osalta. Mittausajankohdaksi valittiin maanantai 14.3.2011. Tuo päivä soveltui analyysiin hyvin, sillä siinä ei ollut epäjatkuvuuskohtaa mittaustuloksissa ja sää oli pilvinen. Samankaltaisten tilojen lämpötilakäyriä vertailtiin, yhdenmukaiset huonetilat yhdisteltiin ja ne otettiin huomioon painotettuina. Samankaltaisten tilojen valinnassa käytettiin apuna sijainnin, ilmanvaihdon ja luokkatilan oppilasmäärien yhtäläisyyksiä. Laskennassa on mukana 16 luokkahuonetta ensimmäisestä kerroksesta ja 3 luokkahuonetta rakennuksen toisesta kerroksesta. Laskentaan otettiin mukaan mittaustulokset rakennuksen käyttöajalta, klo 8–20.



Kuva 33. Diagrammi rakennuksen käyttöajan sisäolosuhteiden yhden päivän keskiarvosta.

Kuvassa 33 on esitetty diagrammi laskennan tuloksista. Sisäilmastoluokituksen S2-luokan mukaan opetustiloissa lämpötilan tulee olla vähintään 90 % ajasta tavoitealueella, jota kuvaa tässä esityksessä vihreä väri. Sen sijaan luokan ylityksiä tai alituksia, joita kuvaavat punainen ja sininen väri, ei sallita lainkaan. Näin ollen tässä tapauksessa nuo vaatimukset eivät täyty tämän päivän osalta. Käytännössä nuo vaatimukset voivat olla liian tiukkoja suorittaa. (3, s. 11.)

6.6 Muita mahdollisia esitystapoja

Mittausdatan analysointiin on mahdollista käyttää lukuisia erilaisia esitystapoja. Paras esitystapa riippuu käyttäjän tarpeista. Eri käyttäjäryhmille voidaan näin ollen luoda erilaisia kuvaajia. Mahdollisia käyttäjäryhmiä voivat olla esim. kiinteistöhoitaja, huoltomies, opiskelijat ja opettajat. Kuvassa 34 on esitetty yksinkertainen esitystapa luokkahuoneen yhden päivän sisäolosuhteista.



Kuva 34. Esimerkki liikennevaloesityksen erilaisesta esitystavasta.

6.7 Mittausten ongelmat

Mittausten edetessä havaittiin mittausverkon käytössä teknisiä ongelmia.

Ensimmäisessä tapauksessa mittausverkko sammui itsestään parin viikon välein, ja siihen auttoi vain yhteysnoodien uudelleenkäynnistys. Toisessa tapauksessa kaksi mittausanturia eivät enää suostuneet lähettämään mittausdataa yhteysnoodeille ensimmäisten testien jälkeen, eikä niitä saatu korjattua mittausten aikana.

Mittausantureita oli kuitenkin niin monta käytössä, ettei se vielä aiheuttanut suurta haittaa mittauksille. Lisäksi mittausdatan lähetys antureilta yhteysnoodeille oli poikki torstai-illasta perjantaihin n. puoleen päivään asti. Syytä tälle katkokselle ei löydetty. Tuo mittauskatkos on esitetty kuvissa valkoisena värinä, joka esittää epäjatkuvuuskohtaa mittauksissa. Myös suoraa auringonpaistetta mittausanturiin on ollut vaikea huomioida mittausantureiden sijoituksissa.

6.8 Mittaustulosten ja jatkotoimenpiteiden pohdintaa

Rakennuksessa havaittiin muutamia selkeitä ongelmakohtia. Lämpötilat eivät käytännössä olleet missään luokkahuoneessa liian pieniä. Energiaa voitaisiin näin ollen säästää laskemalla menoveden lämpötiläkäyrää hieman alhaisemmaksi. Koko vanhan puolen lämpöverkosto olisi mahdollisesti syytä perussäätää uudelleen, ja sille tulisi talvella tehdä huonelämpötilamittaukset.

Luokkahuoneet ETYA1124 ja ETYA1149 olivat todennäköisesti liian lämpimiä liian suurten opiskelijamäärien takia. Ratkaisuna luokkahuoneiden ilmanvaihtoa voitaisiin lisätä nykyisestä. Tämä vaatisi mahdollisesti anemostaattien lisäystä huonetiloissa ja ilmanvaihtokoneen ilmamäärän nostamista.

Toisessa kerroksessa kaikki mitatut huoneet olivat liian lämpimiä. Ratkaisuna voisi olla huoneiden patteritermostaattien toiminnan ja esisäätöarvojen tarkastelu. Lisäksi tulisi tarkastella, ettei aurinko pääse lämmittämään huonetiloja liikaa. Atk-luokkahuoneen ETYA2123 jäähdytyskoneet tulisi saada toimimaan, jotta huonetila saataisiin viileämmäksi.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin Metropolian Leppävaaran toimipisteen vanhan osan sisäolosuhteita langattoman mittausanturiverkoston avulla. Anturit mittasivat huonelämpötilaa ja niiden lähettämän datan analysoinnin avuksi luotiin uusi sisäilmastoindeksi, joka perustui Sisäilmastoluokitus 2008:n S2-tasoon. Työssä luotiin uusia malleja tiedon esittämiseen niin, että ne olisivat mahdollisimman havainnollisia kaikille käyttäjäryhmille.

Työn haasteena oli ideaalisen mittausympäristön rakentaminen. Auringonvalon tuomat lämpöongelmat, antureiden sijoitus ja mittausverkon toimintahäiriöt aiheuttivat haasteita mittauksille ja häiriötekijöiden vaikutus mittaustuloksiin pyrittiin pitämään mahdollisimman vähäisenä. Lisäksi kaikki diagrammit jouduttiin laatimaan käsin laskemalla ja piirtämällä. Tähän tarkoitukseen soveltuva ohjelmisto nopeuttaisi tätä työtä paljon.

Merkittävimmistä luokkahuoneista laadittiin indeksin avulla diagrammit ja mittaustulosten perusteella laskettiin rakennuksen sisäolosuhteista yhden päivän keskiarvo. Rakennus ei suoriutunut niistä tavoitteista, joihin sitä tässä työssä verrattiin. Työssä onnistuttiin saamaan kattava kuva rakennuksen vanhan puolen sisäolosuhteista. Mittaustulosten pohjalta laadittiin esimerkkejä mahdollisista jatkotoimenpiteistä rakennuksen sisäolosuhteiden parantamiseksi. Tässä työssä laadittua sisäilmastoindeksiä on mahdollista soveltaa muissa hankkeissa, ja sitä on mahdollista jatkokehittää koskemaan myös muita suureita.

Lähteet

- 1 Rakennusten merkitys suomen energia- ja ilmastopolitiikassa. Verkkodokumentti. <http://www.finnisol.fi/fi/tiedosto/?intFileID=262&intLinkedFromObjectID=835>. Suomen lämmöneristevalmistajien yhdistys. Luettu 2.5.2011.
- 2 Seppänen, Olli. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 3 Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäilmastoyhdistys ry.
- 4 Sisäilmastoluokitus 2008 -esittely. Verkkodokumentti. Sisäilmastoyhdistys ry. <http://www.sisailmayhdistys.fi/attachments/kehityshankkeet/sisailmastoluokitus2008-esittely.pdf>. Luettu 29.4.2011.
- 5 European Standard EN 15251. 2007. CEN.
- 6 Wirepas Simple -laitealusta, Käyttö- ja asennusohje.
- 7 FMI: Helsinki Testbed. Ilmatieteenlaitoksen verkkopalvelu. <<http://testbed.fmi.fi>>. Luettu 1.4.2011.
- 8 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Lämmöntuotto- ja lämmöneristävyystaulukot

Aineenvaihdunnan lämmöntuotto eräissä toiminnoissa.

Toiminta	Aineenvaihdunnan lämmöntuotto (met)
Nukkuminen	0,8
Rauhallinen istuminen	1
Lukeminen ja kirjoittaminen	1
Konekirjoitus	1,1
Työpöydän järjestely	1,2
Toimistotyö	1,2
Seisominen	1,2
Kevyt seisomatyö	1,6
Normaali seisomatyö	2
Ruuanlaitto	1,6–2,0
Autokorjaamotyö	2,0–3,0

1 met = 58,2 W/m²

Eräiden vaatekokonaisuuksien lämmöneristävyys.

Vaatetus	Vaatetuksen lämmöneristävyys (clo)
Naisten alushousut, shortsit, T-paita, ohuet sukat ja sandaalit	0,3
Alushame, sukkahousut, hihallinen kesäleninki ja sandaalit	0,45
Alushousut (lyhyet), lyhythihainen paita, ohuet housut ja sukat, kengät	0,5
Alushame, sukkahousut, sandaalit, hame, lyhyt-hihainen paita	0,55
Alushousut, paita, housut ja kengät	0,7
Alushousut, verryttelypuku, pitkät sukat ja lenkkikengät	0,75
Pikkuhousut, alushame, hame, paita, paksut polvisukat ja kengät	0,8
Alushousut, paita, hame, takki, liivit ja kengät	1
Alushousut, paita, housut, takki ja kengät	1

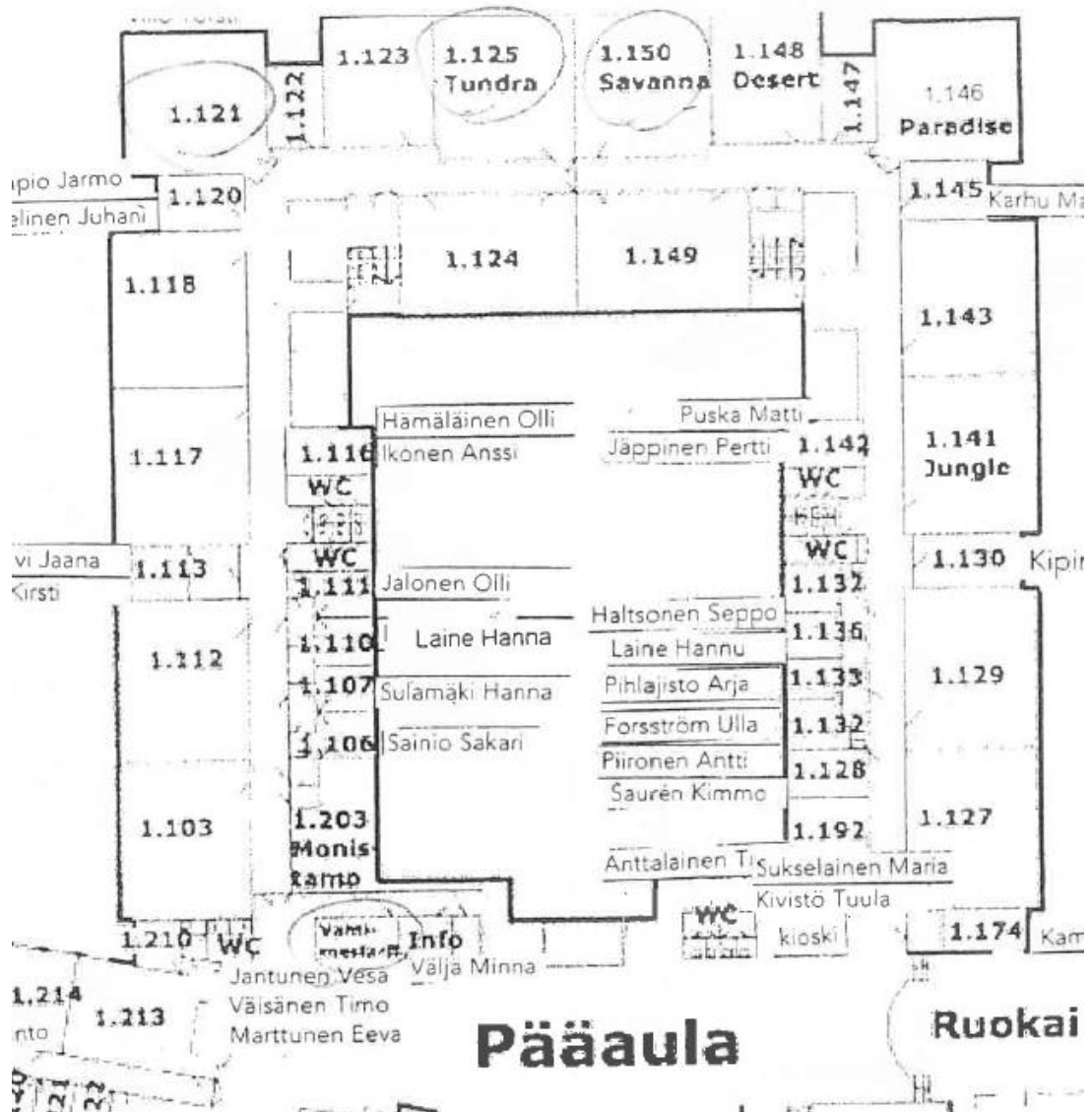
Mittauslaitteiden sijaintipöytäkirja

Mittauslaitteiden sijaintipöytäkirja.

Node ID	Anturit	Huonetila	Asennus päivämäärä	Huom
1	lämpö, valo	ETYA 1141 (ATK)	8.3.2011	
2	lämpö, valo, kosteus, CO2	ETYA 1146 (SEMIN.)	8.3.2011	
3	lämpö, valo	ETYA 1121	8.3.2011	
4	lämpö, valo, kosteus, CO2	ETYA 2123 (ATK)	8.3.2011	
5	lämpö, valo	ETYA 1117	8.3.2011	
6	lämpö, valo	ETYA 2130	8.3.2011	
7	lämpö, valo	ETYA 1125 (ATK)	8.3.2011	
8	lämpö, valo	ETYA 1112	8.3.2011	
9	lämpö, valo, kosteus, CO2	ETYA 1149	8.3.2011	
10	lämpö, valo, kosteus, CO2	ETYA 1124	8.3.2011	EPÄKUN.
11	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1118	8.3.2011	
12	lämpö, valo	VAHTIMESTARIT	8.3.2011	
13	lämpö, valo, kosteus, CO2	ETYA 1129	8.3.2011	EPÄKUN.
14	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1127	8.3.2011	
15	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1150 (ATK)	8.3.2011	
16	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1123	8.3.2011	
17	lämpö, valo	ETYA 1148	8.3.2011	
18	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1103	8.3.2011	
19	lämpö, valo	ETYA 1147 (TSTO)	8.3.2011	
20	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1130	8.3.2011	
21	lämpö, valo, kosteus, PIR	KÄYTÄVÄ (VAR)	8.3.2011	
22	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1143	8.3.2011	
23	lämpö, valo	ETYA 1124	15.3.2011	
24	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 1113 (TSTO)	8.3.2011	
25	lämpö, valo, kosteus, PIR	ETYA 2131	8.3.2011	
100	yhteysnoodi	ETYA 2127	8.3.2011	
101	yhteysnoodi	ETYA 1203	8.3.2011	

Rakennuksen pohjakuvat

1. kerros



2. kerros

