

Timo Toivanen

SUUTINKONVEKTOREIDEN JA  
LÄSNÄOLO-OHJATUN IMS-  
JÄRJESTELMÄN TOIMIVUUS  
OPETUSTILOISSA


Opinnäytetyö  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma  
Kestävä energiatalous  
Ylempi AMK tutkinto  
MAMK  
Toukokuu 2013




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

# KUVAILULEHTI

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>	
<b>Tekijä(t)</b> Timo Toivanen		<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> Ympäristötekniikan koulutusohjelma (YAMK), Kestävä energiatalous	
<b>Nimeke</b>  Suutinkonvektoreiden ja läsnäolo-ohjatun IMS-järjestelmän toimivuus opetustiloissa			
<b>Tiivistelmä</b> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia mittauksin läsnäolo-ohjatun kattohajoittajilla toteutetun IMS-järjestelmän ja suutinkonvektori-järjestelmän toimivuutta opetustiloissa ja verrata mittaustuloksia olosuhdesimulointituloksiin. Läsnäolo-ohjauksella toteutettua IMS-järjestelmää verrattiin myös hiilidioksidi/lämpötilaohjattuun IMS-järjestelmään. Mittausten ja simulointien tuloksia on tarkoitus hyödyntää tulevaisuuden peruskorjaushankkeissa.</p> <p>Tutkimuksessa tarkasteltiin mittauksin kolmen mittausjakson aikana kahdeksan (8) luokkahuoneen lämpötilaa, tuloilmamäärää ja CO<sub>2</sub>-pitoisuutta. Tutkituissa opetustiloissa tehtiin vetomittaukset ilmanvaihdon maksimi- ja minimi-ilmavirroilla ensimmäisen mittausjakson aikana. Opetustilat sijaitsevat Viitaniemen kampuksella v. 2011 saneeratun C2-rakennuksen kellari- ja toisessa kerroksessa. Kustakin kerroksesta valittiin tutkimukseen kaksi lännen- ja kaksi idänsuuntaista opetustilaa. Luokissa käytettiin kahta erilaista ilmanjakoratkaisua. Ilmanvaihtoratkaisut olivat muuttuvilmavirta-järjestelmä sekoittavalla kattopuhalluksella ja vakioilmavirtajärjestelmä ikkunapenkkisuutinkonvektoreilla.</p> <p>Tutkimuksen yhteydessä tehtiin olosuhdesimulointi yhdestä toisen kerroksen lännenpuoleisesta 56,5 m<sup>2</sup> opetustilasta IDA ICE –simulointiohjelmalla.</p> <p>Työssä tuloksia on vertailtu Sisäilmaluokitus 2008 S2 -luokan tavoitetasoihin ja todettiin, että kaikilta osin ei saavutettu sisäilmaluokan S2 tavoitearvoja. Tavoitearvot täyttyivät lähes kokonaan CO<sub>2</sub>-pitoisuuden ja sisäilman lämpötilan osalta, mutta ilman liikenoisuuden osalta tavoitearvoihin ei päästy. Simulointitulosten perusteella voidaan suositella ilmanvaihdon ohjaamiseen CO<sub>2</sub> /lämpötilaohjausta.</p>			
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  Ilmastointi, sisäilmasto, lämpöolosuhteet, luokkatilat			
<b>Sivumäärä</b> 58	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>	
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>			
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b> Aki Valkeapää		<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b> Jyväskylän koulutuskuntayhtymä, Kiinteistöliikelaitos	

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the master's thesis</b>	
<b>Author(s)</b>  Timo Toivanen		<b>Degree programme and option</b> Master programme in Environmental technology, Sustainable energy	
<b>Name of the master's thesis</b> Induction units and the presence of controlled air flow regulators operation in the classrooms			
<b>Abstract</b> <p>The purpose of this thesis was study two types of ventilation systems in teaching facilities. The systems were equipped with a roof diffuser variable air volume system and induction units with a constant air volume system. The presence of the IMS-implemented control system was also compared with a CO<sub>2</sub> /temperature of the-controlled IMS system. The results of the measurements and simulation can be used in future renovation projects. The purpose is also to find out what is the best way to control the operation of an air regulator in classrooms. Is it the presence adjustment or presence and CO<sub>2</sub> adjustment together?</p> <p>The IMS controllers were used to control the temperature. The study looked at the temperature, supply air and the amount of CO<sub>2</sub> concentrations of eight classrooms. Investigated educational facilities are located on the campus of Viitaniemi Jyväskylä. The building was restored in 2011 and the investigated facilities located in the building C2 in the basement and on the second floor. The results were compared with Classification of Indoor Climate 2008 S2-category.</p> <p>The results show that the temperature and CO<sub>2</sub> levels are according to the classification. Air velocity is too high in almost all spaces of classrooms, and it was not in all modes in accordance with the classification. On the basis of the simulation results ventilation control and CO<sub>2</sub> presence control can be recommended.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b> ventilation, thermal conditions, indoor climate, classrooms			
<b>Pages</b> 58	<b>Language</b> Finnish	<b>URN</b>	
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b> Aki Valkeapää		<b>Master's thesis assigned by</b> Jyväskylä Educational Consortium, Real Estate Management Services	

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	SISÄYMPÄRISTÖ JA SISÄILMASTO .....	4
2.1	Sisäympäristö.....	4
2.2	Sisäilmasto .....	4
2.3	Sisäilmaluokitus 2008.....	5
3	KOULURAKENNUSTEN ILMANVAIHTO- JA ILMASTOINTI- JÄRJESTELMÄT .....	6
3.1	Vakioilmavirta-ilmastointi (CAV- Constant Air Volume).....	6
3.2	Muuttuvailmavirta-ilmastointi (VAV-Variable Air Volume) .....	6
3.3	Puhallin- ja suutinkonvektori-ilmastointi .....	8
3.4	Aiempiä tutkimuksia muuttuvailmavirtaisista järjestelmistä.....	9
4	OPETUSTILOJEN SISÄILMASTON TAVOITEARVOT .....	10
4.1	Huonelämpötila.....	10
4.2	Ilman liike ja veto .....	12
4.3	Hiilidioksidipitoisuus.....	14
4.4	Ilmamäärä .....	15
5	KOHDERAKENNUS .....	15
6	SISÄILMASTO JA TAVOITEARVOJEN MITTAAMINEN.....	18
6.1	Huoneilman lämpötilan, ilman liikenopeuden ja hiilidioksiditason (CO <sub>2</sub> ) mittauslaitteet .....	22
6.2	Lämpötila.....	22
6.3	Ilman liike ja veto .....	23
6.4	Hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen.....	24
6.5	Ilmamäärämittausten suoritus .....	26
6.6	Mittauspisteiden valinta.....	26
7	SISÄILMAMITTAUSTEN TULOKSET.....	30
7.1	Ilmamäärämittaukset.....	30
7.2	Opetustilojen olosuhdemittaukset.....	32
7.3	Opetustilojen huonelämpötilojen pysyvyysmittaukset .....	39
7.4	Hiilidioksidimittaukset .....	46
9	SIMULOINNIT.....	49

10	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	54
10.1	Veto.....	54
10.2	Lämpötilat.....	54
10.3	CO <sub>2</sub> -pitoisuudet .....	55
10.4	Simuloinnit .....	56
	LÄHTEET .....	57

#### LIITE/LIITTEET

- 1 Mitoitusajo Huone C2.206
- 2 Mitoitusajo Huone C2.210a

## 1 JOHDANTO

Tämä YAMK opinnäytetyö on tehty Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristöteknologian Kestävä energiatalous -suuntautumisohjelmassa.

Tutkimuksen tilaaja on Jyväskylän koulutuskuntayhtymän kiinteistöliikelaitos. Kiinteistöliikelaitos työllistää 61 henkilöä, ja sen vuosittainen liikevaihto on noin 11 miljoonaa euroa. Huoneistoalaa on kaikkiaan 134 800  $\text{m}^2$ , mikä koostuu pääosin oppilaitosrakennuksista ja josta Jyväskylässä sijaitsevien ammatillisten oppilaitosten osuus on 80 400  $\text{m}^2$ .

Tutkimuksen tavoitteena on mittauksin tutkia, miten opetustilojen ilmanlaatu pysyy tavoitetasoissa Jyväskylän ammattiopiston Viitaniemen kampuksella v. 2011 saneeratun C2-rakennuksen kellari- ja toisessa kerroksessa, kun opetustilojen ilmamääräsäädössä käytetään läsnäolo-ohjauksella toteutettua IMS-järjestelmää. Tutkittava kohde on tilavuudeltaan 22 460  $\text{m}^3$  ja sen kokonaispinta-ala on 2460  $\text{m}^2$  (kuvat 1 ja 2). Mittaustuloksia verrataan simulointituloksiin.



**KUVA 1. Tutkittavan rakennusosan itäsiivu**



**KUVA 2. Tutkittavan rakennusosan länsisivu**

Tutkimuksessa seurataan luokkahuoneiden lämpötilaa, tuloilmamäärää ja CO<sub>2</sub> pitoisuutta. Tutkituissa opetustiloissa tehdään myös vetomittaukset ilmanvaihdon maksimi- ja minimi-ilmavirroilla. Mittaukset on rajattu kahdeksan (8) luokkahuoneen (kuva 3 ja kuva 4) lämpötilan, tuloilmamäärän, CO<sub>2</sub> pitoisuuden ja ilman vetomittauksiin.



**KUVA 3. Kuvassa pohjakerroksen luokkahuone, jossa käytetään tuloilmaelime-  
nä ikkunaseinällä suutinkonvektoreita.**



**KUVA 4. Kuvassa 2.kerroksen luokkahuone, jossa käytetään tuloilmaelimenä kattohajottajia**

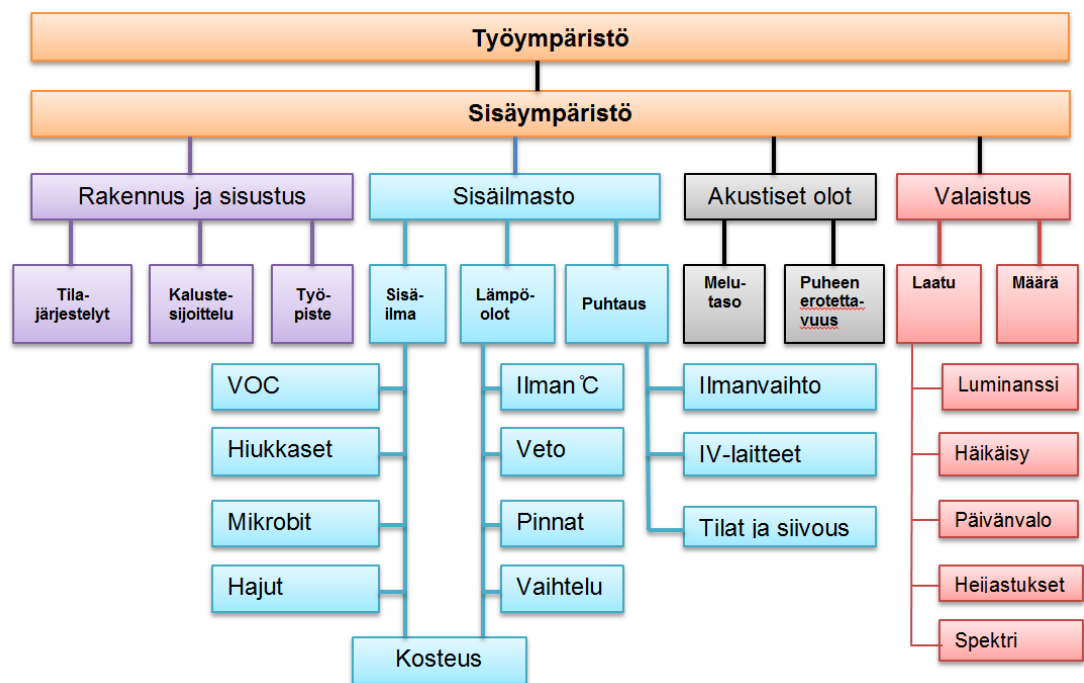
Työ aloitetaan tekemällä tutkimussuunnitelma, jossa määriteltiin tutkimuksen sisältö. Tutkimuksen pääsiallisena tarkoituksena on selvittää, toimiiko läsnäolo-ohjaus luokkahuoneissa ja voiko tarpeenmukaisella ilmanvaihdon ohjauksella saavuttaa energiansäästöä ilmanlaadun siitä kärsimättä.

Tässä tutkimuksessa kerätään seurantamittauksin opetustilojen lämpötila- ja CO<sub>2</sub>-mittaustietoja dataloggereiden avulla tutkimussuunnitelman mukaan sekä suoritetaan vetomittaukset toukokuun mittausjakson yhteydessä. Tiloissa, joissa tehtiin CO<sub>2</sub>-mittausta, seurattiin tilassa olevaa henkilömäärää tilassa työskentelevän opettajan toimesta käyttäen viikkokalenteria. Ulkolämpötilojen mittausaineiston keräys tapahtui kiinteistöautomaation ulkolämpötila-anturein mittaustietoa hyväksikäyttäen. Rakennusautomaation historiatiedoista mittausaineisto yhdistettiin opetustilojen lämpötilamittauksista koostettuihin Excel-laskentataulukoihin, jonka avulla tapahtuu sisäilmaolosuhde vertailu eri lämpötiloissa. Elokuun mittausjakson yhteydessä tarkastettiin lämpötila- ja ilmamäärä mittauksin kiinteistöautomaatioon liitettyjen mittauslaitteiden mittausarvojen oikeellisuus.

## 2 SISÄYMPÄRISTÖ JA SISÄILMASTO

### 2.1 Sisäympäristö

Sisäympäristö käsittää rakennuksen ja sen tilat, lämpöolosuhteet, sisäilman laadun, akustiset olot ja valaistuksen (kuva 5). Sisäilman laatu on hyvä, kun tilaa käyttävät ovat siihen tyytyväisiä eikä siitä aiheudu terveyshaittoja. Rakennusten tehtävänä on tarjota ihmisille terve ja viihtyisä sisäympäristö asumista ja työskentelyä varten. Rakennuksen sisällä, sisäympäristössä, on oltava miellyttävä lämpötila, siihen on tuotava riittävästi raikasta ilmaa, siinä ei saa esiintyä vetoa, kosteuden on oltava sopiva ja sisäilman epäpuhtauksien määrän on oltava pieni (Tuottava toimisto 2005, 6).



**KUVA 5. Sisäympäristöön vaikuttavia tekijöitä ja käsitteitä (Tuottava toimisto 2005)**

### 2.2 Sisäilmasto

Rakennusten sisäilmastolla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka muodostuu sisätilojen sisäilmasta, lämpöolosuhteista ja puhtaudesta. Lämpöolosuhteisiin kuuluvat sisäilman ja pintojen lämpötilat, lämpötilan vaihtelu, ilman liike (veto) ja sisäilman kosteus. (Tuottava toimisto 2005, 6).

Epättydyttäväksi koetut lämpöolot voivat johtaa tilojen käyttäjien valituksiin. Lämpöoloja määriteltessä vaikeutena on se, että ihmiset kokevat lämpöolot eri tavoin. Lämpöviihtyvyys on useiden osatekijöiden summa. Selvitettäessä epäviihtyisäksi koettuja lämpöoloja joudutaan mittauksia suorittamaan usein eri menetelmin.

## 2.3 Sisäilmaluokitus 2008

Sisäilmastoluokitus 2008 täydentää Suomen rakentamismääräyksiä. Kolmitasoinen sisäilmastoluokitus (S1-S3) on tarkoitettu käytettäväksi asetettaessa rakennukselle sisäilmatavoitteita. Luokitusta ei käytetä rakennuksen terveellisuuden arviointiin, vaan siihen tulee käyttää Sosiaali- ja terveysministeriön ja Työterveyslaitoksen julkaisemia ohjeita. Sisäilmastoluokitus 2008 mukaiset sisäilmaluokat ovat S1, S2 ja S3 (taulukko 1) (Sisäilmaluokitus 2008,8).

### TAULUKKO 1. Sisäilmaluokkien kuvaukset (Sisäilmaluokitus 2008)

#### Sisäilmastoluokkien kuvaukset.

##### 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 ylikämpenemistä 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 ylikämpeneminen 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.

Eri suureiden tavoite- ja suunnitteluarvot voidaan valita eri laatuluokista tai tarvittaessa määritellä jonkin suureen arvo.

Rakennuksen sisäilmastolle asetetuista tavoitearvoista on tällä hetkellä mahdollista todentaa huonelämpötila, lattian pintalämpötila, lämmitys- ja ilmastointilaitteiden äänitaso, radonpitoisuus, hiilidioksidipitoisuus ja veto. Tutkimuksen kohteena oleva oppilaitoskiinteistö on suunniteltu ja toteutettu tavoitteena sisäilmastoluokka S2.

### **3 KOULURAKENNUSTEN ILMANVAIHTO- JA ILMASTOINTI-JÄRJESTELMÄT**

Koulurakennuksissa käytettävät ilmastointitavat riippuvat siitä, millä aikakaudella rakennus on valmistunut ja onko rakennukseen tehty ilmanvaihdon perusparannusta. Koulurakennuksissa yleisimmin käytetyt ilmastointitavat ovat vakioilmanvaihto-, muuttuvailmavirtailmastointi sekä näiden yhdistelmät ja puhallinkonevektori-ilmastointi.

#### **3.1 Vakioilmavirta-ilmastointi (CAV- Constant Air Volume)**

Vakioilmavirta-ilmastoinnin tehtävänä on huolehtia sisäilman puhtaudesta ja lämpöolosuhteista. CAV-ilmastoinnissa ilmavirrat pysyvät käyttöaikana vakiona. Vakioilmavirta-ilmastoinnin ilmavirrat mitoitetaan kesäajan jäähdytystarpeen mukaan. Jäähdytystä voidaan tehostaa kesäaikana käyttämällä ilmanvaihtoa ja jäähdytystä myös yöaikana. Ilmavirran suuruutta säädellään tavallisesti muutamalla ilmastointikoneen pyörimisnopeutta kellonajan mukaan. (Ilmastoinnin suunnittelu 2004, 48.)

Tilakohtainen ilmavirtojen säätömahdollisuus tässä ratkaisussa ei ole mahdollista, jonka seurauksena varsinkin suuria ilmavirtoja käytettäessä voi tiloissa esiintyä ajoittaista liiallista jäähtymistä. Tällöin tilan tuloilmanakanaan tulisi asennettava jälkilämmityspatteri. Järjestelmä ei sovellu palvelemaan tiloja, joiden lämpökuormat poikkeavat toisistaan selvästi. (Ilmastoinnin suunnittelu 2004, 48–49.)

#### **3.2 Muuttuvailmavirta-ilmastointi (VAV-Variable Air Volume)**

VAV-ilmastoinnilla saadaan toteutettua huonekohtaisesti korkeampitasoinen järjestelmä kuin vakioilmavirta-ilmastoinnilla, yleensä sisäilmaluokka S2. VAV-järjestelmässä eli ilmavirtasäätteisessä järjestelmässä huonetilojen ilmavirta vaihtelee jäähdytystarpeen mukaan. Tiloissa joissa ei käytetä koneellista jäähdytystä, lämmönhallintakeinoja ovat ilmavirran suuruus, tuloilman säätökäyrä ja erilaiset auringon-suojausratkaisut (Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen, 68).

VAV-järjestelmässä huonetiloissa tuloilman lämpötila pyritään pitämään vakiona, eli tuloilman lämpötila ei muuteta kuormituksen muuttuessa. Jos vierekkäisten huoneiden lämpökuormat ovat hyvin erilaiset, voidaan tuloilmavirran säätöyksiköt varustaa jälki-

lämmityspatterilla. Tuloilman lämpötilan ohjaus ilmanvaihtokoneella tehdään yleensä ulkolämpötilan funktiona. Mikäli VAV-järjestelmällä suoritetaan myös tilojen lämmitys, tapahtuu se yleensä minimituloilmavirtaa käyttäen. Lämmitys tapahtuu jälkikäsitely-yksikössä sijaitsevalla vesi- tai sähkölämmittimellä (Ilmastoinnin suunnittelu 2004, 61.)

VAV-järjestelmissä huoneiden ilmavirran säätäminen tehdään ilmamääräsäätimellä (säätöpellillä), joka sijaitsee valitun ratkaisun mukaan joko ilmanvaihtokanavassa tai huonetilassa sijaitsevassa päätelaitteessa. Muuttuvailmavirtaisten luokkahuoneiden säätöperiaatteita ovat ilmavirran henkilötunnistinsäätö, ilmavirran säätö huonelämpötilan mukaan, ilmavirran ja jälkilämmityksen säätö huonelämpötilan mukaan ja ilmavirran säätö CO<sub>2</sub>-pitoisuuden mukaan (LVI30-40008, 1-3).

Ilmavirran henkilötunnistinsäätö ohjaa ilmavirtaa henkilötunnistimella minimi- ja maksimirajojen välillä. Henkilötunnistin ohjaa ilmanvaihdon maksimiin henkilön astuessa huonetilaan ja minimiarvoon huoneen ollessa tyhjänä. Haittapuolena on, ettei henkilötunnistin tunnista luokassa olevaa ihmismäärää (LVI30-40008, 1).

Huonelämpötilan säätö tapahtuu huonelämpötilaa mittaavan anturin ja säätimen muodostavalla säätimellä. Säädin muuntaa anturilta tulevan viestin ilmavirran säätimelle meneväksi, yleensä 2-10 V viestiksi (Ilmastoinnin suunnittelu, 64).

Ilmavirtaa säädettäessä huonelämpötilan mukaan ilmavirran säätö tapahtuu portaattomasti maksimi- ja minimi-ilmavirtojen välillä. Säätötapa sopii tiloihin, joissa halutaan ylläpitää tasainen lämpötila. Tiloihin, joiden lämpökuorman vaihtelu on suurta, sopii säätötavaksi ilmavirran ja jälkilämmityksen säätö huonelämpötilan mukaan. Henkilötunnistin ohjaa ilmanvaihdon minimiarvoon huoneen ollessa tyhjänä. (LVI30-40008, 2.)

Yksi tapa ohjata tilan ilmamäärää on mitata sisäilman hiilidioksidipitoisuutta, joka kohoaa yleensä tilaan tulevan ihmismäärän kasvaessa. Ohjaamalla ilmanvaihtoa CO<sub>2</sub>-pitoisuuden mukaan henkilömäärän mukaan mitoitettun ilmamäärän sijasta voidaan sisäilman laatu pitää raikkaana kuluttamatta turhaan energiaa ilmanvaihtoon (Vaisala Oy).

Luokissa tapahtuvien ilmamäärien muutoksen vuoksi tulo- ja poistoilmapuhaltimien ilmamäärää joudutaan säätämään muuttuneita ilmamääriä vastaaviksi. Säädön periaatteena on, että kanavistossa staattinen paine pyritään pitämään mahdollisimman vakiona (Ilmastoinnin suunnittelu 2004, 61.) Kanavapainepaine pidetään vakiona puhallinmoottorien pyörimisnopeutta muuttamalla, tavallisesti taajuusmuuttajalla ilmanvaihtokanavistossa olevien paineanturien avulla.

VAV-järjestelmässä kanavisto suunnitellaan mahdollisimman symmetriseksi, jotta ilmavirrat pysyvät suunnitellun mukaisina eri virtaustilanteissa. (Ilmastoinnin suunnittelu, 62). VAV-järjestelmällä tuodaan huonetilaa kylmempää ilmaa kaikkina vuodenaikoina. Lämpötilan hallinta tapahtuu pääasiassa ilmavirtaa muuttamalla lämpötilanturin ohjaamana. Muuttuvailmavirtajärjestelmää voidaan ohjata myös läsnäolotunnistimen, ilmanlaatuanturin (CO<sub>2</sub>) tai kellon avulla (Ilmastoinnin suunnittelu 2004, 60.) VAV-järjestelmän huonepäätelaitteita valittaessa tulee huomioida, että maksimi- ja minimi-ilmavirtojen vaikutus heittokuvioon. Tavoitteena on, että maksimi-ilmavirroilla ei esiinny haitallista vetoa ja minimi-ilmavirroilla ilma ei käännä alas haitallisesti oleskeluvyöhykkeelle.

### **3.3 Puhallin- ja suutinkonvektori-ilmastointi**

Puhallinkonvektorin puhallin kierrättää huoneilmaa suodattimen ja jäähdytys- / lämmityspatterin kautta, joten se sopii jäähdytyksen lisäksi myös lämmitykseen. Puhallinkonvektoreiden tehonsäätö tapahtuu automatiikan ohjaamana, muuttamalla vesivirtoja säätöventtiileillä, muuttamalla puhaltimen nopeutta tai käsiohjauksella. Puhallinkonvektorit soveltuvat rakennuksiin, joissa jäähdytysteho vaihtelee paljon tilojen kesken. Yleensä laitteet suunnitellaan ulkoseinälle ikkunapenkkiin ja ei-kondensoiviksi (Ilmastoinnin suunnittelu, 55).

Puhallinkonvektorilla voidaan toteuttaa ilmastoitavaan tilaan korkeatasoinen ilmastointi, koska samalla laitteella huoneilmaa voidaan puhdistaa, lämmittää ja jäähdyttää. Usein laitteen avulla hoidetaan myös ilmanvaihto, jolloin laite kytketään keskitettyyn ilmanvaihtojärjestelmään. Puhallinkonvektorin etuna on joustavasti saavutettava huonetilojen lämpökuormien hallinta, kun laitevalintaa tehtäessä valitaan riittävän laajan toiminta-alueen omaavat tulo- ja poistoilmalaitteet. Puhallinkonvektorilla saavutetaan

tuloilmajäähdytykseen ja jäähdytyspalkkeihin nähden suurempi teho (Ilmastoinnin suunnittelu, 55).

Suutinkonvektori-ilmastoinnin ero puhallinkonvektori-ilmastointiin on siinä, että suutinkonvektori ei sisällä puhallinta. Suutinkonvektori kytketään osaksi ilmanvaihtojärjestelmää, ja se toimii ilmastoitavan tilan tuloilmalaitteena. Suutinkonvektorilla saavutetaan samat edut kuin puhallinkonvektori-ilmastoinnilla, eli joustava tilojen lämpökuormien hallinta.

### **3.4 Aiempia tutkimuksia muuttuvailmavirtaisista järjestelmistä**

Muuttuvailmavirtaista järjestelmää on tutkittu useissa AMK-opinnäytetöissä eri puolilla Suomea, esimerkiksi (Kalema ja Pylsy 2006). Tutkimukset ovat keskittyneet etupäässä säätöjärjestelmiin ja energiatehokkuuden arviointiin, ei sisäilman laadun arviointiin.

Laajassa Norjalaisessa tutkimuksessa ”Ventilation Systems and their Impact on Indoor Climate and Energy Use in Schools” tarkastettiin 157 luokkatilaa 81 satunnaisesti valituissa koulussa Oslissa. Norjassa kouluissa sisäympäristö on erityisen yleinen huolenaihe. Myös Norjassa on tarvetta laajoihin koulurakennusten sisäilmaston parantamistoimiin. Ilmanvaihtojärjestelmä ja sisäilmaston parantaminen on yksi tärkeimmistä kysymyksistä, kun Norjassa peruskorjataan tai rakennetaan uusia kouluja, koska sillä on merkittävä vaikutus investointi- ja käyttökustannuksiin.

Perustana tutkimukselle oli nähdä vaikutukset sisäilman ja energian käyttöön verrattuna tavanomaisten CAV- ilmanvaihtoon ja löytää ratkaisujen tärkeimmät syyt ja mahdolliset erot. Tutkimuksessa käsitellään myös perinteisen suodatuksen vaikutusta ilmanlaatuun ja sisäilmaan liittyviä oireita, jäähdytystehoa maahan upotetulla kanavalla ja sen vaikutusta ilmanvaihtojärjestelmän energian käyttöön ja sisäilman lämpötilaan sekä vuotoilman kulkeutumista julkisivun läpi kylmässä ilmastossa.

Tutkimuksessa selvittiin vaihtoehtoisia ilmanvaihtojärjestelmiä, joissa oli jonkinlainen muuttuvailmanvaihtojärjestelmä. Tutkimuksen mukaan VAV-ilmanvaihto vähentää huomattavasti ilmanvaihdon ilmavirran tarvetta, ilmanvaihtoon käytettyä energiaa ja kustannuksia verrattuna CAV-ilmanvaihtojärjestelmään. Koulupäivien aikana luokki-

en käyttöaste oli keskimäärin 74 % suunnitellusta käyttö kapasiteetista, mitattuna luokkien oppilaspaikkojen määrällä. Luokkahuoneita käytetään tyypillisesti neljä tunnin aikana normaalina koulupäivänä. Tutkimuksen mukaan CO<sub>2</sub>-anturin käyttö VAV-järjestelmän ohjauksessa vähentää ilmanvaihdon ilmamäärä keskimäärin luokkahuoneessa noin 43 %:n verrattuna CAV-järjestelmään, joka toimii täydellä ilmapirralla klo 7:00 – 17:00 välillä (Mysen, 2005).

Ruotsalaisessa tutkimuksessa “Demand Controlled Ventilation (DCV) Systems in Commercial Buildings. Functional Requirements on Systems and Components” tutkija osoittaa, että tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutetaan CAV-ilmastointia parempi sisäilman laatu ja energiatehokkuus. Tutkimuksen mukaan suurimmat säästöt syntyvät siitä, että ilmanvaihdon ohjaus tapahtui tilojen käytön mukaan. Erästä rakennusta tutkittaessa havaittiin, että suurin mitattu tuloilmavirta oli noin 76 % maksimi ilmapirrasta kaikissa huoneissa. Lisäksi se toimi alle 45 % suunnittelusta ilmapirrasta 80 % käyttöajasta. CAV-järjestelmään verrattuna säästöt ovat huomattavat, jos arvioidaan että järjestelmä olisi toiminut jatkuvasti täydellä tilavuusvirralla (Maripuu, 2009.)

## **4 OPETUSTILOJEN SISÄILMASTON TAVOITEARVOT**

### **4.1 Huonelämpötila**

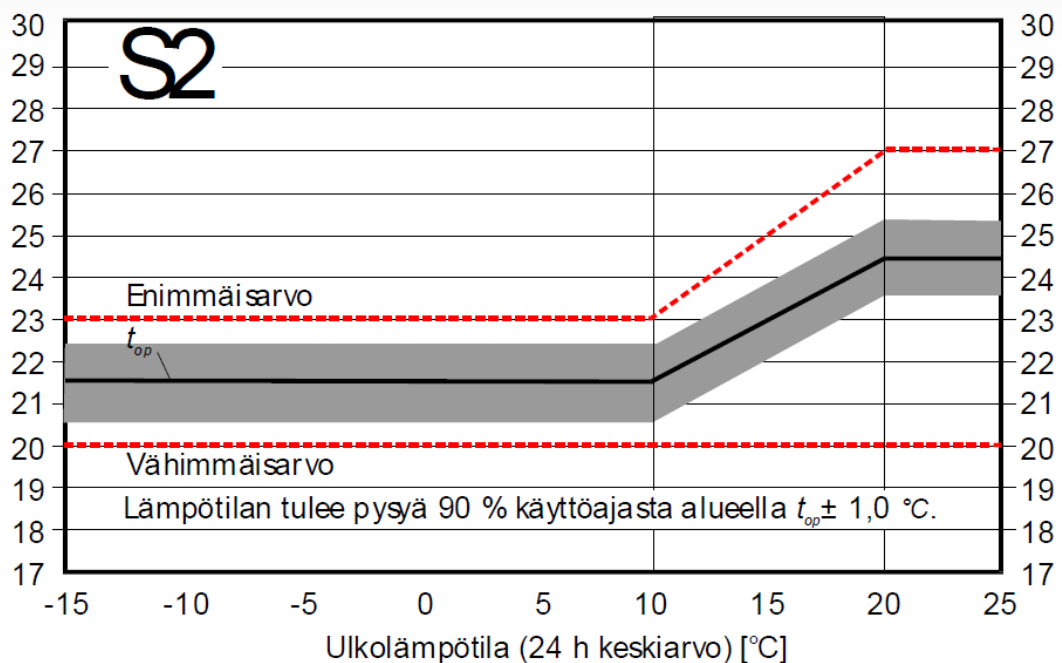
Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan rakennusten lämmityskauden huonelämpötilan suunnitteluarvona käytetään yleensä lämpötilaa 21 °C ja kesäkauden suunnitteluarvona lämpötilaa 23 °C. Hyväksyttävä poikkeama oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan lämmityskauden suunnitteluarvosta huonetilan keskellä 1,1 m:n korkeudella on  $\pm 1$  °C (RakMK D2, 6). Rakennuksen käyttöaikana ei oleskeluvyöhykkeen lämpötila yleensä saa olla korkeampi kuin 25 °C (RakMK D2, 6).

Sisäilmastoluokitus 2008 määrittelee tarkemmat tavoitearvot operatiiviselle lämpötilalle (Taulukko 2). S2 luokassa 90 % käyttöajasta on lämpötilapoikkeaman oltava  $\leq 1,0$  °C. Sisäilmaluokituksessa on lisäksi määritetty vähimmäis- ja enimmäisarvo operatiiviselle lämpötilalle talvikaudelle, kesäajalle ja välikausille (kuva 6) (Sisäilmastoluokitus 2008, 10).

**TAULUKKO 2. Lämpötilan tavoitearvot Sisäilmaluokitus 2008 mukaan (Sisäilmaluokitus 2008)**

	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
Operatiivinen lämpötila $t_{op}$ (°C)			
$t_u \leq 10^\circ\text{C}$	21,5 <sup>1)</sup>	21,5	21,0
$10 < t_u \leq 20^\circ\text{C}$	$21,5+0,3x(t_u-10)$ <sup>1)</sup>	$21,5+0,3x(t_u-10)$	$21,5+0,3x(t_u-10)$
$t_u \geq 20^\circ\text{C}$	24,5	24,5	25,0
Sallittu poikkeama tavoitearvosta (°C)	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo (°C)	$t_{op}+1,5$	$t_u \leq 10^\circ\text{C}$ $t_{op}+1,5$ $10 < t_u \leq 20^\circ\text{C}$ : $21,5+0,4x(t_u-10)$ $t_u \geq 20^\circ\text{C}$ : 27	$t_u \leq 15^\circ\text{C}$ 25 $t_u \geq 15^\circ\text{C}$ $t_{u\max}+5$
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo (°C)	20,0	20,0	20,0
Olosuhteiden pysyvyys( % käyttöajasta)			
toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	–
asunnot	90 %	80 %	–

Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä [°C]

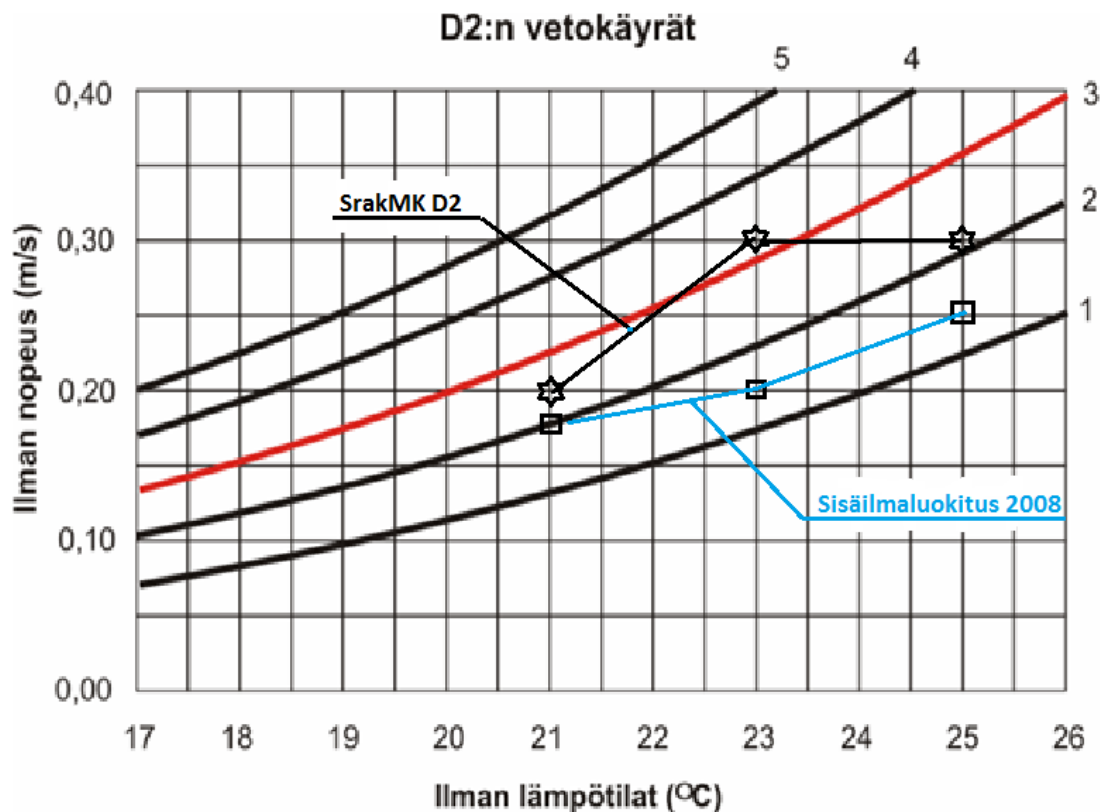


**KUVA 6. Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä (Sisäilmaluokitus 2008)**

## 4.2 Ilman liike ja veto

Ilman liikkeestä aiheutuva vedon tunne johtuu ihon paikallisesta liian voimakkaasta jäähtymisestä, eli lämmön siirrosta, eikä suoranaisesti ilman liikkeen mekaanisesta ärsykkeestä. Vedon tunteeseen keskeisesti vaikuttava tekijä on huoneessa vallitseva sisäilman lämpötila (Seppänen 2008, 25).

Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan tuloilma on johdettava huonetiloihin siten, että ilma virtaa koko oleskeluvyöhykkeelle vedottomasti (RakMK D2, 14). Tilakohtaiset oleskeluvyöhykkeen ilman liikkeen ohjearvot on annettu D2:n liitteessä 1. Opetustilojen ilman liikkeen ohjearvo talvella on 0,2 m/s ja kesällä 0,3 m/s (taulukko 3). Vetoisuutta eri huoneilman lämpötiloissa voidaan arvioida lisäksi vetokäyrien avulla (kuva 7). Mitä korkeampi on huonelämpötila, sitä suurempi voi ilman nopeus olla viihtyisyyden heikentymättä (RakMK D2, 24)



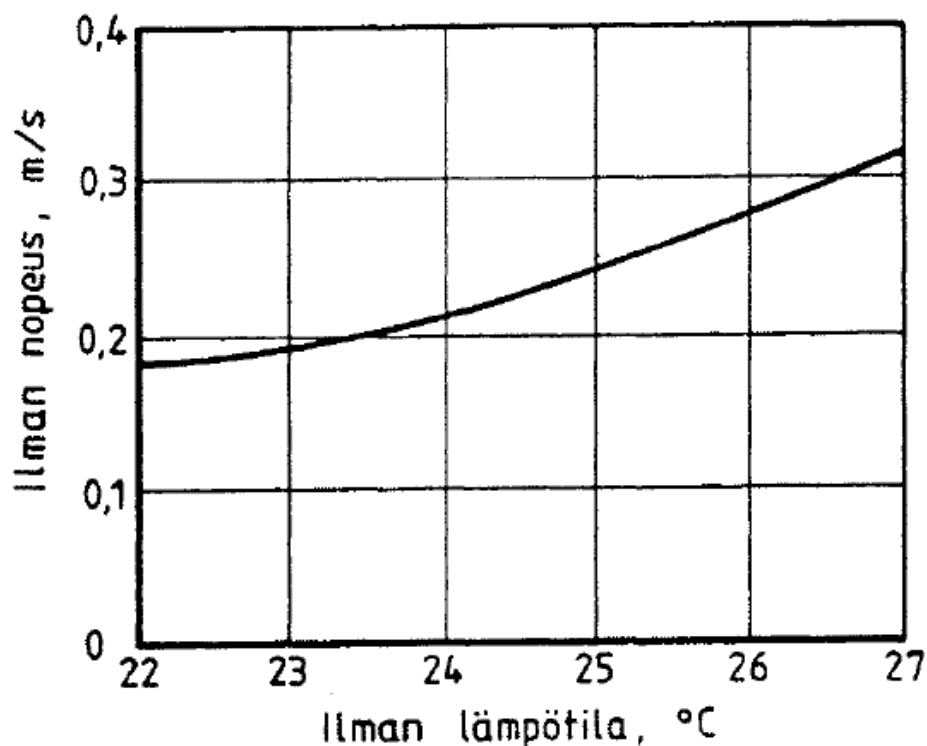
**KUVA 7. Vetokäyrät eri huonelämpötiloilla**

Sisäilmaluokitus 2008 antaa ilman liikkeelle tavoitearvot riippuen sisäilman lämpötilaan (taulukko 3).

**TAULUKKO 3. Ilman liikenopeuden tavoitearvot (Sisäilmaluokitus 2008)**

	Ilman liikenopeus (m/s)		
Sisäilmaluokka	S1	S2	S3
$t_{\text{ilma}} = 21\text{ °C}$			
$t_{\text{ilma}} = 23\text{ °C}$	<0,14	<0,17	0,2 (talvi)
$t_{\text{ilma}} = 25\text{ °C}$	<0,16	<0,20	
	<0,20	<0,25	0,3 (kesä)

Huonetiloissa, joissa esiintyy voimakasta lämpösäteilyä tai alhaisia tai korkeita pinta-lämpötiloja, mitataan ilman lämpötilan sijaan operatiivinen lämpötila. Vedolle on olemassa myös muita vetokriteerejä, esimerkiksi saksalainen Ventilation Standard DIN 1946 (Seppänen 2008, 26–27).

**KUVA 8. Saksalaisen Ventilation Standard DIN 1946 mukainen vetokäyrä.**

Kuvan 8 mukainen vetokäyrä sisäilmaston vetokäyrä pätee normaalivaatetukselle (1 clo) ja kevyelle istumatyölle (1 met). Saksalainen vetokäyrä poikkeaa suomalaisesta vetokäyrästöstä siinä, ettei käyrästössä esitetä kuin yksi käyrä lämpötila-alueella 22 °C–27 °C. Käyrää ei voi soveltaa alle 22 °C lämpötiloille, eikä kuvaajan arvoja voi soveltaa suoraan alle 22 °C:isen huoneen lämpötilaan. (Ilmastointitekniikka- ja sisäilmas-

to 2008, 26). Saksalainen standardi antaa mitoitusarvot myös ikkunatuuletukselle, mitä suomalaiset standardit ja mitoitusohjeet eivät tunne.

Vetoisuutta voidaan arvioidaan myös vetoindeksillä (CEN 1752), joka lasketaan kaavalla

$$DR = (3,7v Tu + 3,14) (34 - T_i) (v - 0,05)^{0,62} \quad (1)$$

DR on vetoindeksi (draft rating), %

$T_i$  on ilman virtauksen lämpötila, °C

Tu on ilman virtauksen turbulenssiaste (nopeuden keskihajonnan suhde keskinopeuteen) %

v on ilman keskinopeus, m/s.

Vetoindeksi ilmaisee tyytymättömien osuutta tilassa oleskelevista henkilöistä (Ilmastoinnin suunnittelu, 10). Huomioitavaa on kuitenkin, ettei DR-indeksi liity varsinaisesti mitenkään RakMk D2 tai sisäilmaluokitukseen.

### 4.3 Hiilidioksidipitoisuus

Rakennusten sisäilmassa oleva hiilidioksidi on yleensä ihmisten hengityksestä vapautuvan aineenvaihdunnan lopputulos. CO<sub>2</sub> pitoisuus ja hajut ovat suoraan verrannollisia tilassa oleskelevien ihmisten määrään. Opetustiloissa, kuten muissakin kokoontumistiloissa, missä ihmiset ovat pääasiallinen ilmanpilaaja, on tavallisesti ilmanvaihdon mitoituksen perusteena ihmisperäisten hajujen voimakkuus. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus tavanomaisissa sääoloissa ja huonetilan käyttöaikana saa olla yleensä enintään 1200 ppm (RakMK D2, 7).

Sisäilmaluokituksessa 2008 on annettu hiilidioksidipitoisuuden tavoitetasot sisäilmaluokittain. Sisäilmaluokituksessa on myös tavoitetasot hiilidioksidipitoisuuden pysyvyydelle käyttöaikana. S2- luokassa CO<sub>2</sub>-pitoisuuden tulisi olla alle 900 ppm (taulukko 4).

#### 4.4 Ilmamäärä

SrmMK osassa D2 on annettu rakennusten ilmanvaihtoa koskevat määräykset ja ohjeet, joita Sisäilmaluokitus 2008 täydentää (taulukko 4).

**TAULUKKO 4. Yhteenveto sisäilmaston teknisistä tavoitearvoista RakMK D2 ja Sisäilmaluokitus 2008 mukaan**

	RakMk D2	Sisäilmaluokitus 2008 S2-tavoitetaso
Sisälämpötilat (°C)		
- Talvi	21	( $t_u \leq 10^\circ\text{C}$ ) 21,5±1,0
- Kesä	23 (25)	( $t_u \geq 20^\circ\text{C}$ ) 24,5 ±1,0
Ilman nopeus (veto) (m/s)	Talvi 0,20 Kesä 0,30	( $t_{\text{ilma}}=21^\circ\text{C}$ ) 0,17 ( $t_{\text{ilma}}=23^\circ\text{C}$ ) 0,20 ( $t_{\text{ilma}}=25^\circ\text{C}$ ) 0,25
Ilman CO2 pitoisuus (ppm)	≤1200	< 900
Olosuhteiden pysyvyys (% käyttöajasta)		
toimi- ja opetustilat		90 %
asunnot		80 %
Ulkoilmavirta (dm <sup>3</sup> /s)/m <sup>2</sup>	3	4
Ulkoilmavirta (dm <sup>3</sup> /s)/hlö	6	8

## 5 KOHDERAKENNUS

Tutkimusta varten oli määriteltä tarkasteltavat kahdeksan (8) luokkahuonetta, kellari- ja 2. kerroksesta. Tutkittavista kerroksista oli valittu kaksi lännen ja kaksi idän suuntaista lämpötilaoloiltaan ongelmallisinta opetustilaa. Tutkittavat luokkatilat olivat kellarikerroksessa luokkatilat C2.065, C2.066, C2.071 ja C2.072, sekä toisesta kerroksesta luokkatilat C2.206, C2.207, C2.209 ja C2.210a. Luokissa käytettiin kahta erilaista ilmanjakoratkaisua. Muuttuvilmavirtajärjestelmää sekoittavalla kattopuhalluksella (kuva 9 ja 10) ja vakioilmavirtajärjestelmää ikkunapenkkisuutinkonvektoreilla (kuva 11).



**KUVA 9. Kuva kohteesta, lämmityspatterilla varustetut tuloilman IMS-säätöpellit**



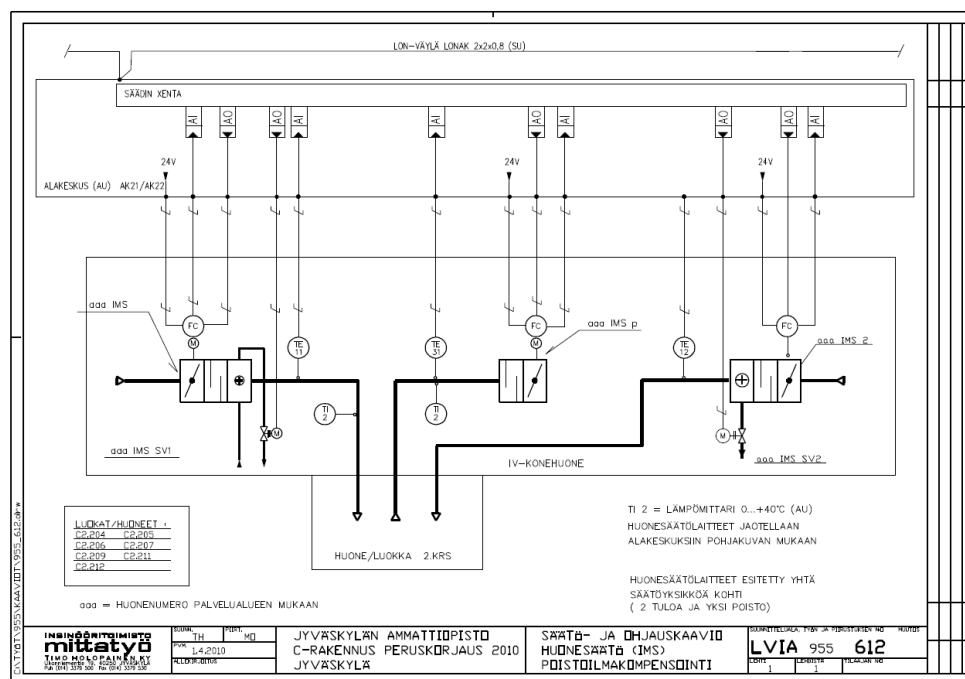
**KUVA 10. Kuva kohteesta, VSKA Pyörrehajoitin.**



**KUVA 11. Kohteessa käytetty suutinkonvektori, Swegon Oy**

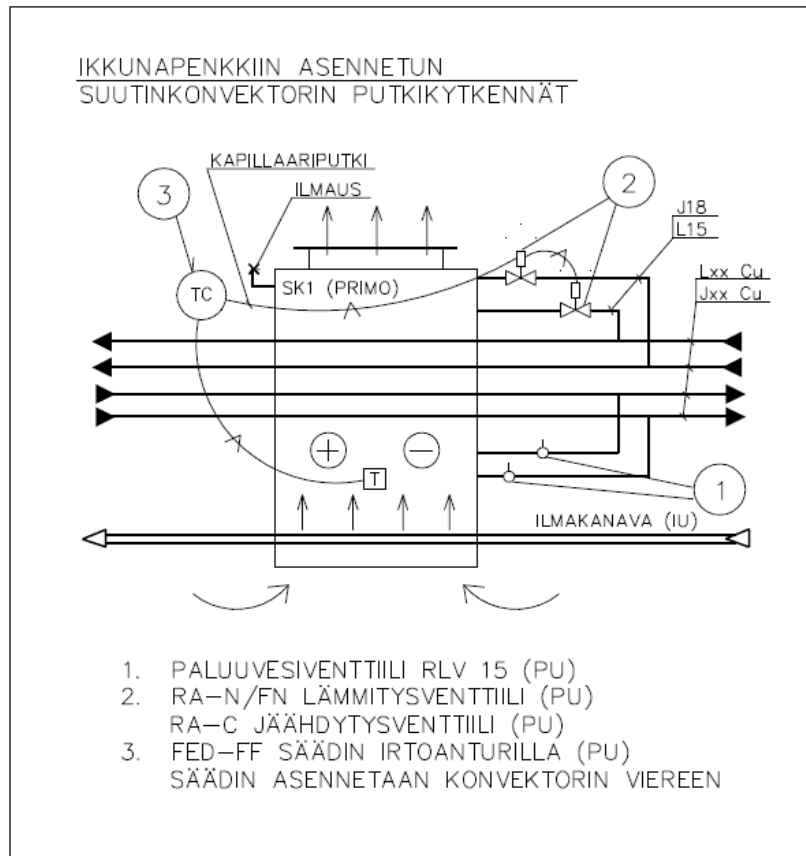
Tutkittavassa rakennuksessa ilmanvaihtolaitteet on uusittu kokonaisuudessaan vuonna 2012. Luokkahuoneiden sisäilman tavoitetaso on hankesuunnitelman mukaan S2. Suurin osa tiloista on varustettu koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Kaikissa iv-kojeissa on lämmön talteenotto ja tuloilmaa jäähdytetään ulkolämpötilan ollessa yli +16 °C. Hankkeessa on noudatettu puhtaan ilmanvaihtojärjestelmän rakennusperiaatteita ja SIY:n puhtausluokkaa P1.

Rakennuksen toista kerrosta palvelevat tulo-/ poistoilmakoneet TK31/PK31 ja TK32/PK32) on mitoitettu ilmavirroille 3,00 m<sup>3</sup>/s ja kellarikerrosta palvelevat tulo-/poistoilmakoneet TK33/PK33 0,75 m<sup>3</sup>/s ja TK34/PK34 1,07 m<sup>3</sup>/s ilmavirroille. Opetustiloihin, käytäviin ja yleisiin tiloihin tulee tulo- ja poistoilma, wc- tiloista ja osasta yleisiä tiloja on poistot. Rakennuksessa toisessa kerroksessa (kuva 10 ja 11) on VAV-järjestelmä ja pohjakerroksessa suutinkonevektori-ilmastointi (kuva 11).



**KUVA 12. Muuntuvilmavirtausjärjestelmän säätö- ja ohjauskaavio.**

Muuttuvilmavirtausjärjestelmän (kuva 12) luokkahuoneiden ilmavirtaa säädetään läsnäoloantureilla. Läsnäoloanturi ohjaa ilmanvaihdon maksimiarvoon henkilön tullessa luokkaan ja minimiarvoon huoneen ollessa tyhjänä ja käyttäjän poistuessa tilasta 30 minuutin viiveen jälkeen. Keskusilmanvaihtokoneelta lähtevän tuloilman lämpötila on 18 °C. Tilojen lämpökuorman vaihtelua tasataan tuloilmavirran jälkilämmityksellä, jonka säätö tapahtuu poistoilman lämpötilan mukaan.



**KUVA 13. Suutinkonvektorijärjestelmän kytkentäkaavio**

Suutinkonvektorit kohteessa on varustettu lämmitys- ja jäähdytysvesipatterilla (kuva 13). Lämpimän- ja jäähdytysveden virtausta säädetään FED-FF -säätimellä, joka on varustettu kapillaarianturilla. Jokaista suutinkonvektoria säädetään omalla säätimellä, joka on sijoitettu ikkunapenkille konvektorin viereen. Säätimessä on lämpötilan asetusarvot 17- 26 °C.

## 6 SISÄILMASTO JA TAVOITEARVOJEN MITTAAMINEN

RakMK D2:ssa ei esitetä lämpötilojen, ilmanlaadun ja ilmavirtojen mittausmenetelmiä, siinä esitetään vain luettelomaisesti mittauksia käsittelevät standardit ja ohjeet. Sisäilmastomittaukset tehdään yleensä pistokokein. Tietty osa rakennuksen huonetiloista tai huoneistoista valitaan satunnaisotoksella siten, että saadaan käsitys koko rakennuksen toimivuudesta ja suunnitelmien mukaisuudesta. Taulukossa 5 on esitetty ohjeet otoksien suuruudesta erilaisille sisäilmaston suureille. Otoksen suuruus määri-

tellään tapauskohtaisesti suunnitellun sisäilmaston luokitustason, rakennustyyppin ja tilojen käyttötarkoituksen mukaan (ToVa-käsikirja 2007, 151).

**TAULUKKO 5. Sisäilmastomittausten kattavuus (SFS 5511). Otoksen suuruus prosentteina mitattavista tiloista tai tilojen osista.**

Laatuluokka	A	B	C
Huoneilman lämpötila <sup>1)</sup>	100	40	20
Ilman nopeus (veto)	100	40	20
Pintojen lämpötilat	o	o	o
Operatiivinen lämpötila	z	z	z
Huoneilman kosteus	10	10	o
Huoneilman laatu (pitoisuudet)	o	o	o
Huonekohtainen tuloilmavirta <sup>2)</sup>	100	40	20
Huonekohtainen poistoilmavirta <sup>2)</sup>	100	40	20
Äänitaso huoneessa (SFS 5517) <sup>3)</sup>	30	20	10
Painesuhteet (paine-ero ja suunta)	30	20	10
Ääneneristävyys	z	z	z
Tuloilman lämpötila	z	z	z

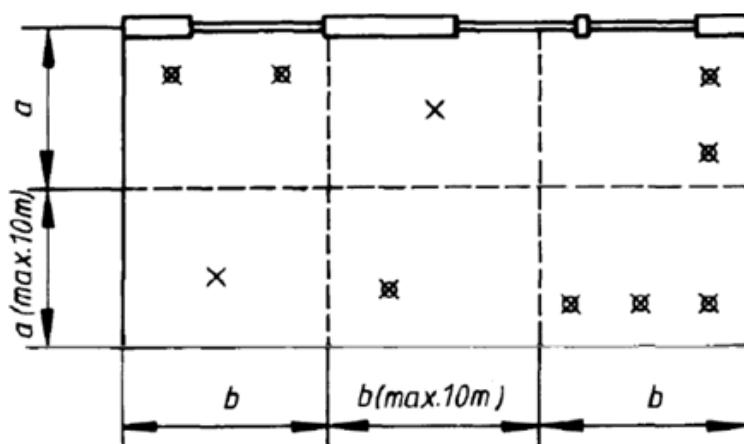
- A = Korkea sisäilmaston taso, esim. S1.
- B = Hyvä sisäilmaston taso, esim. S2.
- C = Tyydyttävä, viranomaismääräykset täyttävä sisäilmaston taso, esim. S3.
- o Mitataan vain, jos erikseen sovitaan.
- z Mitataan, jos on ilmeiset syyt epäillä, että suunnitelmat/vaatimukset eivät toteudu.
- 1) Lämmönjaon perussäädön yhteydessä tehdään kaikkien huoneiden lämpötilojen mitta.
- 2) Ilmavirtojen perussäädön yhteydessä mitataan kaikkien huoneiden tulo- ja poistoilmavirrat sekä koko laitoksen ilmavirrat.
- 3) Kun huonetilat ovat lähinnä samantyyppisiä tiloja, joiden äänitaso on sama. Muussa tapauksessa otos valitaan suuremmaksi.

Huoneilman lämpötilan, ilman liikenopeuden, ilmanmäärän ja hiilidioksiditason (CO<sub>2</sub>) mittauksiin liittyy useita eri standardeja. Mittauksiin liittyvät standardit on esitetty taulukossa 6.

**TAULUKKO 6. Huoneilman lämpötilan, ilman liikenopeuden, ilmamäärän ja hiilidioksiditason (CO<sub>2</sub>) mittauksiin liittyvät standardit**

Mittaus	Standardi	Standardin kuvaus
Lämpötila	SFS 5511	Rakennusten sisäilmasto. Lämpöolojen kenttämittaukset
Veto	SFS 5511	Rakennusten sisäilmasto. Lämpöolojen kenttämittaukset
CO <sub>2</sub>	SFS 5412	Päästöt. Palamiskelpoiset savukaasut. Hiili-monoksidin määrittäminen ei dispersiivisellä infrapuna-absorptiomenetelmällä
Ilmavirta	SFS 5512	Ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa

Huoneilman lämpötilan mitataan standardin SFS 5511 kohdan 4 mukaisesti ja mittauspisteet valitaan suurissa tiloissa standardin SFS 5511 kuvan 1 mukaan (SFS 511, 3).



**O= työpiste (kiinteä)**

**X= mittauspiste (valittavissa oleva)**

**KUVA 14. Mittauspisteiden valinta suurissa tiloissa (SFS 5511)**

Ilman nopeuden mittaus tulee tehdä standardin SFS 5511 kohdan 7 mukaisesti. Ilman nopeus on kolmen minuutin keskiarvo, joka on mitattu suuntariippumattomalla anemometrillä standardin SFS 5511 mukaan (Sisäilmaluokitus 2008, 11). Ilman nopeus mitataan samoista mittauspisteistä kun huoneilman lämpötila ja lisäksi myös kohdissa, joissa on esiintynyt vetoa. Operatiivisen lämpötilan käytetään yleensä ns. pallolämpömittaria, kun ilman virtausnopeus on alle 0,4 m/s (SFS 5511). Sisäilman hiilidioksi-

dipitoisuuden mittaamisen on useita tapoja. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden vaihteluita (usean tunnin tai vuorokauden aikana) on suositeltavaa seurata sellaisilla jatkuva-toimisilla, rekisteröivillä mittalaitteilla, joiden toiminta perustuu esimerkiksi infrapunasäteilyn adsorptioon (SFS 5412) tai sähkökemialliseen kennoon. Mittalaitteet on kalibroitava säännöllisesti ja sähkökemiallisten laitteiden kennot on uusittava muutama vuoden välein. Hetkellinen hiilidioksidipitoisuus voidaan mitata myös suoraan osoittavilla ilmaisinputkilla, jotka värjäytyvät imettäessä niiden läpi tietty ilmavirta (Asumisterveysohje, 63–64) .

#### TAULUKKO 7. Tutkimuksessa käytetyt mittauslaitteet

Mittaus	Mittalaite	Mittausmenetelmä
Ilman lämpötila °C	EBI-20 dataloggeri	seurantamittaus
Ilman liikenopeus, m/s	SwemaAir 300 + Swema 03 olosuhdeanturi	seurantamittaus
Hiilidioksidipitoisuus, ppm	TSI IAQ-CALC 7535	seurantamittaus
Ilmamäärä, l/s	TSI DP-CALC 5815	paine-ero mittaus

#### TAULUKKO 8. Tutkimuksessa käytettyjen mittauslaitteiden tekniset tiedot

Mittaus	Mittalaite	Mittaus- alue	Mittautark- kuus	Mittalaitteen tarkkuusvaa- timus	Kalobroin- ti
Ilman lämpötila °C	EBI-20 data- loggeri	– 30 - +60 °C	±0.5 °C (-20 - +40 °C)	0,2 °C	
Ilman liikenopeus, m/s	SwemaAir 300 + Swema 03 olosuh- deanturi	0.05..3 m/s (lämpötila- alueella +10 °C - +34 °C)	+/- 0.03 m/s (mittaus alu- eella 0.05 m/s - 1 m/s)	0,05 m/s	2.12.2010
Lämpötila °C		10 °C - 40 °C	+/- 0. °C (mittausalueel- la +10°C - 40°C)	0,2 °C	
Hiilidioksidipitoi- suus, ppm	TSI IAQ- CALC 7535				17.5.2012
Ilman virtausnope- us m/s Paine, Pa	TSI DP- CALC 5815	0.27 - 78.7 m/s ±3735 Pa	±1 % luke- masta ± 1Pa	5-10 %	14.5.2012

## 6.1 Huoneilman lämpötilan, ilman liikenopeuden ja hiilidioksiditason (CO<sub>2</sub>) mittauslaitteet

Tutkimuksessa käytettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun ja Jyväskylän ammattiopiston mittauslaitteita (taulukko 7). Ilman lämpötilan, ilman liikenopeuden ja hiilidioksidin mittauksiin käytettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun mittalaitteita. Ilmamäärien mittaus tapahtui Jyväskylän ammattiopiston mittauslaitteilla. Mittauslaitteiden kalibroinnista huolehtivat Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI-laboratorio ja Jyväskylän ammattiopisto. Mittarit on käytetty maahantuojalla kalibroitavana ennen mittauksia (taulukko 8).

### TAULUKKO 9. Tutkittujen luokkien pinta-alat, korkeudet, suunniteltu ilmamäärä ja ilmastointitapa

Tila	Pinta-ala A m <sup>2</sup>	Korkeus h m	Suun.ilmamäärä q <sub>v</sub> l/s/m <sup>2</sup>	Ilmastointitapa	Ilman- suunta	Kerros (2.krs/ kellari)
C2.065	58	2,63	±3,3	Suutinkonvektori	Itä	kellari.
C2.066	58	2,63	±3,3	Suutinkonvektori	Itä	kellari
C2.071	58	2,63	±3,3	Suutinkonvektori	Länsi	kellari
C2.072	58	2,63	±3,3	Suutinkonvektori	Länsi	kellari
C2.206	56,5	2,85	±4,2	IMS-järjestelmä	Itä	2.krs
C2.207	55	2,85	±4,2	IMS-järjestelmä	Itä	2.krs
C2.209	56	2,85	±4,2	IMS-järjestelmä	Länsi	2.krs
C2.210a	37	2,85	±3,2	IMS-järjestelmä	Länsi	2.krs

## 6.2 Lämpötila

Ilman lämpötila mitattiin kiinteiden työpisteiden ja koko huonetilaa edustavista pisteistä 1,1 m korkeudelta lattiasta (kuvat 19–25). Lämpötilan kerrostumisen selvittämiseksi lämpötilat mitattiin 0,1 m, ja 1,1 m korkeudelta.

Lämpötilojen seurantamittaukset suoritettiin dataloggereilla kolmessa jaksossa. 11-15.5.2012, 20-24.8.2012 ja 10-14.12.2012 välisenä aikana 0,1 m ja 1,1 m korkeudelta lattiasta. Lämpötilojen mittaukseen käytettiin Ebro Electronic GmbH & Co valmista-

mia EBI-20 dataloggereita (kuva 15). Dataloggerit mittaavat ja tallentavat lämpötila- ja kosteusarvoja valitulta ajanjaksolta.



**KUVA 15. Dataloggeri**

### **6.3 Ilman liike ja veto**

Tutkituista luokkahuoneesta mitattiin ilman liikenopeus neljästä pisteestä, 0,1m ja 1.1 m korkeudelta (kuvat 20–26). Mittaukset suoritettiin järjestelmän maksimi- ja minimi-ilmavirroilla. Mittaukset tehtiin, ja mittauspaikat valittiin standardin SFS 5511 mukaan. Ilman liikenopeus ja vetoindeksi mitattiin SwemaAir 300 -mittarilla, johon oli liitetty suuntariippumaton olosuhdeanturi Swema 03 (kuva 15). Ilman nopeus ja vetoindeksi määritettiin kolmen minuutin keskiarvona. Vetokriteerinä mittaustulosten tarkastelussa käytettiin D2:n ja Sisäilmastoluokitus 2008 S2:n arvoja. Vetomittaukset suoritettiin luokkien minimi- ja maksimi-ilmavirroilla 27–29.5.2012 välisenä aikana. Samalla tarkistettiin pohjakerroksen opetustilojen ilmavirtojen oikeellisuus mittaamalla opetustiloja palvelevien runkokanavien säätöpelleiltä tulo- ja poistomäärät, joita verrattiin ilmanvaihtosuunnitelmien ilmamääriin (taulukko 10 ja 11).



**KUVA 16. Kuva kohteesta, vetomittaus 0,1 m korkeudelta**



**KUVA 17. Vetomittari SwemaAir ja Swema 03**

#### **6.4 Hiilidioksidipitoisuuden mittaus**

Hiilidioksidipitoisuus suositellaan mitattavaksi sellaisella jatkuvatoimisella, rekisteröivällä mittalaitteilla, jonka toiminta perustuu infrapunasäteilyn adsorptioon (SFS

5412) tai sähkökemialliseen kennoon. Tässä tutkimuksessa huoneilman CO<sub>2</sub> pitoisuuden seurantomittaukseen käytettiin TSI IAQ-CALC 7535 -mittaria (kuva 18).



**KUVA 18. CO<sub>2</sub> mittari TSI IAQ-CALC 7535**

Ilman CO<sub>2</sub> pitoisuus mitattiin yhdestä pisteestä 1,7 m korkeudelta lattiasta (kuva 19). Mittaus suoritettiin yhdestä kellarikerroksen ATK-luokasta ja yhdestä 2. kerroksen opetustilasta kolmessa jaksossa. 11.5.2012, 20.8.2012 ja 10–14.12.2012 välisenä aikana 1,7 m korkeudelta lattiasta opetustiloista C2.071 ja C2.207. Luokkien henkilömäärää seurattiin koko mittausjakson ajan.



**KUVA 19. Kuva kohteesta, CO<sub>2</sub> mittauslaitteisto**

## 6.5 Ilmamäärämittausten suoritus

Ilmamäärämittaukset suoritettiin 1.6.2012. Mittauslaitteistona käytettiin TSI DP-CALC 5815 -paine-eromittaria. Mittaus suoritettiin standardin SFS 5512, ilmavirtojen ja painesuhteiden mittaus ilmastointilaitoksissa mukaan.

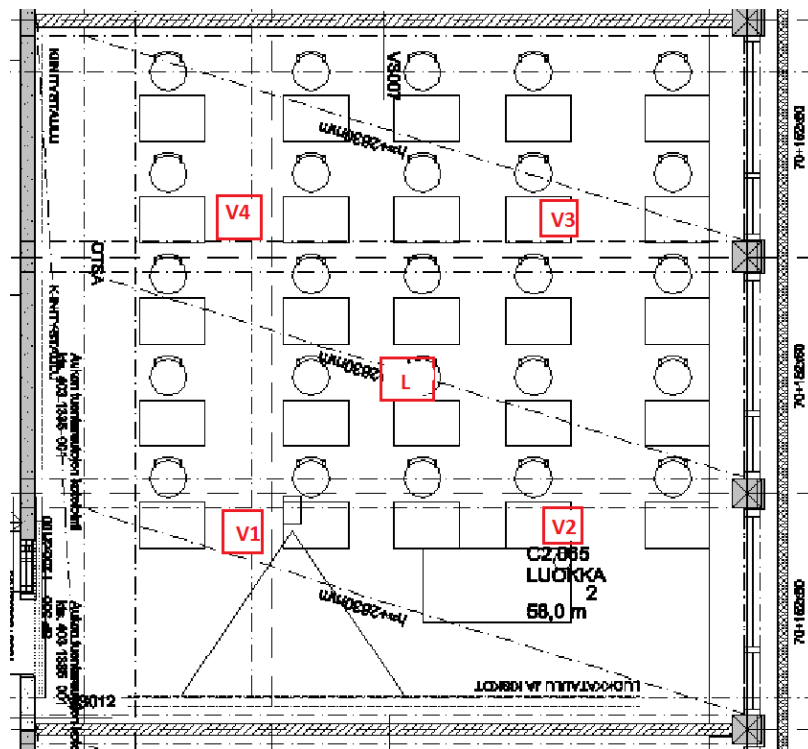
## 6.6 Mittauspisteiden valinta

Huoneilman lämpötilan ja veto mittauspisteet valitaan suurissa tiloissa standardin kuvan 1 mukaan (SFS 511, 3). Mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvissa 20–27.

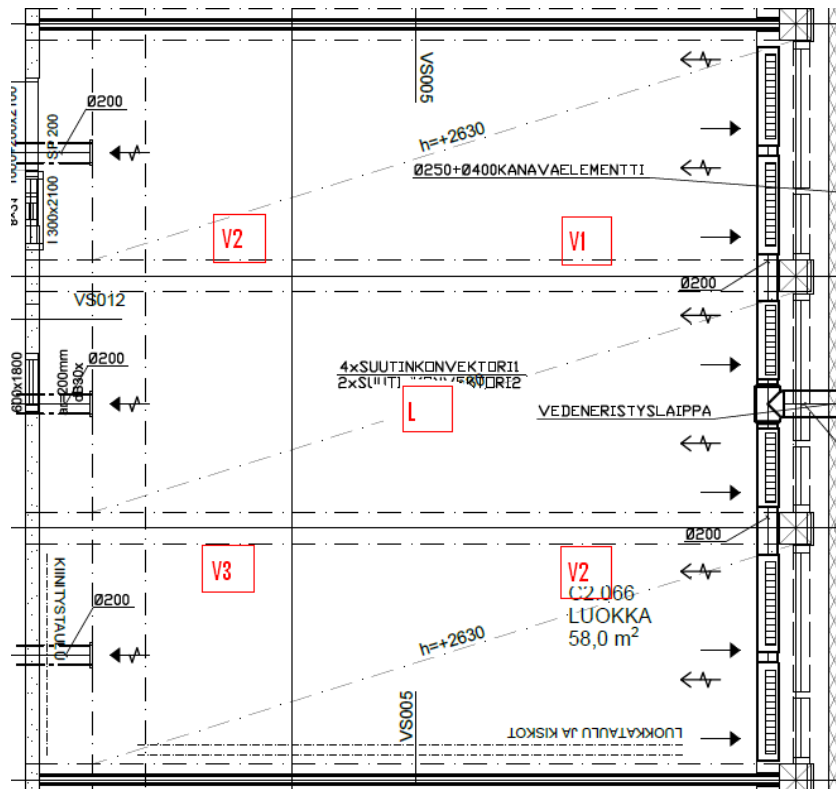
### Opetustilat, merkintöjen selitykset;

V1-V4 = Vetomittauspisteet

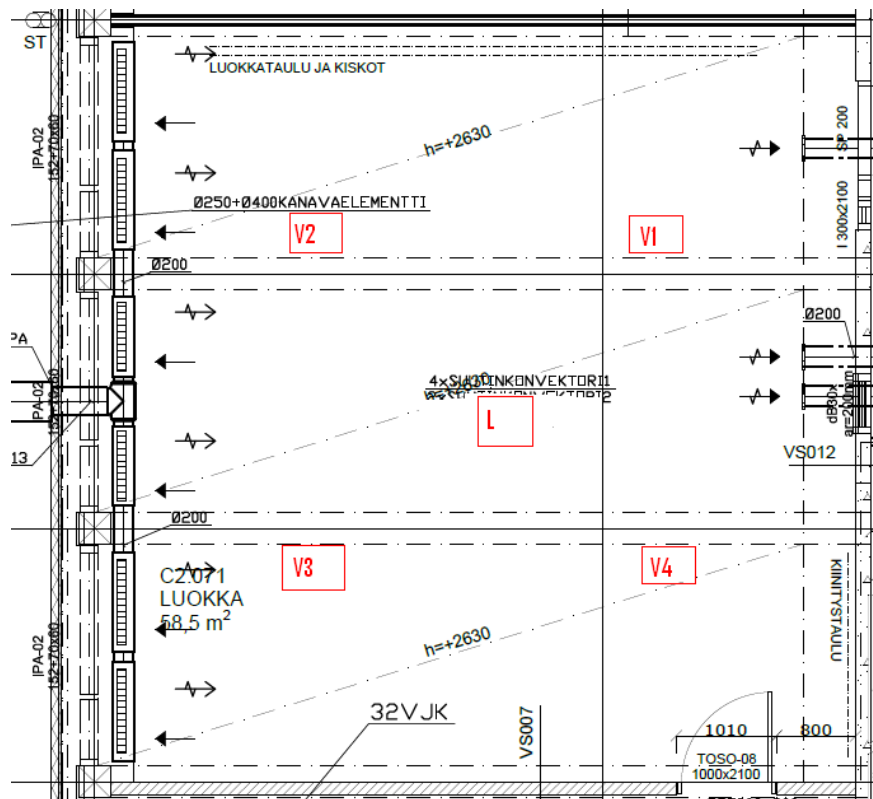
L = Lämpötilaseurantapisteet



KUVA 20. Opetustila C2.065 mittauspisteet

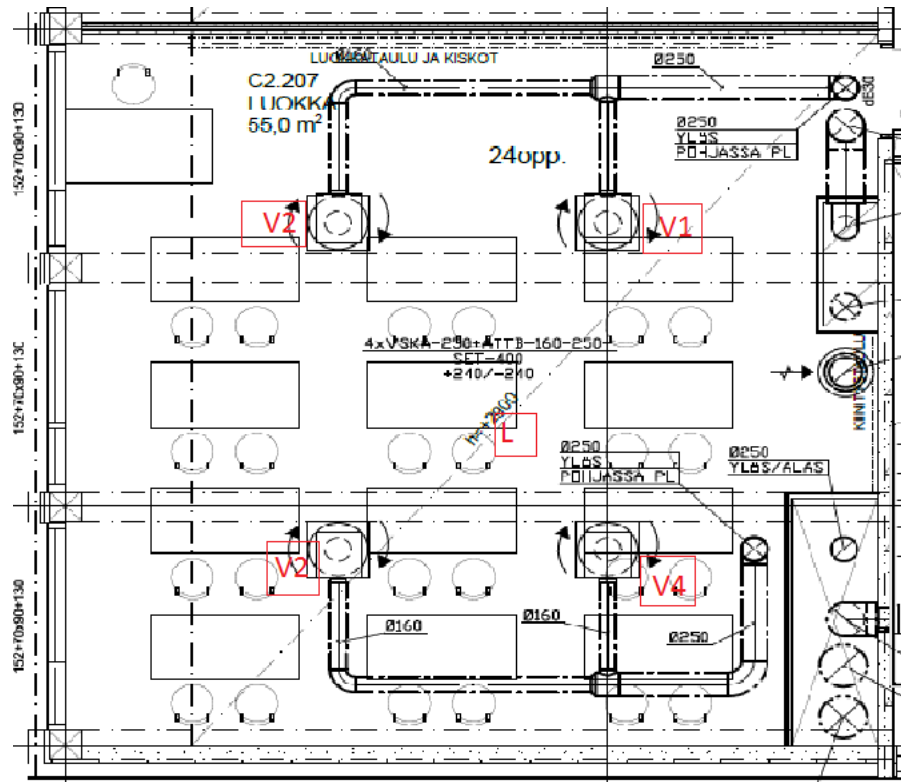


KUVA 21. Opetustila C2.066 mittauspisteet

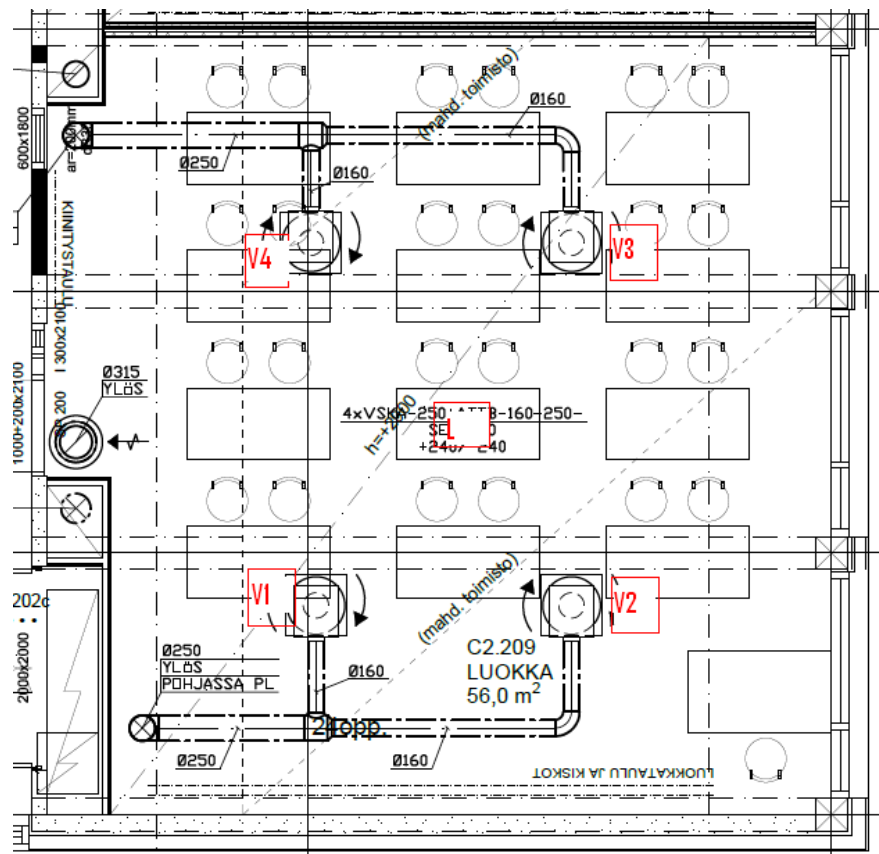


KUVA 22. Opetustila C2.071 mittauspisteet

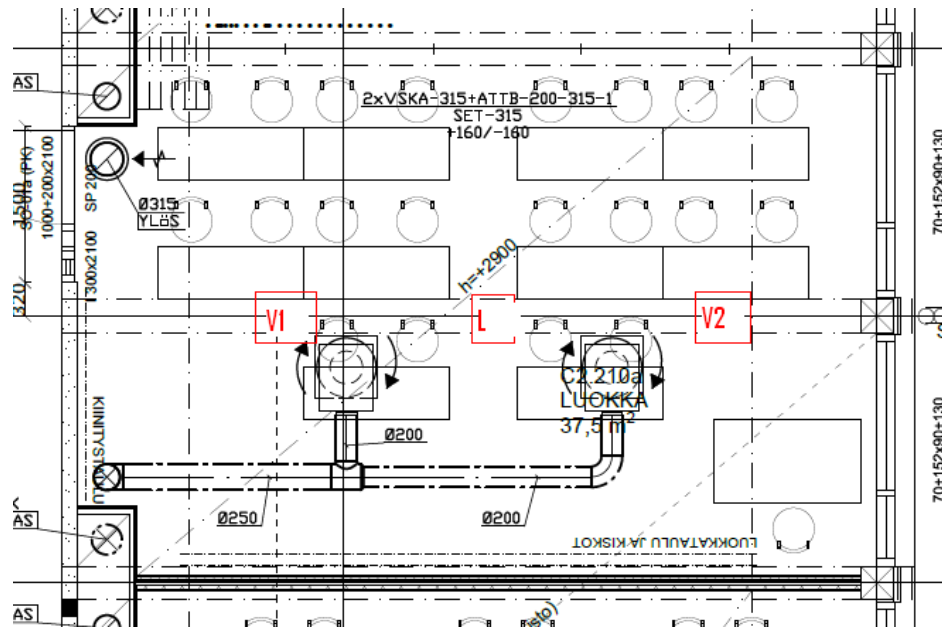




KUVA 25. Opetustila C2.207 mittauspisteet



KUVA 26. Opetustila C2.209 mittauspisteet



**KUVA 27. Opetustila C2.210a mittauspisteet**

## 7 SISÄILMAMITTAUSTEN TULOKSET

Rakennuksen 2. kerroksen luokkien tulo- ja poistoilman ilmapirrat tutkimukseen saatiin kiinteistöautomaation kautta. Ilmavirtojen oikeellisuus todettiin tarkistusmittauksin 2. kerrosta palvelevien IMS:en mittarenkaasta ja kellarikerroksen tilojen tulo- ja poistoilmakanavien IRIS-säätöpelleistä (taulukko 10 ja 11).

### 7.1 Ilmamäärämittaukset

Toisen kerroksen tarkastusmitatut ilmamäärät poikkesivat taloautomaatiosta saatuihin ilmavirtoihin verrattuna 0,6-6,6 %, keskimääräisen poikkeaman ollessa 3,2 %. Opetustilat olivat seuranta tutkimusten aikana normaalissa opetuskäytössä (taulukko 11).

**TAULUKKO 10. Ilmavirtamittaukset 11.2.2013 (1/1- ilmavirta) pohjakerroksessa**

Ilmavirtamittaukset					
Opetustila	Koko	Mitatut ilmamäärät		Suunniteltu ilmamäärä	
		Tulo l/s	Poisto l/s	Tulo l/s	Poisto l/s
C2.065	IRIS-250	177	182	190	190
C2.066	IRIS-250	203	193	190	190
C2.070	IRIS-250	185	215	190	190
C2.071	IRIS-250	188	213	190	190

**TAULUKKO 11. Ilmavirtamittaukset 1.6.2012 rakennuksen toisessa kerroksessa**

IMS-säädin	Suunniteltu ilma- virta l/s	Ilmavirta taloauto- maatikasta l/s	Mitattu ilma- virta l/s	Poikkeama %
206a IMS <sub>t</sub>	+120	+54	+57,7	6,9
206b IMS <sub>t</sub>	+120	+56	+53,1	5,2
206 IMS <sub>p</sub>	-240	-114	-113,4	0,6
207a IMS <sub>t</sub>	+120	+54	+53,1	1,6
207b IMS <sub>t</sub>	+120	+103	+103,7	0,6
207 IMS <sub>p</sub>	-240	-117	-120,0	2,5
209a IMS <sub>t</sub>	+120	+55	+53,1	3,4
209b IMS <sub>t</sub>	+120	+56	+98,6	79,3
209a IMS <sub>p</sub>	-240	-222	-226,3	1,8
210a IMS <sub>t</sub>	+160	+78	+82,9	6,2
210a IMS <sub>p</sub>	-160	-77	81,6	6,0
210b IMS <sub>t</sub>	+160	+82	82,9	1,1
210b IMS <sub>p</sub>	-160	-75	73,3	2,2

## 7.2 Opetustilojen olosuhdemittaukset

**TAULUKKO 12. Opetustilan C2.065 olosuhdemittaukset (suutinkonvektorit)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman lämpötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi <b>DR</b> (%)
1	50	0,1	20,8	0,08	5
	50	1,1	20,8	0,11	11
2	50	0,1	20,8	0,03	0
	50	1,1	20,8	0,07	6
3	50	0,1	20,6	0,18	19
	50	1,1	20,8	0,13	13
4	50	0,1	20,7	0,06	4
	50	1,1	20,9	0,06	2
1	100	0,1	20,5	0,09	9
	100	1,1	20,7	0,21	28
2	100	0,1	20,4	0,19	18
	100	1,1	20,6	0,21	19
3	100	0,1	20,2	0,25	26
	100	1,1	20,3	0,14	17
4	100	0,1	20,4	0,21	23
	100	1,1	20,5	0,09	8

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, ei vetoa esiinny kuin yhdessä mittauspisteessä 0,1m korkeudella, joka sekin on vetoarvon rajalla. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kolmessa mittauspisteessä 0,1m korkeudella ja kahdessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella.

**TAULUKKO 13. Opetustila C2.066 olosuhdemittaukset (suutinkonvektorit)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman lämpötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi <b>DR</b> (%)
1	50	0,1	19,1	0,12	13
	50	1,1	19,3	0,05	2
2	50	0,1	18,8	0,19	23
	50	1,1	19,2	0,09	10
3	50	0,1	18,9	0,10	10
	50	1,1	19,0	0,11	13
4	50	0,1	19,1	0,10	10
	50	1,1	19,1	0,09	10
1	100	0,1	18,8	0,27	30
	100	1,1	19,2	0,13	15
2	100	0,1	18,5	0,22	26
	100	1,1	18,7	0,21	27
3	100	0,1	18,8	0,29	85
	100	1,1	19,0	0,17	17
4	100	0,1	19,0	0,16	17
	100	1,1	19,3	0,15	18

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, ei vetoa esiinny kuin yhdessä mittauspisteessä 0,1 m korkeudella lattiasta. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kolmessa mittauspisteessä 0,1m korkeudella ja kahdessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella. Mittauspisteet joissa molemmissa korkeuksissa ylitettiin vetokriteerin raja sijaitsevat lähempänä puhallinkonvektoreita. Tässä luokkatilassa on huomattava, että ilman lämpötila oli koko mittausajan alle operatiivisen lämpötilan minimiarvon.

**TAULUKKO 14. Opetustila C2.071 olosuhdemittaukset (suutinkonvektorit)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman lämpötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi $DR$ (%)
1	50	0,1	21,4	0,09	9,9
	50	1,1	21,1	0,05	0,0
2	50	0,1	21,7	0,16	14,4
	50	1,1	21,5	0,08	8,1
3	50	0,1	21,8	0,15	13,2
	50	1,1	21,4	0,11	11,0
4	50	0,1	21,9	0,12	11,0
	50	1,1	21,5	0,09	7,2
1	100	0,1	21,5	0,21	19,3
	100	1,1	21,2	0,04	0,0
2	100	0,1	21,7	0,21	17,3
	100	1,1	21,6	0,22	21,6
3	100	0,1	21,8	0,21	17,9
	100	1,1	21,6	0,24	24,3
4	100	0,1	21,8	0,14	12,9
	100	1,1	21,7	0,11	11,6

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, ei vetoa esiinny yhdessäkään mittauspisteessä. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kaikissa mittauspisteissä 0,1 m korkeudella ja yhdessä mittauspisteessä 1,1m korkeudella. Myös tässä luokkatilassa mittauspiste jossa molemmissa korkeuksissa ylitettiin vetokriteerin raja, sijaitsee lähempänä puhallinkonvektoreita, kuin toiset mittauspisteet.

**TAULUKKO 15. Opetustila C2.072 olosuhdemittaukset (suutinkonvektorit)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman lämpötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi <b>DR</b> (%)
1	50	0,1	20,0	0,24	27
	50	1,1	20,3	0,08	7
2	50	0,1	19,3	0,26	33
	50	1,1	20,0	0,15	18
3	50	0,1	20,1	0,23	27
	50	1,1	20,0	0,08	8
4	50	0,1	21,1	0,15	15
	50	1,1	20,3	0,10	11
1	100	0,1	19,6	0,24	28
	100	1,1	19,7	0,21	28
2	100	0,1	20,0	0,123	14
	100	1,1	20,0	1,19	71
3	100	0,1	19,9	0,25	27
	100	1,1	19,9	0,26	35
4	100	0,1	19,7	0,18	19
	100	1,1	20,1	0,11	12

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, vetoa esiintyy kolmessa mittauspisteessä 0,1 m korkeudella lattiasta. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kahdessa mittauspisteessä 0,1m korkeudella ja kahdessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella.

**TAULUKKO 16. Opetustila C2.206 olosuhdemittaukset (IMS-järjestelmä)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman läm- pötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi DR (%)
1	50	0,1	20,8	0,13	12
	50	1,1	21,5	0,02	0,0
2	50	0,1	21,0	0,06	2
	50	1,1	21,1	0,07	5
3	50	0,1	21,0	0,13	13
	50	1,1	21,2	0,05	1
4	50	0,1	20,9	0,06	8
	50	1,1	20,9	0,06	2
1	100	0,1	20,4	0,18	21
	100	1,1	20,6	0,14	18
2	100	0,1	20,6	0,17	17
	100	1,1	20,7	0,08	8
3	100	0,1	20,6	0,23	23
	100	1,1	20,9	0,09	8
4	100	0,1	20,6	0,17	20
	100	1,1	20,7	0,06	3

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, vetoa ei esiinny yhdessäkään mittauspisteessä. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kaikissa neljässä mittauspisteessä 0,1m korkeudella. Vetoa ei esiinny mittauspisteissä 1,1m korkeudella.

**TAULUKKO 17. Opetustila C2.207 olosuhdemittaukset (IMS-järjestelmä)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman läm- pötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi DR (%)
1	50	0,1	20,4	0,12	12
	50	1,1	20,8	0,17	18
2	50	0,1	20,9	0,11	12
	50	1,1	20,9	0,09	7
3	50	0,1	20,7	0,17	18
	50	1,1	20,8	0,06	3
4	50	0,1	20,7	0,13	16
	50	1,1	20,6	0,20	22
1	100	0,1	20,5	0,23	22
	100	1,1	20,4	0,30	31
2	100	0,1	20,7	0,13	14
	100	1,1	20,5	0,27	31
3	100	0,1	20,6	0,18	19
	100	1,1	20,6	0,33	93
4	100	0,1	20,5	0,23	25
	100	1,1	20,5	0,13	14

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, vetoa esiintyy yhdessä mittauspisteessä 0,1 m korkeudella ja kahdessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella lattiasta. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kolmessa mittauspisteessä 0,1m korkeudella ja kolmessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella lattiasta.

**TAULUKKO 18. Opetustilan C2.209 olosuhdemittaukset (IMS-järjestelmä)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman läm- pötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi DR (%)
1	50	0,1	22,0	0,06	3
	50	1,1	22,0	0,04	0,0
2	50	0,1	21,9	0,10	8
	50	1,1	22,2	0,09	9
3	50	0,1	22,3	0,14	13
	50	1,1	22,2	0,07	5
4	50	0,1	22,1	0,17	17
	50	1,1	22,1	0,07	6
1	100	0,1	20,7	0,27	33
	100	1,1	20,9	0,25	30
2	100	0,1	20,9	0,20	21
	100	1,1	21,1	0,06	4
3	100	0,1	21,0	0,25	25
	100	1,1	21,2	0,08	7
4	100	0,1	20,9	0,25	26
	100	1,1	20,9	0,24	30

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, vetoa esiintyy yhdessä mittauspisteessä 0,1 m korkeudella lattiasta. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy neljässä mittauspisteessä 0,1m korkeudella ja kahdessa mittauspisteessä 1,1m korkeudella.

**TAULUKKO 19. Opetustilan C2.210a olosuhdemittaukset (IMS-järjestelmä)**

Mittauspiste	Ilmavirta $q_v$ (%)	Mittauskorkeus $h$ (m)	Ilman läm- pötila $t_i$ (°C)	Ilman nopeus $v$ (m/s)	Vetoindeksi DR (%)
1	50	0,1	20,3	0,10	11
	50	1,1	20,8	0,03	0,0
2	50	0,1	21,0	0,19	17
	50	1,1	21,1	0,04	0,0
3	50	0,1	21,0	0,18	20
	50	1,1	21,1	0,01	0,0
1	100	0,1	20,7	0,48	161
	100	1,1	20,4	0,03	0,0
2	100	0,1	20,7	0,35	49
	100	1,1	20,8	0,12	14
3	100	0,1	20,8	0,26	29
	100	1,1	21,0	0,07	5

Kun käytetään 50 % ilmavirtaa, vetoa esiintyy kahdessa mittauspisteessä 0,1 m korkeudella lattiasta. Käytettäessä 100 % ilmavirtaa vetoa esiintyy kolmessa mittauspisteessä 0,1m korkeudella. Vetoa ei esiinny mittauspisteessä 1,1m korkeudella.

### 7.3 Opetustilojen huonelämpötilojen pysyvyysmittaukset

Seurantamittauksien aikana ilmanvaihto toimi kiinteistöautomaatiikan ohjaamana. Pohjakerroksessa tilojen käyttäjillä on mahdollisuus säätää tilakohtaisesti tuloilman lämpötilaa  $\pm 3^\circ\text{C}$  tavoitetasosta  $21,5^\circ\text{C}$ . Mittausten ajaksi säätimet on asetettu keskiasentoon ( $+21,5^\circ\text{C}$ ). Rakennuksen 2. kerroksen mittauksien aikana ilmanvaihto toimi kiinteistöautomaatiikan ohjaamana, säätäen läsnäolotunnistimen ohjaamana ilmanvaihdon maksimiteholle, kun käyttäjä tulee opetustilaan. Dataloggereiden mittaustuloksista on otettu tulosten tarkasteluun kultakin mittausjakson päivältä tilojen pääasiallinen käyttöaika klo 8:00–16:00.

Tuloksista tarkastellaan sitä, mikä on ollut kunkin mittauspisteen minimi- ja maksimi-lämpötila ja kuinka monta prosenttia tutkimusajasta lämpötila on pysynyt Sisäilma-

luokitus 2008 luokan S2 tavoitearvojen sisällä. Tarkasteluun kuuluu myös se, kuinka monta prosenttia tutkimusajasta lämpötila on ollut sallitun minimi- ja maksimilämpötilarajan sisäpuolella ja kuinka monta prosenttia ajasta lämpötila on ollut sallittujen rajojen ala- tai yläpuolella. Mittaustulokset on taulukoitu kerroskohtaisesti mittausjaksoittain.

Toukokuun mittausten aikana vuorokautinen keskilämpö oli 13,6 °C, elokuussa 11,7 °C ja joulukuussa -6,3 °C. Kaikille mittausjaksoille on laskettu taulukon 20 mukaiset operatiiviset lämpötilat ja operatiivisen lämpötilan enimmäisarvot käyttäen ulkoilman lämpötilana mittausjakson keskimääräistä vuorokausilämpötilaa.

Operatiivinen lämpötila, kun ulkoilman lämpötila  $10 < t_u \leq 20$  °C, lasketaan kaavalla

$$t_{op} = 21,5 + 0,3(t_u - 10) \quad (2)$$

$t_{op}$  = Operatiivinen lämpötila °C

$t_u$  = Ulkolämpötila, °C (24 h liukuva keskiarvo)

Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo, kun ulkoilman lämpötila  $10 < t_u \leq 20$  °C, lasketaan kaavalla

$$t_{opmax} = 21,5 + 0,4(t_u - 10) \quad (3)$$

$t_{opmax}$  = Operatiivinen maksimilämpötila, °C

$t_u$  = Ulkolämpötila, °C (24 h liukuva keskiarvo)

**TAULUKKO 20. Operatiiviset lämpötilat mittausjaksojen aikana**

Mittausjakso	$t_u$ (24h) (°C)	$t_{op}$ (°C)	$t_{op}$ , tavoitearvo (°C)	$t_{op}$ , min (°C)	$t_{op}$ , max (°C)
Toukokuu	13,6	22,6	21,6 – 23,6	20	23
Elokuu	11,7	22,0	21,0 – 23,0	20	23
Joulukuu	-6,3	21,5	20,5-23,5	20	23

**Taulukoissa 20-26 käytetyt symbolit ovat:**

$h$ =	mittauskorkeus lattiasta, m
$t_k$ =	ilman keskilämpötila mittausjakson aikana, °C
$t_{min}$ =	ilman minimilämpötila mittausjakson aikana, °C
$t_{max}$ =	ilman maksimilämpötila mittausjakson aikana, °C
$t_{<min}$ =	ilman lämpötila alle minimitavoitelämpötilan (21,6 °C/21,0/21,5) mittausjakson aikana, %
$t_{>max}$ =	ilman lämpötila yli maksimitavoitelämpötilan (23,6 °C/23,0/23,5) mittausjakson aikana, %
$t_{<20,0}$ =	ilman lämpötila alle sallitun minimilämpötilan (20,0 °C) mittausjakson aikana, %
$t_{>25,0}$ =	ilman lämpötila yli sallitun maksimilämpötilan (25,0 °C) mittausjakson aikana, %
$t_t$ =	ilman lämpötilan pysyvyys tavoitelämpötila-alueella, %
$t_{tmax}$ =	ilman lämpötilan pysyvyys maksimilämpötila-alueella +20 °C - +25 °C

**TAULUKKO 21. Pohjakerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mittausaika 21–25.5.2012, suutinkonvektorijärjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo 13,6 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;25,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.065</b>	0,1	20,2	19,5	21,7	58,6	0,0	33,0	0,0	0,0	47,0
	1,1	20,4	19,3	21,7	47,4	0,0	26,2	0,0	1,4	73,8
<b>C2.066</b>	0,1	19,8	18,7	20,9	96,7	0,0	68,9	0,0	0,0	31,1
	1,1	20,1	18,8	21,7	58,6	0,0	43,1	0,0	1,2	56,9
<b>C2.071</b>	0,1	21,9	21,0	23,0	0,0	0,0	12,4	0,0	72,6	87,6
	1,1	21,8	20,8	21,7	0,0	0,8	62,5	0,0	66,2	37,5
<b>C2.072</b>	0,1	19,4	18,2	21,6	83,9	0,0	72,8	0,0	0,2	27,2
	1,1	21,8	20,8	23,0	0,0	4,1	0,0	0,0	60,6	100,0

Toukokuun aikana pohjakerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että pohjakerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat olleet liian alhaiset. Ilman keskilämpötila on ollut kolmessa opetustilassa alle sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 22,6 °C. Huonelämpötila alitti jokaisessa opetustilassa sallitun minimilämpötilan 20 °C 12,4–72,6 % mittausajasta. Ilman lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä joka toukokuussa oli 22,6 °C ±1 °C. Tutkituista tiloista yksikään ei päässyt tavoitetasoon.

**TAULUKKO 22. Pohjakerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mittausaika 20–24.8.2012, suutinkonvektorijärjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo 11,7 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;25,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.065</b>	0,1	20,5	19,3	22,1	76,1	0,0	22,9	0,0	23,9	77,1
	1,1	20,8	19,5	27,7	53,0	0,8	10,3	0,0	47,0	89,7
<b>C2.066</b>	0,1	20,3	19,3	21,6	68,5	0,0	35,3	0,0	31,5	64,7
	1,1	19,7	19,3	21,0	99,2	0,0	83,0	0,0	0,8	17,0
<b>C2.071</b>	0,1	21,5	20,1	23,0	25,6	8,0	0,0	0,0	74,4	100
	1,1	21,6	20,2	23,0	30,9	12,6	0,0	0,8	68,2	99,2
<b>C2.072</b>	0,1	20,1	18,7	21,7	95,9	0,0	43,9	0,0	4,1	56,1
	1,1	20,4	18,8	22,5	81,4	0,0	32,4	0,0	18,6	67,6

Elokuun aikana pohjakerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että pohjakerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat olleet liian alhaiset, kuten toukokuussakin. Ilman keskilämpötila on ollut kolmessa opetustilassa alle sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 22,0 °C. Huonelämpötila alitti kolmessa opetustilassa sallitun minimilämpötilan 20 °C 0 -83 % mittausajasta. Ilman lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä, joka elokuussa oli 22,0 °C ±1 °C. Tutkituista tiloista yksikään ei päässyt tavoitetasoon. Pohjakerroksen opetustiloista vain yksi tila pysyi yli 90 % ajasta sallittujen maksimiarvojen 20,0 °C – 25,0 °C sisällä.

**TAULUKKO 23. Pohjakerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mittausaika 11–14.12.2012, suutinkonvektorijärjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo -6,3 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;25,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.065</b>	0,1	21,5	20,5	23,1	5,4	9,0	0,0	0,0	86,6	100
	1,1	21,7	20,6	23,4	5,5	16,3	0,0	8,1	78,2	100
<b>C2.066</b>	0,1	22,9	21,2	24,0	0,0	66,9	0,0	37,3	33,1	100
	1,1	23,5	21,4	24,8	0,0	86,7	0,0	67,9	13,3	100
<b>C2.071</b>	0,1	23,2	21,6	24,1	0,0	82,9	0,0	63,0	17,1	100
	1,1	23,3	21,5	24,6	0,0	85,3	0,0	65,6	14,7	100
<b>C2.072</b>	0,1	21,8	20,6	23,4	0,0	8,5	0,0	4,8	91,5	100
	1,1	22,0	20,7	23,5	0,0	26,4	0,0	6,5	73,6	100

Joulukuun aikana pohjakerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että pohjakerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat olleet liian korkeat. Ilman keskilämpötila on ollut kolmessa opetustilassa yli sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 21,5 °C. Huonelämpötila pysyi kaikissa opetustiloissa sallitun minimilämpötilan 20,5 °C yläpuolella. Ilman lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä, joka joulukuussa oli 21,5 °C ±1 °C. Tutkituista tiloista yksikään ei päässyt täysin tavoitetasoon. Pohjakerroksen kaikkien opetustilojen lämpötila pysyi yli 90 % ajasta sallittujen maksimiarvojen 20,0 °C – 25,0 °C sisällä.

**TAULUKKO 24. 2.kerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mitausaika 21–25.5.2012, IMS-järjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo 13,6 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;25,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.206</b>	0,1	22,1	21,1	23,0	6,0	0,0	0,0	0,0	94,0	100
	1,1	22,3	21,1	23,4	60	0,0	0,0	0,0	94,0	100
<b>C2.207</b>	0,1	21,4	20,8	23,4	57,7	0,0	0,0	0,0	46,3	100
	1,1	22,3	22,2	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100
<b>C2.209</b>	0,1	22,4	21,4	23,4	0,4	0,0	0,0	14,3	99,6	100
	1,1	22,4	21,4	23,7	0,6	2,1	0,0	19,0	79,3	100
<b>C2.210</b>	0,1	21,8	20,8	23,0	19,0	0,0	0,0	0,0	81,0	100
	1,1									

Toukokuun aikana rakennuksen toisen kerroksen opetustiloissa suoritettujen mittaus-  
ten tuloksista nähdään, että rakennuksen toisen kerroksen opetustiloissa lämpötilat  
ovat lähes tavoitearvojen mukaiset. Ilman keskilämpötila on ollut kolmessa opetusti-  
lassa lähellä sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilaa 22,6 °C. Huonelämpötila oli jo-  
kaisessa opetustilassa yli sallitun minimilämpötilan 20,0 °C koko mittausajan. Ilman  
lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä, joka toukokuussa oli  
22,6 °C ±1 °C. Tutkituista tiloista yksi pääsi tavoitetasoon ja kahdessa tilassa toisen  
mittauspisteen lämpötilan pysyvyys ylitti 90 % rajan. Rakennuksen 2. kerroksen  
kaikkien opetustilojen sisäilman lämpötilat olivat yli 90 % ajasta sallittujen maksi-  
miarvojen 20,0 °C – 25,0 °C sisällä.

**TAULUKKO 25. 2.kerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mitausaika 20–24.8.2012, IMS-järjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo 11,7 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;24,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.206</b>	0,1	20,5	20,3	23,6	3,3	9,5	0,0	0,0	82,2	100
	1,1	20,8	20,3	23,9	3,3	14,4	0,0	0,0	82,2	100
<b>C2.207</b>	0,1	20,3	19,9	23,0	45,8	0,0	2,3	0,0	54,2	97,7
	1,1	19,7	20,5	23,4	13,8	8,7	0,0	0,0	75,7	100
<b>C2.209</b>	0,1	21,5	20,9	23,8	0,0	6,0	0,0	0,0	94,0	100
	1,1	21,6	21,1	23,8	3,1	2,8	0,0	0,0	94,1	100
<b>C2.210</b>	0,1	20,1	20,2	22,7	38,8	0,0	0,0	0,0	61,2	100
	1,1	20,4	20,2	23,2	32,6		0,0	0,0	64,3	100

Elokuun aikana 2. kerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että 2. kerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat olleet liian alhaiset kaikissa opetustiloissa. Ilman keskilämpötila on ollut kaikissa neljässä opetustilassa alle sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 22,0 °C. Huonelämpötila alitti yhdessä mittauspisteessä opetustilassa sallitun minimilämpötilan 20 °C 2,3 % mittausajasta. Ilman lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä, joka elokuussa oli 22,0 °C ± 1 °C. Tutkituista tiloista yksi tila pääsi tasoon. Kaikkien opetustilojen sisäilman lämpötilat olivat yli 90 % ajasta sallittujen maksimiarvojen 20,0 °C – 25,0 °C sisällä.

**TAULUKKO 26. 2.kerroksen opetustilojen lämpötilamittausten yhteenveto mitausaika 11–14.12.2012IMS-järjestelmä, ulkoilman 24h liukuva keskiarvo -6,3 °C**

Tila	h (m)	t <sub>k</sub> (°C)	t <sub>min</sub> (°C)	t <sub>max</sub> (°C)	t <sub>&lt;min</sub> (%)	t <sub>&gt;max</sub> (%)	t <sub>&lt;20,0</sub> (%)	t <sub>&gt;25,0</sub> (%)	t <sub>t</sub> (%)	t <sub>tmax</sub> (%)
<b>C2.206</b>	0,1	<b>20,7</b>	<b>20,0</b>	<b>21,6</b>	<b>36,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	0,0	<b>63,8</b>	<b>100,</b>
	1,1	<b>20,8</b>	<b>19,9</b>	<b>22,5</b>	<b>29,9</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>70,1</b>	<b>100</b>
<b>C2.207</b>	0,1	<b>21,3</b>	<b>20,7</b>	<b>23,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>100,0</b>	<b>100</b>
	1,1	<b>21,8</b>	<b>21,1</b>	<b>21,7</b>	<b>0,0</b>	<b>3,5</b>	0,0	0,0	<b>96,5</b>	<b>100</b>
<b>C2.209</b>	0,1	<b>21,0</b>	<b>20,1</b>	<b>21,7</b>	<b>4,6</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>95,4</b>	<b>100</b>
	1,1	<b>21,1</b>	<b>20,1</b>	<b>21,7</b>	<b>5,2</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>94,8</b>	<b>100</b>
<b>C2.210</b>	0,1	<b>21,5</b>	<b>20,9</b>	<b>22,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>100</b>	<b>100</b>
	1,1	<b>21,7</b>	<b>21,0</b>	<b>22,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	0,0	0,0	<b>100</b>	<b>100</b>

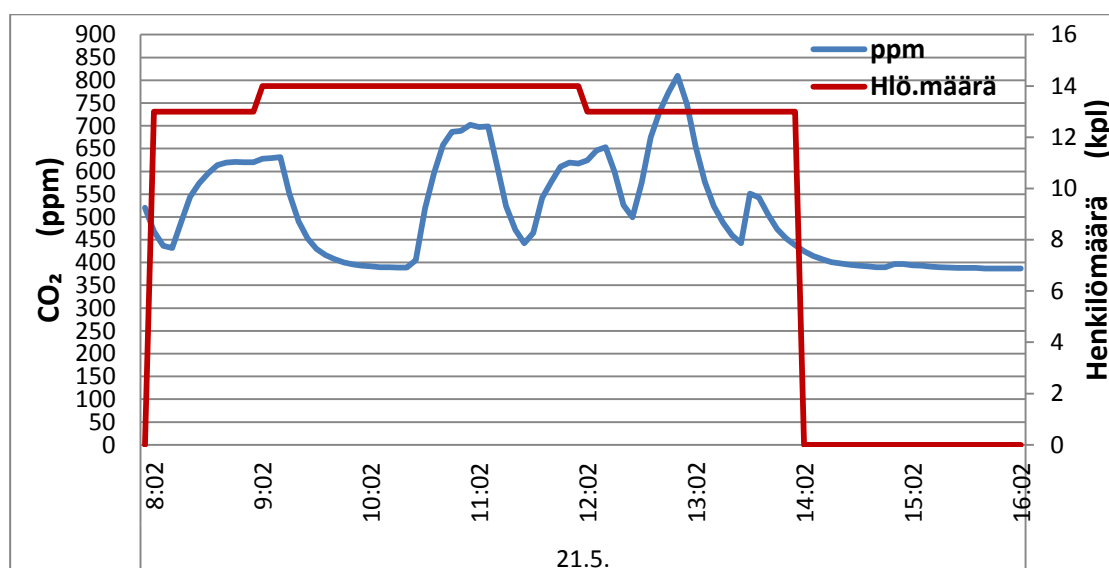
Joulukuun aikana 2. kerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että rakennuksen 2. kerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat tavoitetasojen mukaiset. Ilman keskilämpötila on ollut kaikissa opetustiloissa Sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 21,5 °C mukaiset. Huonelämpötila laski kahdessa opetustilassa tavoite-minimilämpötilan 20,5 °C alapuolelle. Ilman lämpötilan tulisi pysyä yli 90 % ajasta tavoitetasojen sisällä, joka joulukuussa oli 21,5 °C ± 1 °C. Tutkituista tiloista kolme tilaa pääsi tavoitetasoon. Kaikki tilat pysyivät yli koko ajan sallittujen maksimiarvojen 20,0 °C – 25,0 °C sisällä.

## 7.4 Hiilidioksidimittaukset

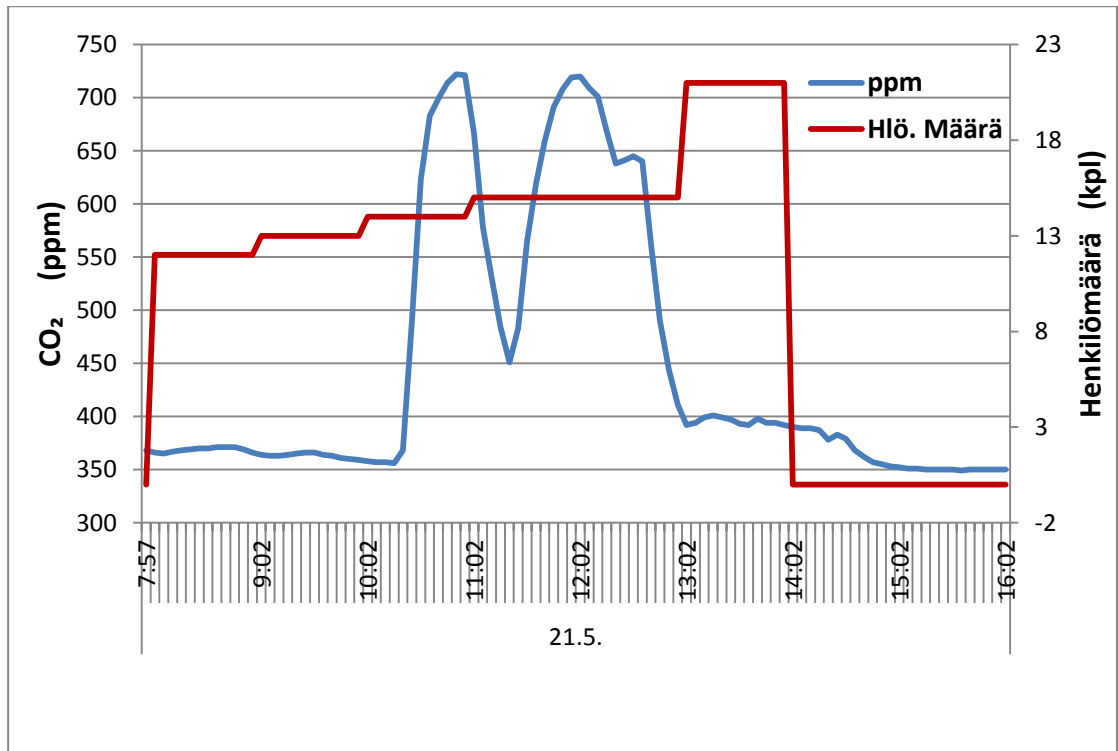
**TAULUKKO 27. Yhteenveto opetustilojen C2.071 ja C2.207 CO<sub>2</sub>-pitoisuuksista mittausjaksojen aikana**

Mittauspaikka	Mittausaika	Minimi CO <sub>2</sub> pitoisuus (ppm)	Maksimi CO <sub>2</sub> pitoisuus (ppm)	CO <sub>2</sub> pitoisuuden keskiarvo (ppm)	Olosuhteiden pysyvyys (% käyttöajasta) <900 ppm alapuolella %
C2.071	Toukokuu	349	822	375	100
	Elokuu	308	1027	569	94,5
	Joulukuu	356	1105	576	90
C2.207	Toukokuu	387	1001	447	99,1
	Elokuu	344	933	476	97,8
	Joulukuu	414	1138	522	96,5

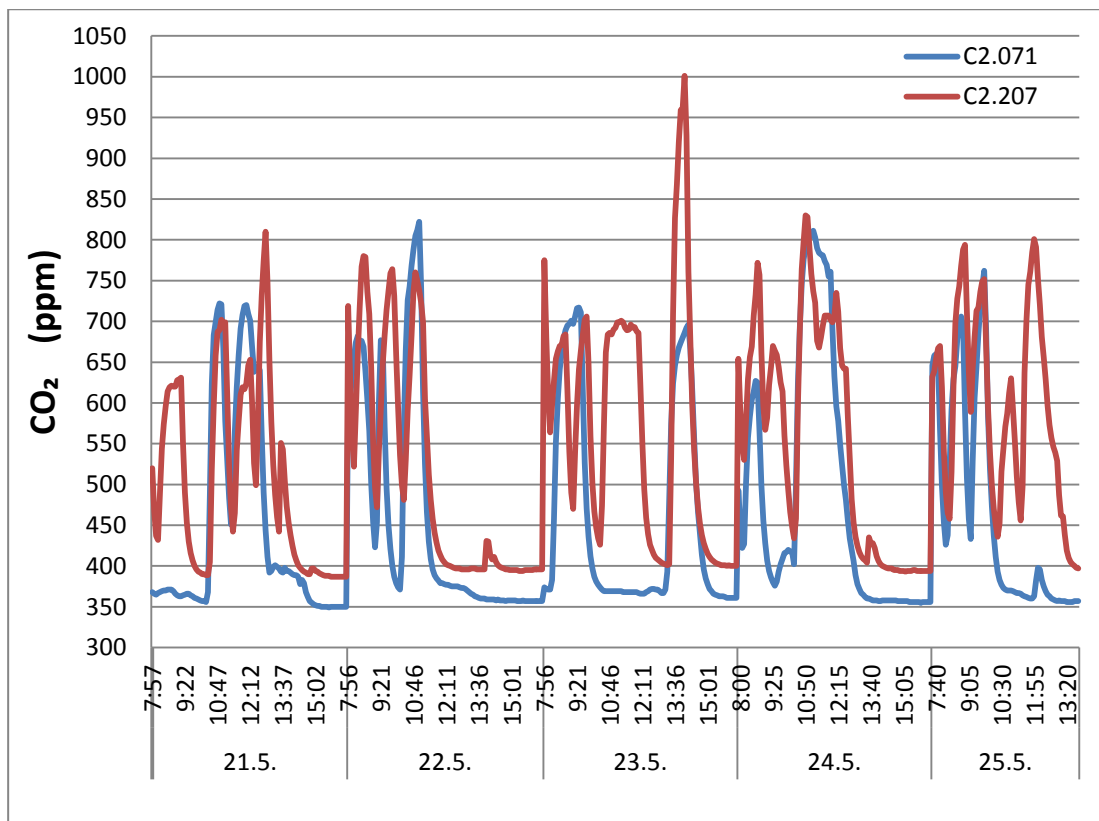
Taulukosta 27 nähdään, että hiilidioksidipitoisuudet ovat tyhjässä luokassa ulkoilman hiilipitoisuuden tasolla. CO<sub>2</sub> pitoisuus oli keskimäärin 494 ppm. Kuvissa 28 - 32 nähdään, että hiilidioksiditasot nousevat oppilaiden tullessa luokkatiloihin aamulla ja ruokailun jälkeen (kuvat 28 ja 29). Hiilidioksiditasot pysyvät kuitenkin hyvin S2-raja-arvojen sisällä. Kaikilla mittausjaksoilla hiilidioksidi taso pysyi S2-sisäilmaluokan raja-arvon 900 ppm alapuolella yli 90 % seuranta-ajasta. Luokkien henkilömäärät vaihtelivat luokissa oppitunneittain 13 - 21 henkilön välillä.



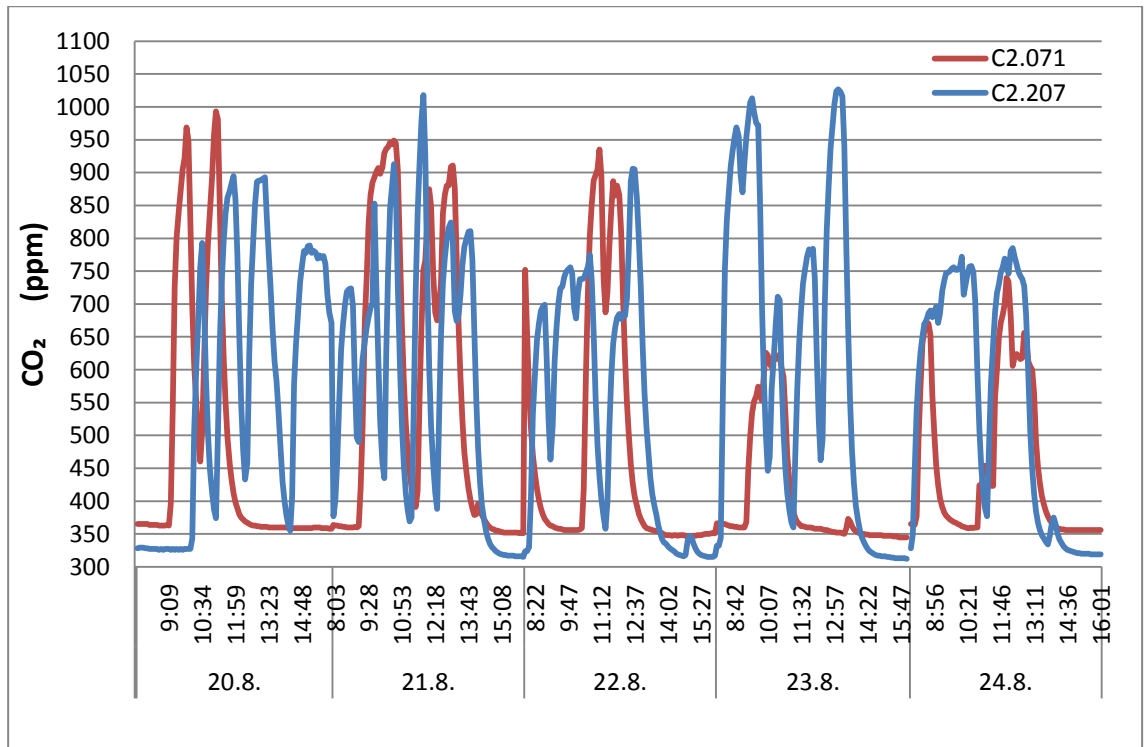
**KUVA 28. Kuormitusprofiili luokassa C2.207, 21.5.2012**



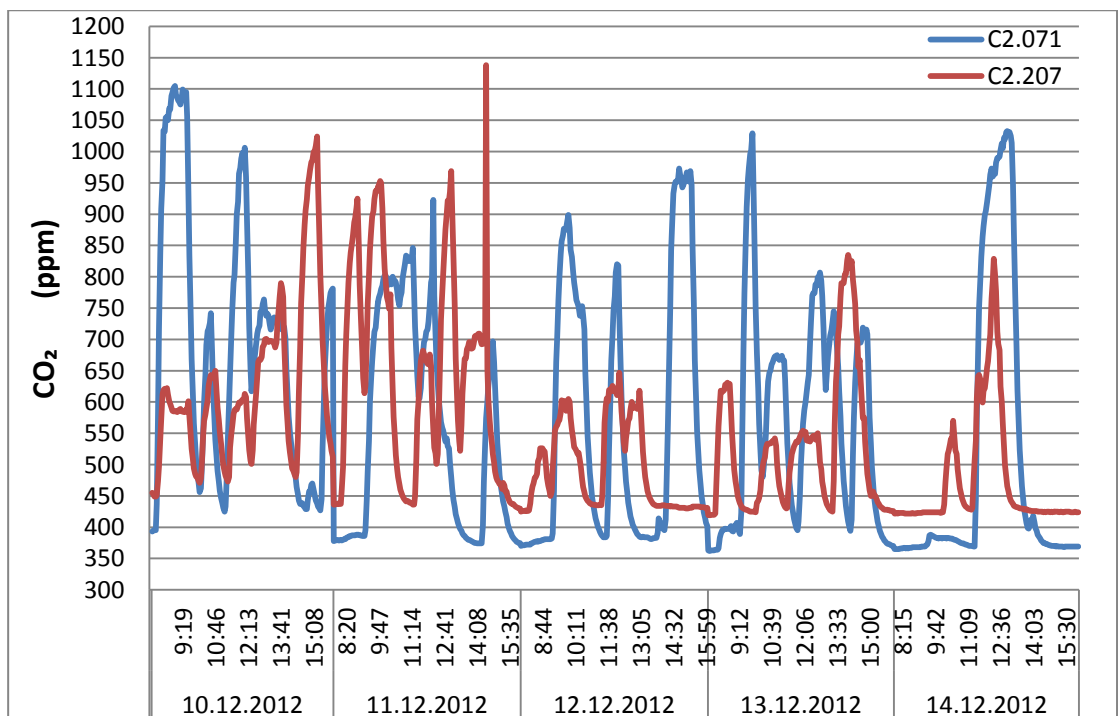
KUVA 29. Kuormitusprofiili luokassa C.2,071, 21.5.2012



KUVA 30. Toukokuun CO<sub>2</sub>-pitoisuudet luokassa C2.071 ja C2.207



**KUVA 31. Elokuun CO<sub>2</sub>-pitoisuudet luokkatilassa C2.2071 ja C2.207**



**KUVA 32. Joulukuun CO<sub>2</sub>-pitoisuudet luokkatilassa C2.2071 C2.207**

## 9 SIMULOINNIT

Koulurakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelun aikana täytyy varmistaa, että tavoiteltavat sisäilmaolosuhteet täyttyvät, kuten ilman lämpötila, lämpötilan ylitys ja CO<sub>2</sub>-pitoisuus. RakMK D3 vaatii kesäajan huonelämpötilojen hallintaa ja ohjeistaa tekemään lämpötilasimuloinnit 1.6–31.8. Liiallisen yllälämpenemisen ehkäiseminen on suhteellisen helposti saavutettavissa ilman koneellista jäähdytystäkin, kun käytetään asianmukaista aurinkosuojausta ja yötuuletusta. Suunnittelussa on kuitenkin hyvä tehdä lämpötilasimuloinnit yllälämpenemiselle myös keväälle ja syksylle, luokkien todellisella henkilömäärällä. Simulointi voidaan tehdä dynaamisella simulointiohjelmalla (Energiamääräykset 2012, 93). Yleisimmät käytössä olevat simulointiohjelmat ovat Equa Simulation Finland Oy:n maahantuoma IDA ICE -simulointiohjelma ja Granlund Oy:n RIUSKA-olosuhde- ja energiasimulointiohjelmisto. Tässä tutkimuksessa käytettiin IDA ICE -simulointiohjelmaa.

Tässä työssä tehtiin olosuhdesimulointi yhdestä toisen kerroksen lännenpuoleisesta 56,5 m<sup>2</sup> opetustilasta (kuva 33). Opetustilassa ulkoilmaan rajautuu kaksi seinää ja yläpohja. Lämpimiin sisätiloihin rajoittuu kaksi väliseinää ja alapohja (välipohja). Tutkittava opetustila mallinnettiin IDA ICE -simulointiohjelmalla (kuvat 33 ja 34). Erilaisia simulointivaihtoehtoja oli viisi (taulukko 28), joista tässä työssä tarkastellaan tarkemmin kahta tapausta.

**TAULUKKO 28. Simulointivaihtoehdot**

	Ohjaustapa	Tuloilmavirta $q_v$ (l/s/m <sup>2</sup> )	Poistoilmavirta $q_v$ (l/s/m <sup>2</sup> )	Ilmanvaihdon teho (%)
Case A	CAV	2.2–4.4	2.2–4.4	klo 7-15:30 100 %, muulloin 50 %
Case B	VAV CO <sub>2</sub> -ohjaus	0-4.4	0-4.4	IV-kone saa käydä aina 0-100 %
Case C	VAV-lämpötila-ohjauksella	0-4.4	0-4.4	IV-kone saa käydä aina 0-100 %
Case D	VAV CO <sub>2</sub> - ja lämpötila-ohjauksella	0-4.4	0-4.4	0-100 %
Case E		ei rajoitettu	ei rajoitettu	ei rajoitettu

**TAULUKKO 29. Simuloinnissa käytetyt raja-arvot ja lämpökuormat eri simuloituvaihtoehtoissa**

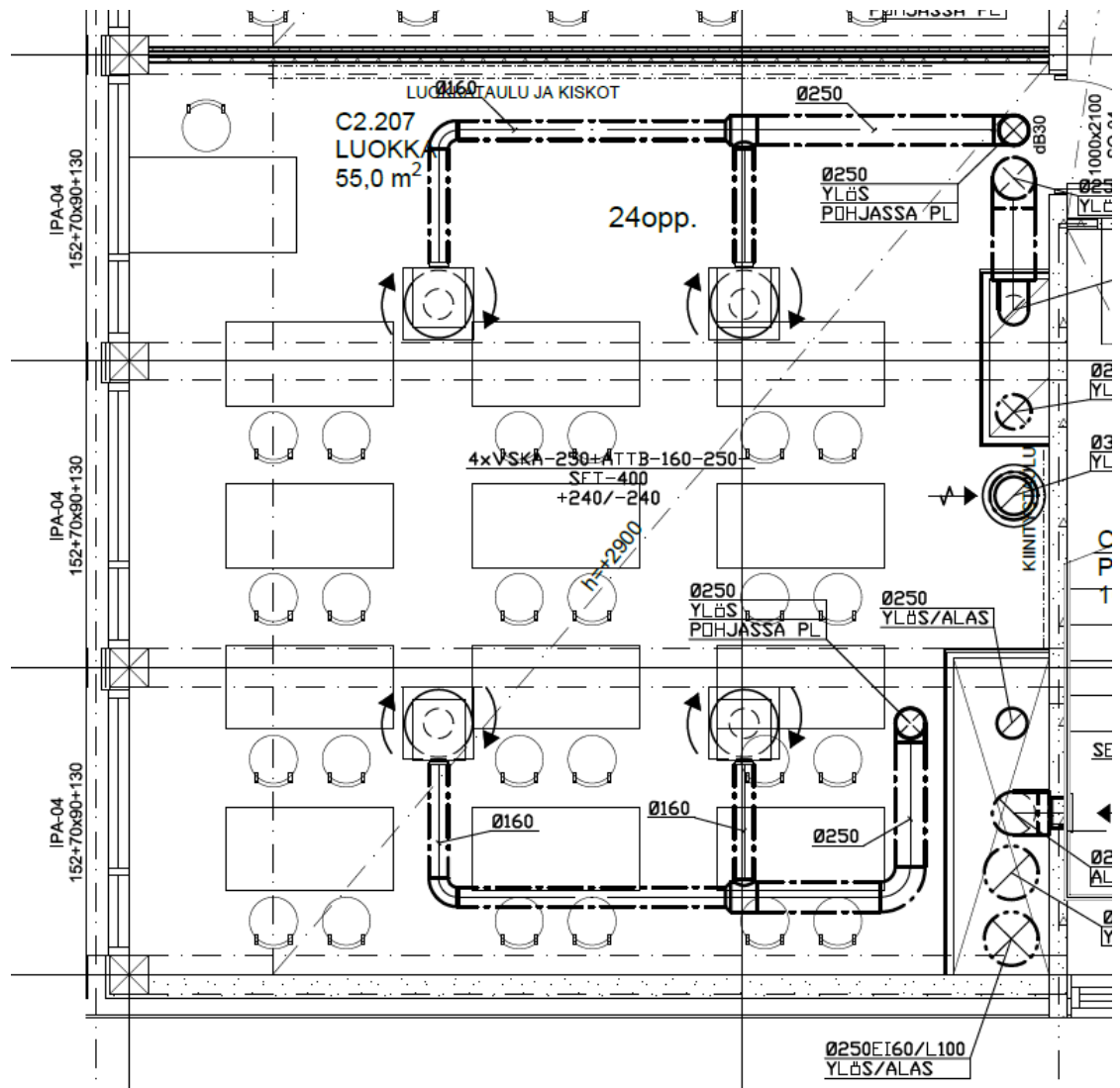
Maksimi CO <sub>2</sub> -pitoisuus (kun CO <sub>2</sub> -ohjaus)	900 ppm (S2)
lämmitysraja (talvi)	21 °C
lämmitysraja (kesä)	25 °C
Tuloilman lämpötila	18 °C
Valaistuksen lämpökuorma	822 W (15,6 W/m <sup>2</sup> )
Valaistuksen käyttöaika	klo 8-16
Laitteiden lämpökuorma	120 W (2,1 W/m <sup>2</sup> )
Laitteiden käyttöaika	klo 8-16

**TAULUKKO 30. Rakennuksen vaipan ominaisuudet**

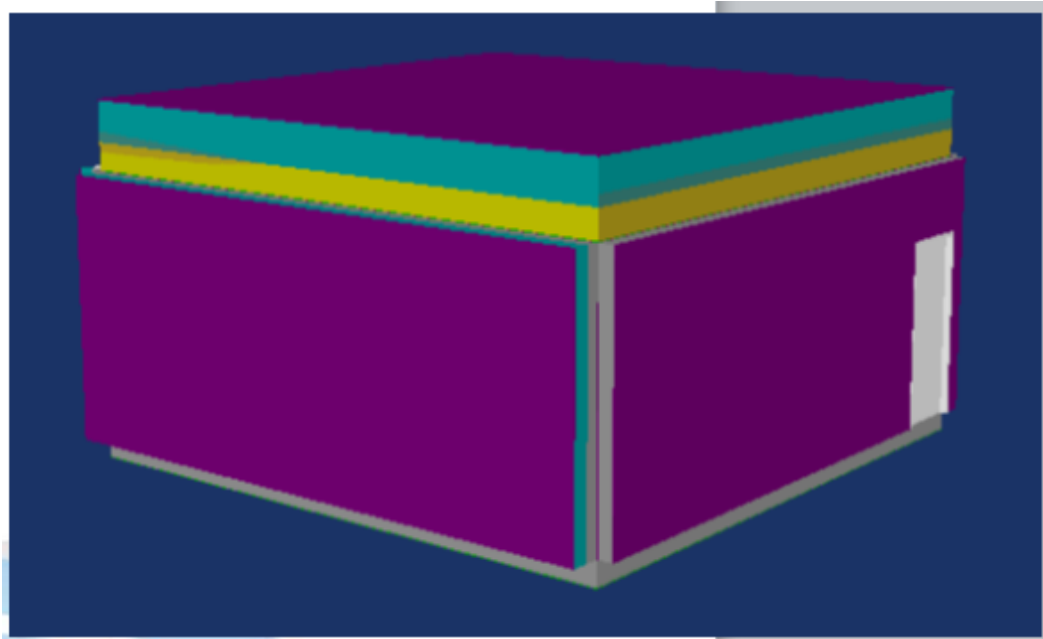
Ikkunoiden U-arvo	1,0 W/(m <sup>2</sup> /K)
Ikkunoiden g-arvo	0,41
Ulkoseinien U-arvo	0,5348 W/(m <sup>2</sup> /K)
Yläpohjan U-arvo	0,09599 W/(m <sup>2</sup> /K)
Välipohjan U-arvo	2,925 W/(m <sup>2</sup> /K)
Ilmanvuotoluku q <sub>50</sub>	4 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )

**TAULUKKO 31. Luokan henkilökuormitus**

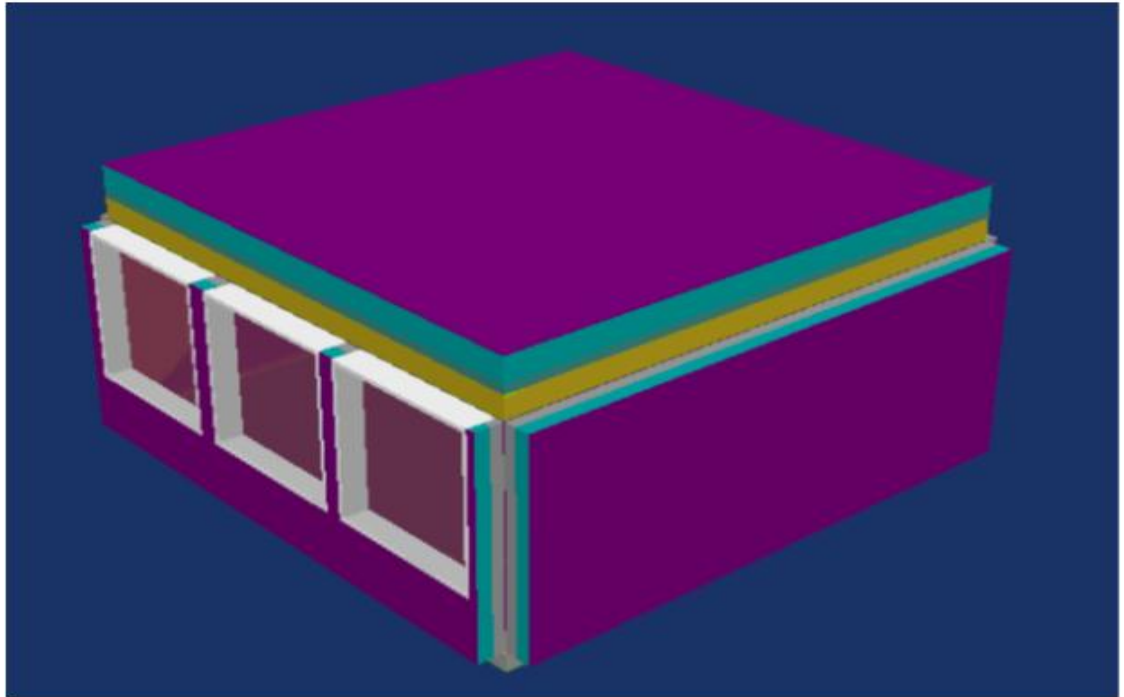
Klo	Kuormitus 100 % = 25 henkilöä
8-9	40 %
9-10	44 %
10-11	56 %
11-12	52 %
12-13	56 %
13-14	28 %
14-15	16 %
15-16	0 %



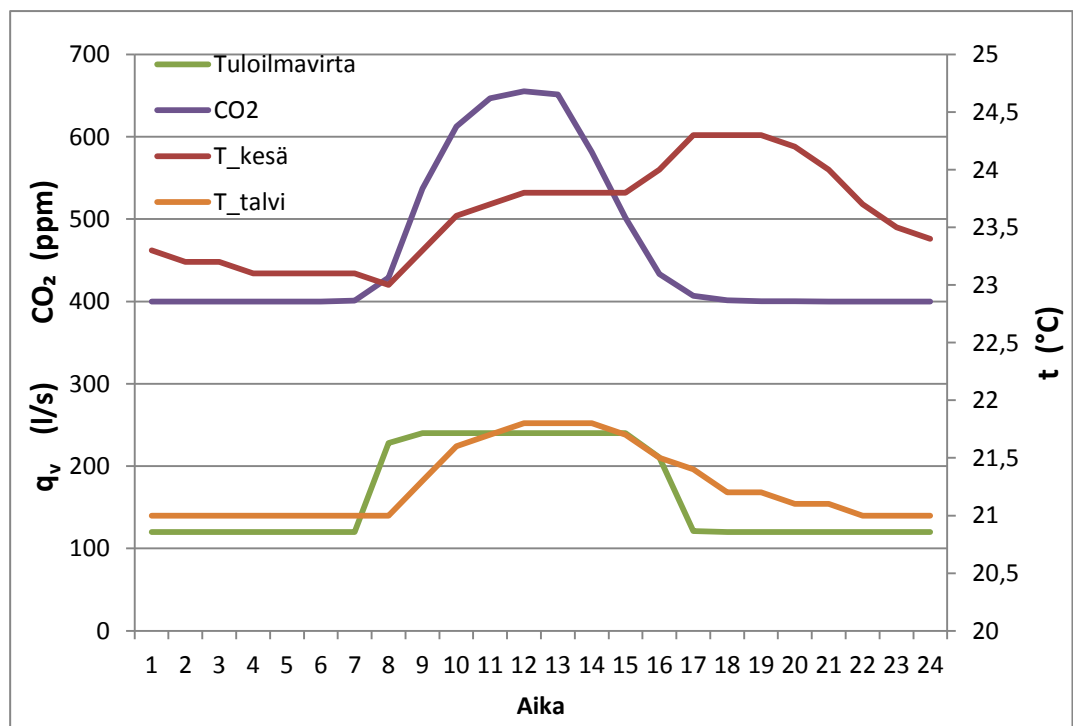
KUVA 33. Simuloitavan luokkahuoneen pohjapiirustus



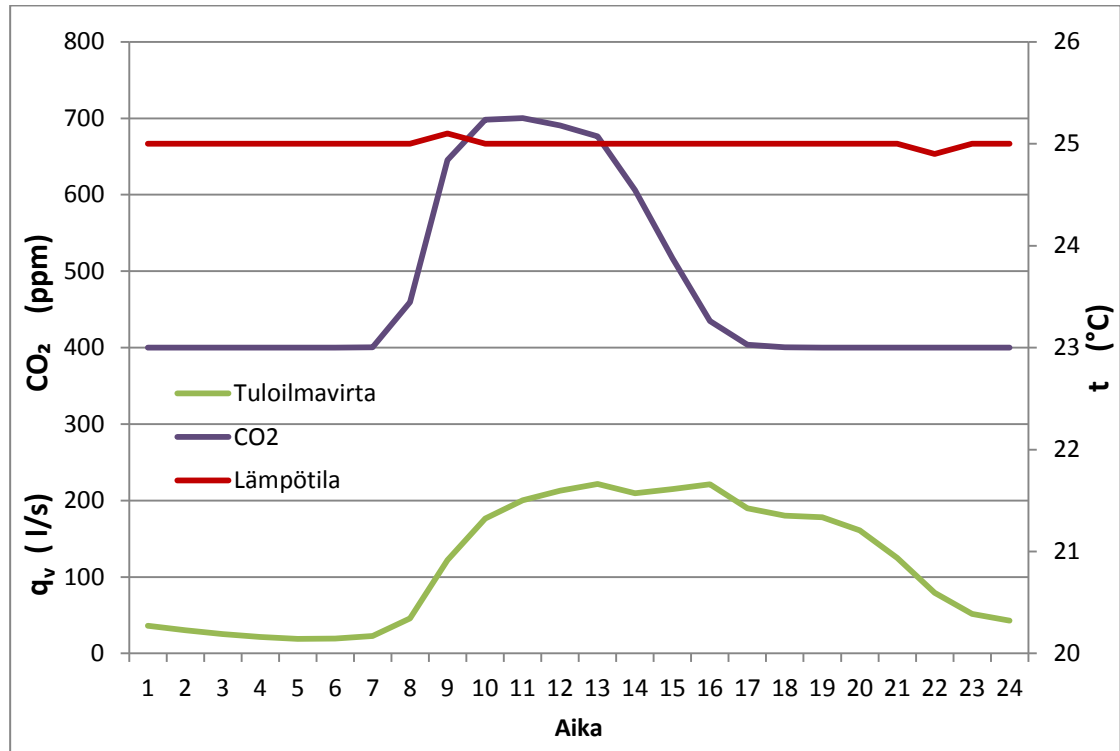
KUVA 34. Simuloitava luokkahuone luotuna IDA ICE-ohjelmaan, tarkasteluilmansuuntana kaakko



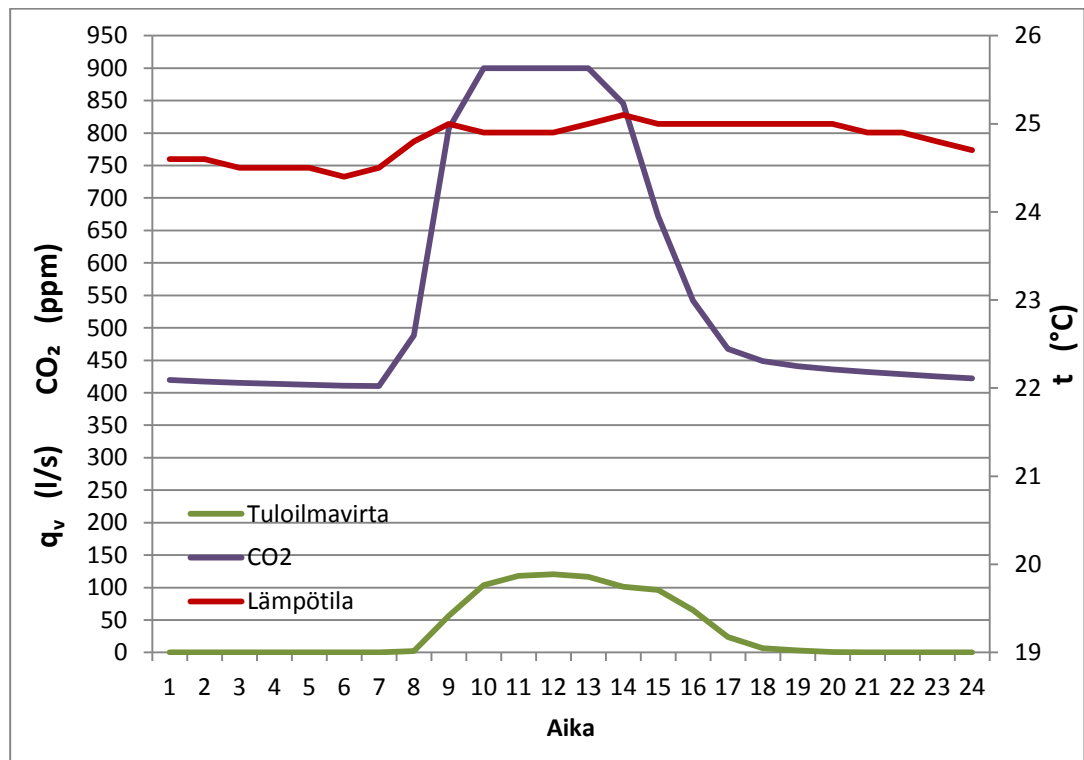
**KUVA 35. Simuloitava luokkahuone luotuna IDA ICE-ohjelmaan, tarkasteluilmansuuntana lounas**



**KUVA 35. Simulointiajo CAV läsnäolo-ohjauksella, tuloilmavirta käyttöaikana (klo 7-15:30) 4,4 l/s,m<sup>2</sup> ja käyttöajan ulkopuolella 2,2 l/s,m<sup>2</sup>**



**KUVA 36. Simulointiajo kesätilanne VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella, maksimi tuloilmavirta 4,4 l/s,m<sup>2</sup>**



**KUVA 37. Simulointiajo talvitilanne VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella, maksimituloilmavirta 4,4 l/s,m<sup>2</sup>**

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 10.1 Veto

Vetomittauksien mukaan pohjakerroksessa käyttöaikana S2-luokan vetokriteeri ylittyi 38–44 %:ssa mittauspisteistä. Yhdessä opetustilassa vetokriteeri ylittyi myös puolella ilmapirralla. 2. kerroksen mittaustulokset olivat samansuuntaiset pohjakerroksen opetustilojen kanssa, vaikka ilmanjakotavat kerroksissa poikkeavat toisistaan. 2. kerroksessa käyttöaikana S2-vetokriteeri ylittyi 25–66 %:ssa mittauspisteistä.

Kun vetokriteeriksi otetaan RakMK D2, voidaan todeta, että pohjakerroksessa D2-vetokriteeri ylittyi 24–37,9 %:ssa mittauspisteistä. Vetoa esiintyy täydellä ilmapirralla kaikissa opetustiloissa ja puolella ilmapirralla yhdessä opetustilassa. 2. kerroksessa D2-vetokriteeri ylittyi 6–25 %:ssa mittauspisteistä. Puolella ilmapirralla kaikissa opetustiloissa päästiin D2 tavoitetasoon, kun täydellä ilmapirralla tavoitetasoon päästiin vain 75–93,7 % mittauspisteistä.

2.kerroksen opetustilojen C2.205 ja C2.210a suunniteltuja ilmavirtoja tutkittiin pääte-laitevalmistajan mitoitusohjelmalla, koska haluttiin selvittää, onko käytetyillä pääte-laitteilla mahdollista toteuttaa S2-luokan vaatimukset täyttävä ilmanjako (liite 1 ja 2). Mitoitusohjelman mukaan opetustilan C2.206 ilman liikenopeus oleskeluvyöhykkeellä on alle 0,15 m/s ja täyttää S2 luokan kriteerin  $< 0.17$  m/s vaatimuksen. Mitoitusohjelman tuloksen mukaan opetustilassa C2.10a ei ole mahdollista toteuttaa S2-luokan ilmanvaihtoa nykyisellä tuloilmamäärällä, koska ilman liikenopeus on yli 0,17 m/s. Tilassa vetoa aiheuttaa osittain myös päätelaitteiden sijainti toisessa laidassa kattoa, tämän vuoksi ilmasuihku törmää seinään/kalusteisiin, jonka seurauksena ilman liikenopeus 0,1 m korkeudessa on liian voimakasta.

Mittausten mukaan ilmamääräsäätöisellä ilmanjaolla saavutetaan vedottomammat olosuhteet kuin suutinkonvektoreilla.

### 10.2 Lämpötilat

Pohjakerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että pohjakerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat olleet kesäolosuhteissa liian alhaiset. Ilman

keskilämpötila on ollut kolmessa opetustilassa alle sisäilmaluokitus 2008 tavoitelämpötilan 22,6 °C.

2. kerroksen opetustiloissa suoritettujen mittausten tuloksista nähdään, että 2. kerroksen opetustiloissa lämpötilat ovat lähes tavoitearvojen mukaiset. Ilman keskilämpötila on ollut kolmessa opetustilassa lähellä sisäilmaluokitus 2008 kesäajan tavoitelämpötilaa 22,6 °C. Huonelämpötila oli jokaisessa opetustilassa yli sallitun minimilämpötilan 20,0 °C koko mittausajan.

Kun vertailukriteeriksi otetaan RakMK D2 asettama sisäilman lämpötila-arvo +20 °C - +25 °C, niin havaitaan lämpötilojen pysyvän sallitun lämpötila-alueen sisällä yhtä alakerran luokkahuonetta lukuun ottamatta, missä lämpötila laski alle 20 °C lämpötilan 0,1 m korkeudella.

Kellarikerroksessa kesäajalla ongelmana on ilmanvaihdon lämmitysverkoston alhainen lämpötila. Verkostosta ei ole saatavissa yli +16 °C lämpötilan jälkeen tuloilman jälkilämmittämistä varten riittävän lämmintä vettä. 2. kerroksessa ei vastaavaa ongelmaa esiinny, koska ulkopuoliset lämpökuormat nostavat sisäilman lämpötilaa. Kellarikerroksessa ulkopuoliset lämpökuormat ovat pienemmät, koska se sijaitsee lähes kokonaan ympäröivän maanpinnan alapuolella.

### **10.3 CO<sub>2</sub>-pitoisuudet**

Taulukosta 22 nähdään, että hiilidioksidipitoisuudet ovat tyhjässä luokassa ulkoilman hiilipitoisuuden tasolla. CO<sub>2</sub> pitoisuus oli keskimäärin 494 ppm. Kuvissa 28–32 nähdään, että hiilidioksiditasot nousevat oppilaiden tullessa luokkatiloihin aamulla ja ruokailun jälkeen (kuvat 28 ja 29). Hiilidioksiditasot pysyvät kuitenkin hyvin S2-raja-arvojen sisällä. Kaikilla mittausjaksoilla hiilidioksidi taso pysyi S2-sisäilmaluokan raja-arvon 900 ppm alapuolella yli 90 % seuranta-ajasta. Luokkien henkilömäärät vaihtelivat luokissa oppitunneittain 13–21 henkilön välillä. Nykyisellä tilojen käyttäjäprofiililla ilmanvaihto voisi olla huomattavasti pienempi sisäilman laadun siitä kärsimättä.

## 10.4 Simuloinnit

Simulointituloksia verrattaessa mittaustuloksiin huomataan, että vakioilmavirtatapauksessa (CAV) keskimääräinen CO<sub>2</sub> pitoisuus on lähellä mitattuja arvoja. Max CO<sub>2</sub> mittauksen mukaiset arvot olivat 400-800 ppm ja max CO<sub>2</sub> simuloinnissa 400- 650 ppm. Kaikkien kolmen mittausjakson keskimääräinen CO<sub>2</sub> pitoisuus oli 494 ppm ja simuloinnin mukainen CO<sub>2</sub> pitoisuus 577 ppm. Simulointiajotapauksen VAV CO<sub>2</sub>- ja lämpötilaohjauksella keskimääräinen CO<sub>2</sub> pitoisuus oli 713 ppm, vaikka keskimääräinen tuloilmamäärä oli vain 73,1 % maksimi ilmamäärästä.

Simulointitapauksessa CAV tuloilmavirta ohjautui läsnäoloanturin ohjaamana maksimiarvoon (240 l/s), kun tilassa oli käyttäjiä. Käytännössä läsnäoloanturin tuoma hyöty jää vähäiseksi, koska jälkiviive aiheuttaa sen, ettei ilmanvaihto kerkeä tippumaan osateholle taukojen aikana. Ainoa hyöty läsnäolo-ohjauksesta tulee silloin, kun tila on pitkiä aikoja tyhjänä työpäivän aikana. Käytännössä läsnäolo-ohjauksen voi korvata hyvin mietityllä kello-ohjauksella. Käytettäessä CO<sub>2</sub>/ lämpötilaohjausta jää tuloilmamäärä kesäaikana keskimäärin 3,11 l/s/m<sup>2</sup> (176 l/s) ja talviaikana 1,58 l/s/m<sup>2</sup> (89,4 l/s) (SrmK D2; 3 l/s/m<sup>2</sup>, Sisäilmaluokitus 2008/S2; 4l/s/m<sup>2</sup>). Kesäaikana keskimääräinen ilmamäärä on siis hieman yli D2-ohjearvon. Talvella tuloilmalle asetettava alaraja, jotta tuloilmamäärä ei laske alle D2:n vähimmäisarvon.

Simuloinnin perusteella näyttäisi, että CO<sub>2</sub>/lämpötilaohjauksella voitaisiin saavuttaa merkittäviäkin säästöjä ilmastoinnissa läsnäolo-ohjattuun järjestelmään verrattuna. Ohjaustapa toimii erinomaisesti sekä kesä- että talvitilanteessa. Talvitapauksessa kuitenkin joudutaan käyttämään tuloilman minimiarvon rajoittamista, ettei tuloilmamäärä laske alle RakMK D2 -tavoitetason. Tutkimustyön aikana on havaittu miten tärkeää rakentamisen ja käyttöönoton aikana on huolehtia valittujen laitteiden oikeasta asennuksesta ja käyttöönotosta. Käyttöönoton yhteydessä tulee varmistaa, että suunnitelmien mukainen järjestelmien oikea toiminta on saavutettu ja säädöt ja asetukset on toteutettu suunnitelmien mukaan. Ongelmia tilojen käytön aikana vähentää käyttäjien ja huoltohenkilöstön riittävä opastus käyttöön ja ylläpitoon.

## LÄHTEET

Asumisterveysohje. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät 2003. Sosiaali- ja terveysministeriö.

Jarek Kurnitski. 2012. Enegiamääräykset 2012. Suomen Rakennusmedia.

Olli Seppänen. 2008. Ilmastointitekniikka- ja sisäilmasto. SOLVER palvelut Oy.

Olli Seppänen. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Suomen LVI-Liitto.

Sisäilmayhdistys Ry. 2008. Sisäilmaluokitus 2008. Sisäilmayhdistys

Vesa Asikainen, Sanna Peltola. 2008. Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. Opetushallitus

D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto 2008. Ympäristöministeriö.

Timo Kalema ja Petri Pylsy. 2006. Rakennusten energiatehokkuuden ja sisäilmaston arviointi. Raportti 183. Tampereen tekninen yliopisto.

SFS5511. 2007. Metalliteollisuuden standardoimisyhdistys

Ventilation Standard DIN 1946 . 2009. Bundesverband für Wohnungslüftung e.V.  
CR 1752, 1998. Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment. CENCEN

SIY Sisäilmatieto Oy. 2004. Tuottava toimisto 2005.

LVI30-40008.1991. Rakennuskirja Oy.

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/DCV-Technology-selection-application-note-B210864FI-A-LoRes.pdf> (Luettu 28.1.2013).

<http://www.flaktwoods.fi/982732bb-715b-4464-a547-401d153c1ff4> (Luettu 5.12.2012)

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2413.pdf> (luettu 28.1.2013)

Mysen, M. 2005. Ventilation Systems and their Impact on. Indoor Climate and Energy Use in Schools. Studies of air filters and ventilation control. ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:122957/FULLTEXT01 (Luettu 29.1.2013)

Maripuu, M-L., 2009. Demand Controlled Ventilation (DCV) Systems in Commercial Buildings. Functional Requirements on Systems and Components. (Chalmers University of Technology, Building Services Engineering), Gothenburg

## Huone: C2-210a

Huoneen perusasetukset Huoneen mitat

Nimi C2-210a Pituus [m] 7.6

Tyyppi luokka Leveys [m] 7.7

Korkeus [m] 2.9

Huoneen akustiset tiedot

Äänenvaimennus Normaali

Maksimi äänenpainetaso  $L_p(A)$  [dB] 33.0

Laitteet huoneessa

VSKB

Tuotemerkintä VSKH-315-6+ATTC-200-315-1

Laitteiden lukumäärä 2

Rungon koko 6

Laatikon liitänämitta [mm] 200

Liitänälaitikko ATTC

Liitänämitta [mm] 315

Ilmarako [mm] 0

NC value 30

NR arvo 35

Huonelämpötila [°C] 21.0

Damper setting [#] 2.20

Laitteen ilmavirta [l/s] 80.0

Ilmavirta (kaikki laitteet) [l/s] 160.0

Laitteen tuloilman lämpötila [°C] 18.0

Tuloilman teho [W] 288

Teho (kaikki laitteet) [W] 576

Ilman painehäviö [Pa] 30

Heittopituus [m] 2.4

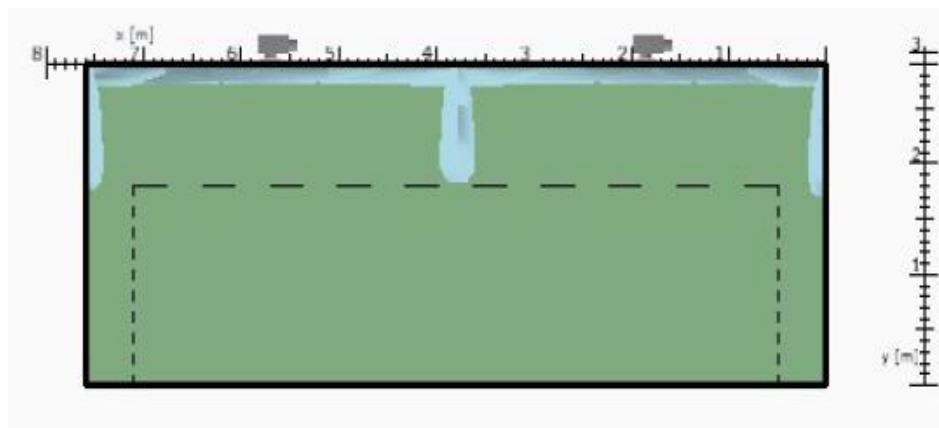
Äänitaso  $L_p(A)$  [dB] 22.0

Äänenpainetaso (kaikki laitteet) [dB] 25.0

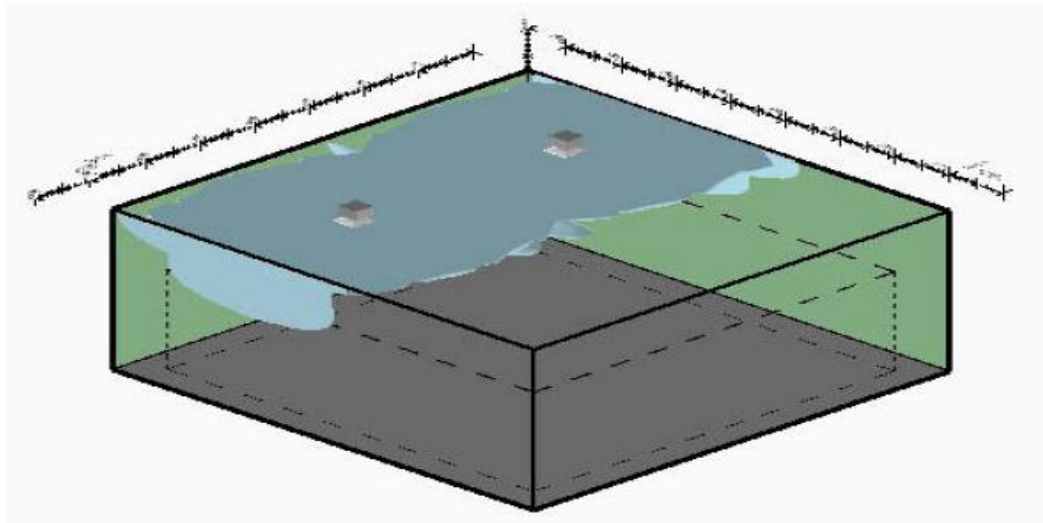
## Huonenäkymät

**Törmäävät heittokuviot, riski vedontunteesta merkityillä alueilla**

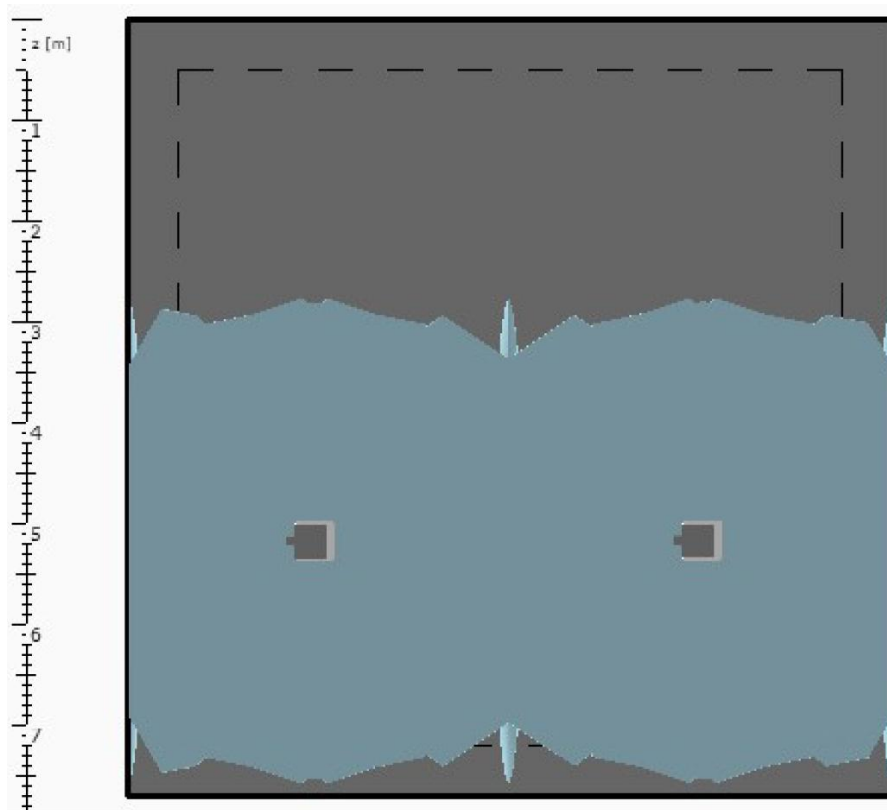
## Näkynä takaa



Näkymä ylhäältä/ koilinen



Näkymä ylhäältä



Tuotu jäähdytys/lämmitys teho ja äänenpainetaso

Patteri (vesi) [W]	0
Ilma [W]	576
Yhteenlaskettu [W]	576
Äänenpainetaso **Lp(A) [dB]	21.4

\*\* Äänenpainetaso laskettu huoneen keskeltä

Tuotu jäähdytys/lämmitys ilmavirta

Jäähdytyspalkit [l/s]	0.0
Päätelaite [l/s]	160.0
Yhteenlaskettu [l/s]	160.0
Maksimi nopeus	0.20
oleskeluvyöhykkeellä* [m/s]	<0.15
Isovel [m/s]	0.20

\* Teoreettinen arvo, ympäröiviä ja muita lämmönlähteitä ei huomioitu

## Huone: C2-206

Huoneen perusasetukset Huoneen mitat

Nimi C2-206 Pituus [m] 7.6

Tyyppi Toimisto Leveys [m] 7.7

Korkeus [m] 2.9

Huoneen akustiset tiedot

Äänenvaimennus Normaali

Maksimi äänenpainetaso  $L_p(A)$  [dB] 33.0

Laitteet huoneessa

VSKB

Tuotemerkintä VSKH-250-6+ATTC-160-250-1

Laitteiden lukumäärä 4

Rungon koko 6

Laatikon liitântämitta [mm] 160

Liitântälaatikko ATTC

Liitântämitta [mm] 250

Ilmarako [mm] 0

NC value 30

NR arvo 35

Huonelämpötila [°C] 21.0

Damper setting [#] 2.60

Laitteen ilmavirta [l/s] 60.0

Ilmavirta (kaikki laitteet) [l/s] 240.0

Laitteen tuloilman lämpötila [°C] 18.0

Tuloilman teho [W] 216

Teho (kaikki laitteet) [W] 864

Ilman painehäviö [Pa] 30

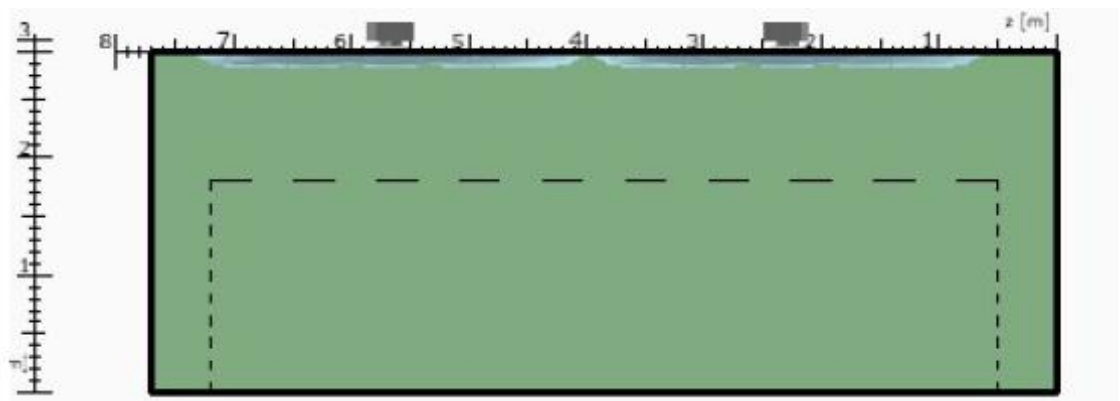
Heittopituus [m] 1.6

Äänitaso  $L_p(A)$  [dB] 27.0

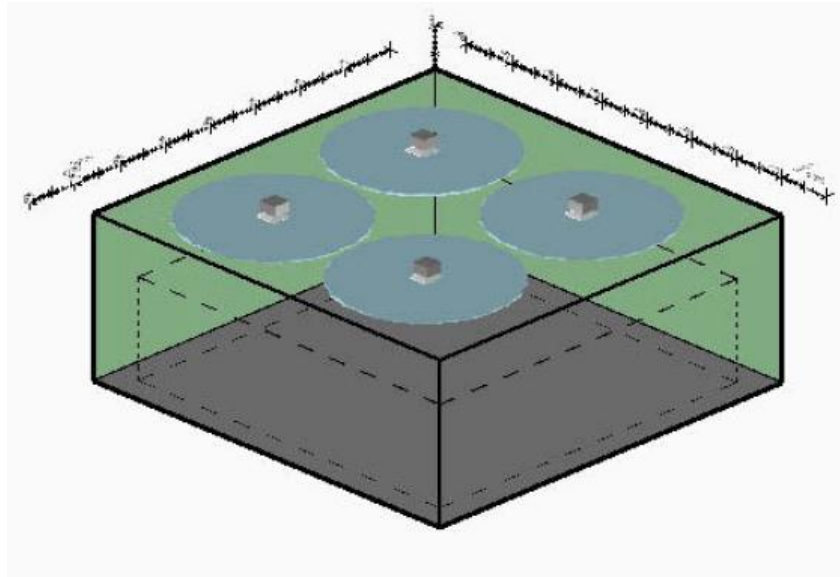
Äänenpainetaso (kaikki laitteet) [dB] 33.0

## Huonenäkymät

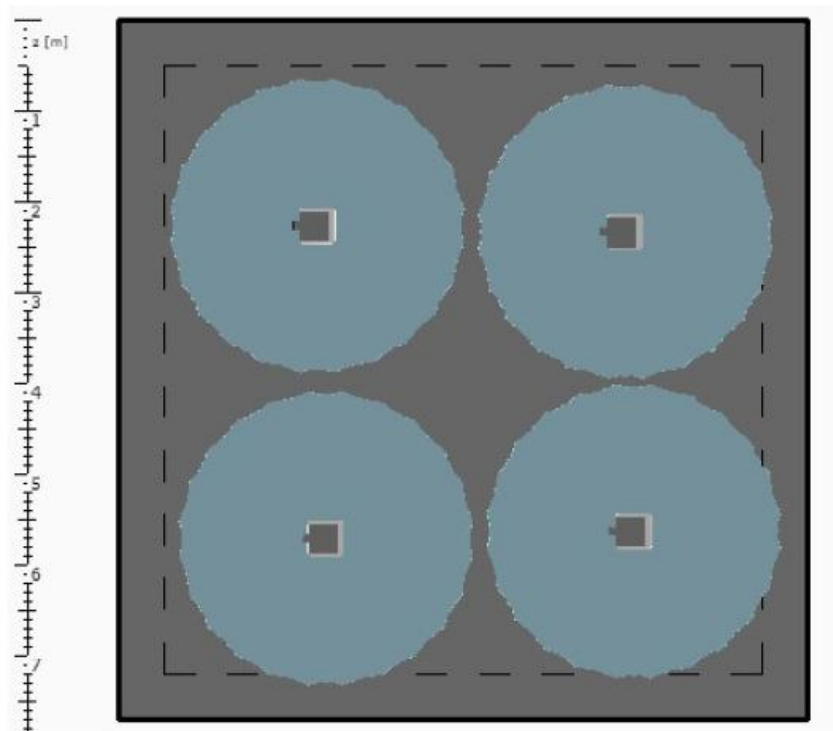
### Näkymä oikealta



## Näkymä ylhäältä koillinen



## Näkymä ylhäältä



Tuotu jäähdytys/lämmitys teho ja äänenpainetaso

Patteri (vesi) [W]	0
Ilma [W]	864
Yhteenlaskettu [W]	864
Äänenpainetaso **Lp(A) [dB]	29.4

\*\* Äänenpainetaso laskettu huoneen keskeltä

Tuotu jäähdytys/lämmitys ilmavirta

Jäähdytyspalkit [l/s]	0.0
Päätelaite [l/s]	240.0
Yhteenlaskettu [l/s]	240.0
Maksimi nopeus oleskeluvyöhykkeellä* [m/s]	<0.15      <0.15
Isovel [m/s]	0.20

\* Teoreettinen arvo, ympäröiviä ja muita lämmönlähteitä ei huomioitu