



# SISÄILMAN LAADUN PARANTAMINEN

OLOSUHTEIDEN TASAAMINEN  
TILOJEN VÄLILLÄ

ARI-PEKKA LASSILA





TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ari-Pekka Lassila:

Sisäilman laadun parantaminen - Olosuhteiden tasaaminen tilojen välillä

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording or any information storage and retrieval system, without prior permission in writing from the author.

Copyright © 2014 Ari-Pekka Lassila

Images and photos by Ari-Pekka Lassila unless otherwise stated.

Layout and cover design © Noora Pihlajarinne

ISBN 978-952-15-3384-6 (nid.)

ISBN 978-952-15-3385-3 (PDF)

ARI-PEKKA LASSILA

# SISÄILMAN LAADUN PARANTAMINEN

OLOSUHTEIDEN TASAAMINEN  
TILOJEN VÄLILLÄ

# Tiivistelmä

Ihmiset viettävät valtaosan, noin 90 prosenttia ajastaan sisätiloissa. Onkin ensiarvoisen tärkeää, että olosuhteet sisällä ovat viihtyisät, turvalliset ja terveelliset. Tämä tutkimusraportti ja sen tutkimukset on toteutettu RYM-tutkimusohjelmassa Sisäympäristö ja sen työpaketissa 2: Sisäympäristön energiatehokas hallinta. Tässä tutkimusraportissa perehdytään opetus- ja toimistoympäristöjen sisäilman laadun parantamiseen tasaamalla olosuhteita vierekkäisten tilojen välillä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voitaisiinko runsaasti kuormitettujen toimisto- ja opetusympäristöjen sisäilman laatua parantaa hyödyntämällä viereisten tilojen parempaa ilmanlaatua. Viereisten tilojen hyvän ilmanlaadun hyödyntäminen tapahtuisi vaihtamalla ilmaa suoraan tilojen välillä joko puhaltimien avulla tai lämpötilaeroista aiheutuvien konvektiivisten ilmavirtausten avulla. Tutkimushypoteesina oli, että epätasaisesti tiloihin jakautuvaa kuormitusta onnistuttaisiin tasaamaan ja ilmanlaatua näin parantamaan tarpeen mukaan.

Tämä kirjallinen raportti nostaa esille asioita, joita ei nykyään huomioida ilmanvaihtojärjestelmiä ja tiloja suunniteltaessa tai käytettäessä. Toisaalta raportin tavoitteena on esittää myös tilojen käyttäjille tietoa siitä, millaisia toimenpiteitä he itse voivat tehdä ilmanlaadun parantamiseksi ja millaisia vaikutuksia he voivat toimenpiteillään saada aikaan. Tutkimukseen kuului niin laskennallisia

tarkasteluja kuin kokeellisia mittauksia olemassa olevissa kohteissa, joihin olosuhteiden tasaaminen korjaustoimenpiteenä ja ilmanlaatua parantavana tekijänä parhaiten sopii.

Tutkimusten keskeisimpänä tuloksena havaittiin, että ilmaa tiloista toisiin siirtämällä on mahdollista tasata tiloihin epätasaisesti kohdistuvaa kuormitusta ja edelleen parantaa sisäilman laatua. Kuormitustilanteissa sisäilman hiilidioksidipitoisuuksia saatiin alennettua merkittävästi tilan ilmanvaihtuvuuden parantuessa. Esimerkiksi suuren kokoontumistilan käytäväyhteys toimiston muihin tiloihin tuplasi kokoontumistilan ilmanvaihdon. Pienen neuvotteluhuoneen oven avaaminen viereiseen käytävään teki tilan ilmanvaihdosta kolme kertaa tehokkaampaa.

Tärkeänä tuloksena havaittiin myös, että tilojen välille ihmisten läsnäolosta tai muusta kuormituksesta aiheutuvien pientenkin lämpötilaerojen avulla saadaan aikaan merkittäviä ilmavirtoja. Lämpötilaeroja voidaan yhdessä esimerkiksi avoimen oven tai erityisten siirtoilma-aukkojen avulla hyödyntää, jotta saadaan aikaan tilojen välisiä ilmavirtoja, ja edelleen tilojen sisäilman laadun parantumista. Mikäli lämpötilaeroa tilojen välillä ei ole eikä synny, voidaan ilmavirtojen kulkua tehostaa puhaltimin. Jo hyvin pienitehoisilla siirtoilmapuhaltimilla saatiin aikaan huomattavaa laskua kuormitetun huoneen hiilidioksidipitoisuuksiin.

Ilman laadun tasaamisen hyödyntämisen taloudellisten hyötyjen laskettiin olevan huomattavia tapauksissa, joissa sen avulla suurten ilmanvaihtokoneiden käyttöajat voidaan pitää tarkoituksenmukaisina. Tutkitut siirtoilmapuhaltimet ovat tekniikaltaan yksinkertaisia sekä käytännössä huoltovapaita ja niiden takaisinmaksuaika on vain kuukausia. Olemassa olevien taloteknisten järjestelmien mahdollisuudet ja kunto tulee kuitenkin aina kartoittaa tapauskohtaisesti ennen uusien laitteiden asentamista.

Tutkimuksen aikana syntyi ajatus, ettei jokaista rakennuksen tilaa ole aina kannattavaa käsitellä ilmanvaihdon kannalta erillisenä yksikkönä. Joissain tapauksissa olisi järkevämpää nähdä tilat laajempana kokonaisuutena, jossa ilmaa voidaan siirtää tarpeen mukaan myös suoraan tilojen välillä. Kun tiloihin kohdistunut kuormitus voidaan jakaa laajemmalle alueelle, tulee rakennuksen koneellinen ilmanvaihto kokonaisuudessaan tehokkaammin hyödyksi. Myös tilat voivat olla ilmankulkureittejä, eivät ainoastaan ilmanvaihtokanavat.

# Abstract

People spend major part, 90 percent of their time indoors. That is why it is so extremely important that circumstances indoors are pleasant, safe and healthful. This research report and its studies have been done as a part of a RYM Indoor Environment Program.

In this research report we will familiarize ourselves with improving indoor air quality (IAQ) of office and school buildings by leveling the load of indoor emissions between adjacent spaces to a larger area.

The purpose of this study was to figure out if it is possible to improve the IAQ by utilizing spaces with fresh air close by. Utilization of better IAQ would happen by changing air straight between spaces by small fans or convection flows caused by temperature differences. The hypothesis of this research was that loads of different spaces could be evened and further on air quality of heavily crowded spaces could be significantly improved when necessary without changing or increasing the rates of mechanical ventilation.

This report comes up with an idea that has not been taken into account when planning and using spaces and ventilation systems so far. On the other hand, the purpose of this study was to increase the knowledge of users on what they can do themselves to improve IAQ and with what kind of outcomes.

The main result achieved in the research was that by exploiting the idea of leveling loads it is possible to level loads of heavily crowded spaces and further on improve IAQ. Levels of carbon dioxide in indoor air were significantly decreased. For example ventilation rates of a big negotiation room were doubled with a help of other spaces because a corridor linked it to the rest of the office. Furthermore, air change rate of a small negotiation room was tripled by opening a door to a corridor next to the room.

Air flows through openings were examined for comparing the efficiency of different kind of solutions as well as for searching different kind of spaces to use the idea. It was noticed that even small temperature differences, caused for example by people or computers present, were big enough to induce significant air flows. Therefore, temperature differences between rooms can be utilized to produce air flows that level loads and improve IAQ. If there is no temperature difference, air flows can be assisted by electric fans. As this report shows, even small, for example two 4-watt fans make a notable difference to carbon dioxide levels of heavily occupied rooms.

In cases where utilizing transferred air helps to keep running times of voluminous air-conditioning devices purposeful, economical benefits were calculated to be notable. Air transfer units are technically simple and practically free of maintenance. Investments and maintenance costs are minimal when utilizing transferred air. Anyhow, it is always reasonable to go through the possibilities and condition of existing HVAC-systems before installing any new technical devices.

Within this research it was also perceived that it is not necessarily reasonable to treat every room of a building as an individual unit of a ventilation system. Instead, in some occasions it would be worthwhile to see different spaces comprising a wider entity in which air can be changed between rooms. By changing air between spaces the load can be evened to a larger area – mechanical ventilation of a building is therefore exploited more efficiently. In open spaces the idea of demand based ventilation comes true spontaneously. Also spaces can be seen as routes for air, not only ducts.

# SISÄLTÖ

Tiivistelmä .....	4
Abstract .....	6
Termejä ja lyhenteitä .....	10

## **1 Johdanto .....** **14**

1.1 Sisäilman laatu on tärkeä asia .....	16
1.2 Tutkimusten tavoite ja rajaus .....	22
Tutkimusten toteuttaminen .....	26
Raportin rakenne .....	27

## **2 Sisäilman laatu ja ilmanvaihto .....** **28**

2.1 Sisäilma ja sisäilmasto .....	30
2.2 Sisäilman tärkeimmät suureet .....	32
2.3 Sisäilmastoluokat sekä määryksiä ja suosituksia sisäilman suureille .....	36
2.4 Ilmanvaihtotapoja .....	39
2.5 Määryksiä ja ohjeita ilmanvaihdolle .....	42
2.6 Huonekohtaisia ilmanjakotapoja .....	45
2.7 Siirtoilma ja muut rakennuksen ilmavirrat .....	49

## **3 Uusia mittausvälineitä ja -menetelmiä .....** **52**

3.1 Wirepas mittausjärjestelmä olosuhteiden seurantaan .....	54
3.2 Käsimitari nopeaan mittaamiseen .....	60
3.3 Tutkimus- ja mittausmenetelmät .....	62
3.4 Olosuhteiden laskennallinen tarkastelu .....	64

## **4 Monitilatoimiston ilma pysyy raikkaana - Case Syklinki .....** **66**

4.1 Tampereen Hippotalo ja monitilatoimisto Syklinki .....	68
4.2 Avarissa tiloissa koko toimiston ilmanvaihto hyödynnetään tehokkaasti .....	72



4.3 Neuvotteluhuoneiden ilmanlaatu koettiin ajoittain huonoksi .....	80
4.4 Neuvotteluhuoneiden oven avaaminen paransi ilmanlaadun .....	83
4.5 Miksi oven avaaminen toimii niin hyvin? .....	87
4.6 Ovi verrattuna muihin keinoihin .....	91

## **5 Ilmavirtauksia ..... 94**

### **tietokoneluokkien välillä**

#### **- Case Konetalon CAD-luokat**

5.1 Konetalon CAD-tietokoneluokkien K1242 ja K1243 esittely .....	98
5.2 Luokkien väliseen seinään tehtiin aukko .....	100
5.3 Ilmanvaihdon, CO <sub>2</sub> -pitoisuuden ja lämpötilojen säätöä .....	103
5.4 Lämpötilaerolla ja aukkojen sijainnilla on suuri merkitys .....	110

## **6 Pienillä puhaltimilla suuri vaikutus ..... 116**

#### **- Case Konetalon aulan ATK-luokka**

6.1 Konetalon aulan ATK-luokka K1103 on suosittu paikka .....	118
6.2 ATK-luokan ilmanlaatu huononee iltaisin .....	121
6.3 Siirtoilmalaitteet ATK-luokan avuksi .....	124
6.4 Mittaustapahtumat puhaltimien tehokkuuden selvittämiseksi .....	128
6.5 Siirtoilmapuhaltimilla on kokoaan suurempi vaikutus .....	131
6.6 Siirtoilmapuhaltimien taloudellinen tarkastelu .....	135

## **7 Laskeminen on nopea tapa ..... 138**

### **tarkastella sisäilmaa ja ilmavirtoja**

7.1 Laskennassa käytetyt kaavat ja menetelmät .....	140
7.2 Laskennasta saadut tulokset – avoin ovi saa aikaan suuret ilmavirrat .....	144
7.3 Tilatehokkuuden vaikutus olosuhteiden tasaamisen toimivuuteen .....	148
7.4 Tietokonelaskenta tekee ilmavirtaukset näkyviksi .....	156

## **8 Yhteenvedo ja johtopäätökset ..... 160**

## **9 Lähteet ..... 168**

# Termejä ja lyhenteitä

## **CO2:**

Molekyylikaava hiilidioksidille, joka on hiilestä ja hapesta koostuvat kemiallinen yhdiste

## **dB:**

Desibeli. Akustiikassa käytetty dimensioton yksikkö, joka vertailee tehosuureiden suhteita logaritmisella asteikolla. Sisäilmaston kannalta tärkein desibeleillä mitattava suure on huoneen äänenpainetaso.

## **Diffuusio:**

Ilmiö, jossa molekyylit pyrkivät siirtymään korkeammasta pitoisuudesta alempaan tasoittaan pitoisuuserot konsentraatioerojen erojen perusteella.

## **Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema lämpömäärä:**

Lämpömäärä, joka tarvitaan ilmanvaihdon ilmavirran lämmittämiseksi ulkoilman lämpötilasta huonelämpötilaan.

## **Ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve:**

Lämmitysenergian tarve, joka muodostuu ilman lämmittämisestä lämmöntalteenoton jälkeen tuloilman lämpötilaan ja mahdollisesta lämmittämisestä ennen lämmöntalteenottoa jäätymisen estämiseksi. (RakMK D5 2012, s. 3)

## **Ilmanvaihdon tehostus:**

Koneellisen ilmanvaihdon määrää nostetaan jossain tilassa tarpeen mukaan. Tarve voidaan havaita esimerkiksi mittaamalla ilman hiilidioksidipitoisuutta. Tehostus voi olla myös käyttäjän säädettävissä tilaan sijoitetulla katkaisimella.

## **Ilmanvaihto:**

Huoneen ilman laadun ylläpitäminen johtamalla sinne ulkoilmaa tai muuta puhdasta ilmaa ja poistamalla sieltä sisäilmaa.

### **Ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho (kW/(m<sup>3</sup>/s)):**

Rakennuksen koko ilmanvaihtojärjestelmän kaikkien puhaltimien, mahdollisten taajuusmuuttajien ja muiden tehonsäätölaitteiden yhteenlaskettu sähköverkosta ottama sähköteho jaettuna ilmanvaihtojärjestelmän koko mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla riippuen kumpi on suurempi. (RakMK D2 2012, s. 3)

### **Ilmanvaihtokerroin:**

Kuvaa, kuinka monta kertaa aikayksikkö kohden huoneen ilma vaihtuu. Lasketaan jakamalla huoneeseen tuleva ilmavirta huoneen tilavuudella.  $(\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^3 = 1/\text{h}$

### **Ilman lainaaminen:**

Tilan ilmanvaihtokapasiteetin väliaikainen ohjaaminen toisen tilan käyttöön kanavavirtoja säätelemällä.

### **Ilmastointi:**

Huoneilman puhtauden, lämpötilan, kosteuden ja ilman liikkeen hallinta tulo- tai kierrätysilmaa käsittelemällä.

### **Ilmaääneneristävyys:**

rakenteen kohdanneen ja rakenteen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon suhde. (Kylliäinen 2006, s. 47)

### **Kierrätysilma:**

Ilma, joka palautuu ainoastaan samaan huonetilaan. (RakMK D2 2012, s. 4)

### **Konvektio:**

Lämmön siirtyminen lämpötilaerojen aiheuttamien virtausten mukana kaasussa tai nesteessä. Pakotetussa konvektiossa lämmenneen kaasun tai nesteen liikettä tehostetaan potkurilla tai tuulettimella.

### **Käyttöaika tai käyttötunnit:**

Aika, jolloin rakennuksessa tai tilassa oleskellaan ja rakennusta tai tilaa käytetään sen käyttötarkoituksen mukaisesti. (SFS-EN 15251 2007)

### **Liukuva keskiarvo:**

Teknisen analyysin menetelmä, jossa suurelle määrälle tiettyjen ajanhetkien arvoja lasketaan vastaava arvo kahden tai useamman arvon keskiarvona.

### **MET-arvo:**

MET on lyhenne englanninkielisistä sanoista Metabolic Equivalent eli suomeksi metabolinen ekvivalentti. MET-arvo kuvaa ihmisen fyysistä aktiivisuutta lepotasoon (MET-arvo 1,0) verrattuna.

### **Mittauskohina:**

Mikä tahansa ei toivottu signaali, joka summautuu mitattavaan signaaliin tai häiritsee haluttua signaalia. (TTY:n Systeemitekniikan laitos 2013, s. 34)

### **Mittausresoluutio (erottelukyky):**

Anturin kyky erottaa toisiaan lähellä olevia mittaussuureen arvoja eli kuinka pienet erot näkyvät mitattavan suureen arvossa. Mittausresoluutio on eri asia kuin mittaustarkkuus. (Aumala 1999, s. 160)

### **Mittaustarkkuus:**

Kuvaa mittalaitteen kykyä antaa virheettömiä tuloksia. Ilmaistaan yleensä virherajojen avulla.

### **NDIR:**

Lyhenne sanoista "non-dispersive infrared". Valoa hajottamaton infrapunasäteilyyn perustuva mittaustekniikka, jota käytetään etenkin tiettyjen savukaasujen jatkuvatoimiseen mittaamiseen. (Rahko, 2007)

### **Oleskeluvyöhyke:**

Se osa huonetilasta, jossa sisäilmastovaatimukset on suunniteltu toteutuviksi. Yleensä oleskeluvyöhyke on vähintään huonetilan osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 metrin korkeudella lattiasta ja sivupinnat 0,5 metrin etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista. (RakMK D2, s. 4)

### **Palautusilma:**

Ilma, joka palautetaan tuloilmana siten, että palautettavassa ilmassa on kahden tai useamman eri huonetilan ilmaa. (RakMK D2, s. 4)

### **Poistoilma:**

Ilma, joka johdetaan pois huoneesta ja edelleen ulkoilmaan. (RakMK D2, s. 4)

### **Poistoilmaluokitus:**

Rakentamismääräyskokoelma (RakMK D2 2012, s. 9) luokittelee tilasta poistettavan ilman neljään eri puhtausluokkaan sen perusteella, kuinka paljon tilan käytöstä on aiheutunut epäpuhtauksia poistoilmaan. Puhtain luokka on 1, johon kuuluvat esimerkiksi toimistotilat. Likaisin luokka on 4, johon kuuluu esimerkiksi vetokaapit

**Ppm:**

Lyhenne englanninkielisistä sanoista ”parts per million”. Ilmaisee, kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin. Yleensä ja tässä tutkimusraportissakin tarkoittaa tilavuuden miljoonasosaa.

**Runkoääni:**

Rakenteessa tai muussa kiinteässä kappaleessa etenevä mekaaninen värähtely, joka aiheuttaa ilmaääntä. (RakMK C1 1998, s. 2)

**Siirtoilma:**

Rakennuksen sisällä tilasta toiseen siirtyvää ilmaa. (RakMK D2 2012, s. 4)

**Siirtoilma-aukon muotokerroin:**

Aukon muotokerroin on dimensioton suure, joka kuvaa aukon tehokkuutta ilmavirtojen kulkureittinä. Muotokertoimen arvo vaihtelee tyypillisesti välillä 0,5 – 0,7 ja sitä käytetään ilmavirtojen laskennallisessa määrittämisessä.

**Tarpeenmukainen ilmanvaihto:**

Ilmanvaihtojärjestelmä, jossa ilmanvaihtoa säädetään tietyn sisätilassa olevan ilman epäpuhtauden tai henkilöiden läsnäolon perusteella. (SFS-EN 15251 2007)

**Tilan tai huoneen ilmatilavuus:**

Huoneen sisäpintojen rajoittaman tilakappaleen tilavuus. (RakMK D5 2007, s. 4)

**Tilan tuulettaminen:**

Aukon, tyypillisesti ikkuna tai ovi, väliaikainen avaaminen ulos tilan sisäilman raikastamiseksi.

**Tilojen välinen ilmanvaihto:**

Ilmaa vaihdetaan tilojen välillä. Vaihtuminen voi tapahtua joko lämpötilaerojen tai puhaltimien vaikutuksesta.

**Tuloilma:**

Ilma, joka johdetaan huonetilaan. (RakMK D2 2012, s. 4)

**Vuotoilma:**

Rakennuksen vaipan läpi sen epätiiviydestä johtuvaa hallitsematon ilmanvaihto.

**Äänenpainetaso:**

Äänenä aistittavasta ilmanpaineen muutoksesta käytetään nimitystä äänenpaine. Äänenpainetaso [dB] saadaan, kun tarkasteltavaa äänenpainetta verrataan vertailuäänepaineeksi otettuun kuulokynnykseen 20  $\mu$ Pa. (Kylliäinen 2006, s. 28)



**JOHDANTO**

---

*Tässä ensimmäisessä luvussa perehdytetään lukija tutkimuksen aihepiiriin nostamalla esiin sisäilman laatuun liittyvää taustaa. Tässä luvussa jäsennetään tutkimus ja perustellaan, miksi tutkimustyö on tehty ja määritellään tutkimuksen tavoitteet. Tässä luvussa myös rajataan aihepiiri ja kuvataan työn sisältö.*

# 1.1

## Sisäilman laatu on tärkeä asia

*Yhteiskuntamme kehittyessä ihmiset viettävät sisätiloissa yhä suuremman osan ajastaan. Teollistuneissa maissa ihminen viettää jopa 90 - 95 prosenttia ajastaan sisätiloissa. Aikuinen ihminen hengittää sukupuolestaan, aktiivisuudestaan ja koostaan riippuen noin 10 kuutiometriä ilmaa vuorokaudessa, ja valtaosan tästä siis sisäilmaa.*

Koska ihmiset viihtyvät sisätiloissa, on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että olosuhteet rakennuksissa olisivat turvalliset, terveelliset ja viihtyisät. Toisaalta, luonnonvarojen ehtyessä ja ihmisen ympäristöön kohdistamien haittavaikutusten lisääntyessä olisi äärimmäisen tärkeää toimia energiatehokkaasti, erityisesti uusiutumattoman energian kulutusta minimoiden sekä kestäväen kehityksen hengessä.

Rakennuksen käytönaikainen energiankulutus näyttelee rakennuksiin liittyvän energiataloudellisuuden kokonaiskuvassa merkittävää roolia. Esimerkiksi pientalon koko elinkaaren aiheuttamasta ympäristökuormituksesta arviolta 80 - 90 prosenttia aiheutuu käytönaikaisesta toiminnasta (Heinonen 2008, s. 13). Rakennusten hyvällä



käytönaikaisella energiatehokkuudella on siis mahdollista saavuttaa merkittäviä säästöjä niin taloudellisessa mielessä kuin ympäristöä ajatellen.

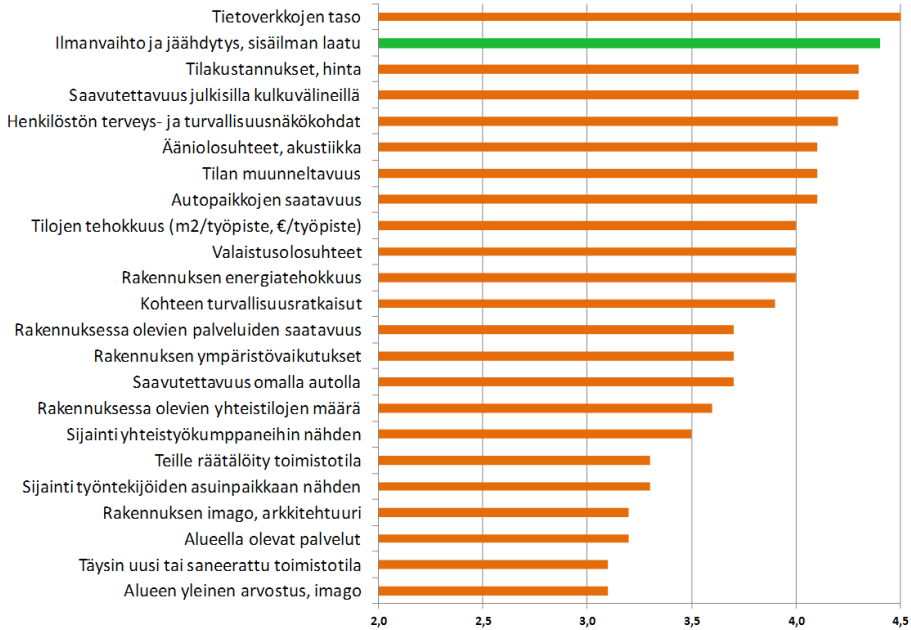
Lämmöneristysten, lämmitysjärjestelmien, asumistottumusten, rakennuksen sijainnin sekä monien muiden tekijöiden lisäksi ilmanvaihdolla ja sen käyttötavalla on suuri vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen. Ilmanvaihto kuluttaa runsaasti energiaa, joka on suureksi osaksi sähköä. Ilmanvaihdon osuus rakennusten energiankulutuksesta on noin kolmannes käytetyistä. On kuitenkin tapauskohtaista ja käytetyistä teknisistä ratkaisuista riippuvaa, mikä on ilmanvaihdon lopullinen oikeassa käyttötilanteessa toteutuva osuus energiankulutuksesta.

Energiaa kuluu ilmanvaihtokoneiden puhaltimien pyörittämiseen sekä etenkin talvella tiloihin tuotavan ilman lämmittämiseen. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon ilmanvaihtojärjestelmissä tuloilman lämmittämässä hyödynnetään yleensä poistoilman sisältämää lämpöä ottamalla sitä talteen lämmönsiirtimillä. Tuloilmaa on kuitenkin joskus lämmitettävä poistoilman lisäksi esimerkiksi kaukolämmöllä tai sähköllä, jotta tiloihin vietävä tuloilma saadaan lämmitettyä haluttuun lämpötilaan. Lisälämmityksen tarve muodostuu talvipakkasilla sekä silloin, kun poistoilmaa ei sen likaisuuden vuoksi voida käyttää tuloilman lämmittämiseen. Tämän kaltaista erillistä poistoilmakanavointia käytetään usein esimerkiksi saniteetitilojen ja keittiöiden poistoilmanvaihdossa.

Toimisto- ja opetusrakennusten ilmanvaihdon käyttämää energiaa pyritään vähentämään asettamalla ilmanvaihtokoneille toiminta-ajat tilojen oletettujen käyttöaikojen mukaan. Nämä asetetut toiminta-ajat eivät välttämättä vastaa käytännössä toteutuvia käyttöaikoja. Rakennuksen käyttöajat vaihtelevat etenkin silloin, kun tilojen käyttäjät ja käyttötarkoitus muuttuvat vuosien varrella useaan kertaan. Nykyään toimi- ja opetustiloja rakennettaessa pyritään tekemään tiloista muuntojoustavia, jotta ne pystyivät vastaamaan käyttäjien erilaisiin tarpeisiin koko rakennuksen pitkän elinkaaren ajan. Tilojen muuntojoustavuus tekee ilmanvaihdon toiminta-aikojen asettamisesta entistä haastavampaa.

Tilojen ilmanvaihto ja sisäilman laatu ovat erittäin tärkeitä toimitilojen valintakriteerejä. Skanska CDF Oy on jo kahdeksan vuoden ajan teettänyt asiantuntijaorganisaatio KTI Kiinteistötieto Oy:llä kyselytutkimuksen nimellä ”Tulevaisuuden työympäristö”. Tutkimus kartoittaa pääkaupunkiseudulla toimivien yli 50 työntekijän yritysten

## TOIMISTOTILOJEN VALINTAKRITEERIEN TÄRKEYS ASTEIKOLLA 0-5



Kuva 1.1.

Toimistotilojen valintakriteerien tärkeys pääkaupunkiseudun toimistotiloissa. Sisäilman laatu ja olosuhteet ovat toiseksi tärkein toimistotilojen valintakriteeri ollen jopa kustannuksia ja hintaa merkittävämpi tekijä.

toimitilojen käyttöön ja tulevaisuudennäkymiin liittyviä kysymyksiä. Osa barometrin kysymyksistä liittyi toimistotilojen valintakriteerien tärkeyteen. Tilojen ilmanvaihdon ja sisäilman laadun huomattiin olevan erittäin tärkeä valintakriteeri. Kuvasta 1.1 voidaan nähdä, että ilmanvaihto ja ilmanlaatu ovat tietoverkkojen tason jälkeen toiseksi tärkein kriteeri ollen jopa tilakustannuksia ja hintaa merkittävämpi tekijä. (Skanska CDF Oy & KTI Kiinteistötieto Oy 2012, s. 21)

Myös suomalaisissa yliopistoissa sisäilman laatu koetaan ehdottoman tärkeäksi tekijäksi työhuoneen ja opetustilojen toimivuudessa. Suomen Yliopistokiinteistöt Oy teetti maaliskuussa 2013 omistamiensa yliopistokampusten opiskelijoille ja henkilökunnalle Kampuskyselyn kymmenellä yliopistolla ympäri Suomea. Kyselyn tuloksia käytetään yrityksen omistamien kampusalueiden kehittämisessä.

Vastauksia Kampuskyselyyn saatiin 8075. Vastaajista kaksi kolmasosaa oli yliopistoilla opiskelevia ja yksi kolmasosa siellä työskenteleviä. Kun kyselyssä kysyttiin opetustilojen yhdeksän eri ominaisuuden nykytilaa ja tärkeyttä monivalintakysymyksellä asteikolla 1-7, nousi sisäilmaolosuhteiden laatu kaikkein tärkeimmäksi. Myös työpisteiden ominaisuuksien tärkeydestä kysyttäessä sisäilmaolosuhteet nousivat yhdeksästä tekijästä kaikkein tärkeimmäksi. Sisäilmaolosuhteiden nykytilassa on vastaajien mukaan kehittämistä. Työpisteen tapauksessa sisäilmaolosuhteet olivat tilan ominaisuuksista vasta seitsemänneksi parhaiten kunnossa ja opetustiloissa viidenneksi parhaiten. Kaikkiaan yliopistotilojen nykytila sai verrattain hyvät arvosanat. Kuva 1.2 esittää opetustilojen saamat nykytilan ja tärkeyden arvosanat yhdeksälle eri tilan ominaisuudelle. (Suomen Yliopistokiinteistöt Oy, 2013)

Korjausrakentamisen osuus rakennustuotannon kokonaisarvosta on viime vuosina noussut. Vuonna 2009 korjausrakentamisen osuus talonrakentamisen kokonaisarvosta oli jo noin 45 prosenttia (Kojo & Lilja 2011, s. 20). Talotekniikan kustannusten osuus korjausrakentamisessa on jopa noin puolet ja uudisrakentamisessakin noin kolmasosa kokonaiskustannuksista. Näin ollen talotekniikan yksinkertaistamisella ja siellä saavutetuilla säästöillä olisi suuria taloudellisia vaikutuksia investointikustannuksiin. Lisäksi tilojen saneeraamiseen ryhtymisen kynnys laskisi, mikäli hankkeiden kokonaiskustannuksia saataisiin alennuttua. Talotekniikan aiheuttamat suuret kustannukset ovat ongelma korjausrakentamisessa etenkin kustannuksista vastaavan toimijan näkökulmasta.

On havaittu, että erinomaisestikaan suunnitellut talotekniset järjestelmät eivät pelkällä olemassaolollaan vielä takaa hyviä sisäilmasto-olosuhteita, vaan ihmisten on osattava myös ylläpitää ja käyttää niitä. Talotekniset järjestelmät saattavat tiedon kulun puutteen vuoksi jäädä jopa kokonaan käyttämättä. Tällä saattaa edelleen olla merkittäviä

## OPETUSTILOJEN OMINAISUUDET

- 7 = täysin samaa mieltä  
■ 4 = neutraali  
■ 1 = täysin eri mieltä

	Nykytila								Tärkeys						
	7	6	5	4	3	2	1		7	6	5	4	3	2	1
Tilat ovat toimivat ka: 4,95								ka: 6,15							
Tilat tukevat vuorovaikutusta ka: 4,40								ka: 5,32							
Tilat ovat viihtyisät ka: 4,49								ka: 5,89							
Tilat ovat innostavat ka: 3,96								ka: 5,34							
Valaistus on hyvä ka: 5,17								ka: 6,05							
Ergonomia ka: 4,79								ka: 5,85							
Sähköpisteiden saatavuus ka: 4,16								ka: 6,28							
Siisteys on hyvä ka: 5,70								ka: 5,91							
Sisäilmaolosuhteiden laatu on hyvä ka: 4,63								ka: 6,29							
<b>Yhteensä %</b>	12	23	24	18	14	6	3		37	32	18	10	2	1	0

Kuva 1.2.

Tilojen käyttäjien arvosanat opetustilojen ominaisuuksien nykytilasta ja tärkeydestä kymmenellä yliopistokampuksella Suomessa. Tämän kyselyn yhdeksästä arvioitavasta osa-alueesta opiskelijat arvostivat sisäilmaolosuhteiden laadun kaikkein tärkeimmäksi. (Suomen Yliopistokiinteistöt Oy 2013, s. 7)

vaikutuksia tilojen ilmanlaatuun. (Kalema et al. 2011, s. 78) Talotekniset järjestelmät eivät myöskään saisi olla tekniikaltaan herkästi vikaantuvia. Viat aiheuttavat aina kuluja ja vaivaa sekä reagointinopeudesta riippuen myös ilmanlaadun heikkenemistä. Taloteknisten järjestelmien tulisi siis olla mahdollisimman toimintavarmoja sekä riittävän yksinkertaisia käyttää ja huoltaa.

Suljetulla tilalla tarkoitetaan tässä raportissa seinin, ovin ja ikkunoin rajattua tilaa. Tällainen tila on luonnollisesti hyvin tavallinen ja käytetty työskentelypaikka. Suljettu tila on usein käyttökelpoinen esimerkiksi silloin, kun halutaan työskennellä rauhassa tai käsitellään arkaluontoisia ja salassa pidettäviä asioita. Suljettu tila luo myös turvallisuuden ja yksityisyyden tunteen siellä työskenteleville. Toisaalta on huomattu, että suljetun tilan ilmanlaadun pitäminen hyvällä tasolla on haastavaa ja vaatii tehokasta ilmanvaihtoa. Tehokkaan ilmanlaadun toteuttaminen tehokkaasti ilman veto-ongelmia on haastavaa ja hyvin kallista. Nykyisissä ilmanvaihtojärjestelmissä jokaiseen tilaan on erikseen asennettava kanavat tulo- ja poistoilmanvaihdolle, mikä nostaa perustamis- ja ylläpitokustannuksia. Oman mausteensa tähän haasteeseen tuo käyttäjien toive tilojen muuntojoustavuudesta, joka on myös kiinteistön omistajan kannalta positiivinen tilojen ominaisuus markkinoiden kysynnän muuttuessa ajan saatossa.

Ihmisten läsnäolon kuormittaman suljetun tilan ilmanlaadun on huomattu parantuvan tehokkaasti avaamalla suora ilmayhteys, tavallisimmin ovi, viereiseen sisätilaan, esimerkiksi neuvotteluhuoneesta käytävään. Oven tai ikkunan avaaminen kuormitetusta tilasta viereiseen raikkaampaan tilaan tai ulos on tilojen käyttäjien omatoiminen ilmanvaihtotapa. Näin on vaihdettu ilmaa rakennuksissa jo kauan ennen kuin nykyaikaisia ilmanvaihtokoneita ja -järjestelmiä oli edes olemassa. Ilman vaihtuvuus tilojen välillä perustuu eri lämpötiloissa olevan ilman erilaisiin tiheyksiin sekä tilojen väliseen suoraan ilmayhteyteen (tekstiä pois). Tiheyserot eri lämpötiloissa olevien ilmojen välillä pyrkivät tasoittumaan ja aiheuttavat näin ilman liikettä. Tässä pätee sama periaate kuin niin sanotussa savupiippuilmiossä, jonka avulla toimivat perinteinen painovoimainen ilmanvaihto ja tulipesien savukaasujen kulkeutuminen piippua pitkin ylös ja ulos rakennuksesta.

## 1.2

# Tutkimusten tavoite ja raja

*Tämän raportin tavoitteena on selvittää, kuinka paljon opetus- ja toimistorakennusten sisäilman laatua voidaan parantaa tasaamalla tiloihin epätasaisesti jakautuvaa kuormitusta vaihtamalla ilmaa tilojen välillä. Raportti nostaa esille ilmanvaihtoon ja sisäilman laatuun liittyviä tekijöitä, joita ei tähän mennessä ole tällä tavalla käsitelty. Raportti paneutuu myös opetus- ja toimistorakennusten talotekniikkaan liittyvään säästöpotentiaaliin.*

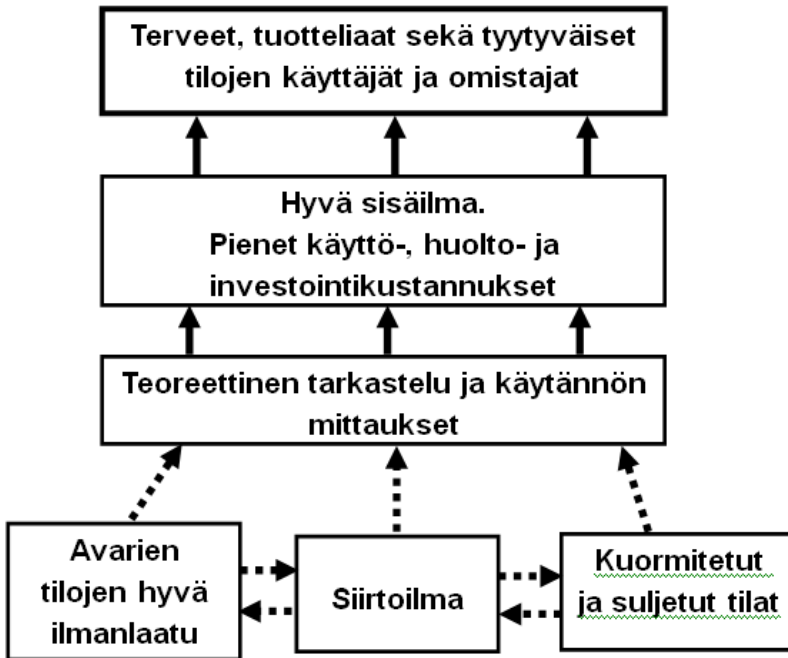
Tutkimuksen tutkimushypoteesina on, että tilojen välillä tapahtuvan ilmanvaihdon avulla voitaisiin parantaa tilojen ilmanlaatua, yksinkertaistaa taloteknisiä järjestelmiä ja edelleen parantaa talotekniikan toimintavarmuutta sekä muuntojoustavuutta. Ajatuksena on myös, että rakennusten varsinaisten ilmanvaihtokoneiden käyntiaika voidaan onnistuneesti määrittää aikaan, jolloin rakennuksen käyttö on kaikkein vilkkainta ja suurten ilmanvaihtokoneiden käyttö on aina tarkoituksenmukaista.

Huomionarvoista on, että tarkoituksena ei ole tutkia normaalin, rakennuksessa jo olevan koneellisen ilmanvaihdon korvaamista (tekstiä pois). Sen sijaan tutkimuksessa on tarkoituksena tutkia, voisiko ideaa hyödyntää normaalin ilmanvaihdon tukena tasaamalla tiloihin epätasaisesti jakaantuvaa kuormitusta. Tavoitteena on selvittää, voidaanko esimerkiksi seinään tehdyillä aukoilla parantaa sisäilman laatua ongelmallisissa kohteissa, joita kuormitetaan muista tiloista poikkeavalla tavalla, eli esimerkiksi erilaisiin aikoihin kuin muita tiloja. Raportin tutkimuksissa tarkastellaan tarkemmin toimistoympäristöä sekä oppilaitosten tietokonehuoneita, mutta tavoitteena on, että saatuja tuloksia voitaisiin hyödyntää soveltuvien osien muissakin tiloissa. Tutkimuksessa tarkastellaan myös esimerkkikohteessa saavutettavaa energian säästöä ja taloudellista hyötyä laskennallisesti.

Poikkeuksellisesti kuormitetuilla tiloilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa tiloja, joita käytetään eri vuorokaudenaikoihin kuin muita tiloja. Käytännössä tämä tarkoittaa oppilaitos- ja toimistorakennusten tapauksessa erilaisten tilojen ilta- ja viikonloppukäyttöä. Esimerkiksi Tampereen teknillisellä yliopistolla opiskelijat voivat käyttää yliopiston tiloja ympäri vuorokauden ja myös viikonloppuisin. Erityisen suosittuja ilta- ja viikonloppuaikaan ovat tietokonehuoneet, joita tässäkin työssä lähemmin tarkastellaan.

Olemassa olevissa rakennuksissa ilmanvaihto on lähes poikkeuksetta toteutettu keskitetysti suurilla, useamman kuutiometrin sekuntinopeudella ilmaa puhaltavilla ilmanvaihtokoneilla. Suurilla ilmanvaihtokoneilla saavutetaan hyvä hyötysuhde, pieni laitemäärä ja yksinkertaisempi huollettavuus. Iso ilmanvaihtokone kuluttaa käydessään paljon energiaa, joten niiden käyntiaikoja pyritään rajoittamaan mahdollisimman tarkoituksenmukaisiksi. Muista tiloista poikkeavasti kuormitetun tilan ollessa suuren ilmanvaihtokoneen vaikutusalueella, muodostuu ongelmallinen tilanne, jossa suurta ilmanvaihtokonetta olisi tarpeen pitää päällä vain yhden tilan hyvän sisäilman laadun varmistamiseksi. Tässä raportissa tarkastellaan mahdollisuutta tasata tiloihin kohdistuvaa ilman laatua huonontavaa kuormitusta (tekstiä pois) niin, että tilojen ilmanlaatu pysyy hyvällä tasolla, vaikka suuria ilmanvaihtokoneita ei pidetä päällä normaalien käyttötuntien ulkopuolella. Ilmanlaatua on arvioitu hiilidioksidipitoisuuden perusteella.

Tässä raportissa luodaan otsikolla ”Sisäilman laadun parantaminen - Olosuhteiden tasaaminen (viereisten) tilojen välillä” katsaus ilmanlaadun tasaamisen ja huoneiden välisen ilmanvaihtuvuuden mahdollisuuksiin olla tukemassa ja tehostamassa rakennuksissa jo olemassa olevaa ilmanvaihtoa. Tilojen välisen ilmanlaadun tasaamisen käyttö saattaa osoittautua käyttökelpoiseksi esimerkiksi käyttäjoiltaan muista tiloista poikkeavissa pienehköissä tiloissa, joiden takia suuren ilmanvaihtojärjestelmien käynnissä pito ei ole järkevää.



Kuva 1.3.

Tutkimusten lähtökohdat, tutkimusmenetelmät ja tavoitteet sekä niiden avulla tavoiteltavat päätavoitteet osana suurempaa sisäilman laadun tehtävää.



On huomattava, että energiatehokkuuteen pyrittäessä ei tule unohtaa ilmanvaihdon perimmäistä tarkoitusta ylläpitää turvallisia, terveellisiä ja viihtyisiä sisäilmasto-olosuhteita. Ilmanvaihtoa ei rakenneta, jotta se olisi mahdollisimman energiatehokas. Ilmanvaihto rakennetaan, jotta se osaltaan takaa hyvät olosuhteet sisätiloissa. Energiatehokkuus määritetäänkin usein energian käytön minimoinnin sijaan energian käytön optimointina. Toisin sanoen pyritään etsimään keinoja toteuttaa toimiva ilmanvaihto mahdollisimman pienellä energiankulutuksella. Tämänkin työn lähtökohtana on kuvan 1.3 mukaisesti se, että ilmanvaihto olisi osaltaan varmistamassa hyvää sisäilmastoa, joka edelleen takaisi terveet, tuotteliaat sekä tyytyväiset tilojen käyttäjät.

Ongelmallinen, globaalistikin vaikea taloudellinen tilanne, ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus muodostavat yhdessä haastavan yhtälön. Toisaalta, fiksusti toimittaessa voidaan edesauttaa asioita kaikista näistä näkökulmista katsottuna. Tämän tutkimusraportin tavoitteena on olla pieni osa tämän haastavan prosessin eteenpäin viemisessä.

# Tutkimusten toteuttaminen

Tutkimusten suorituksen voidaan nähdä jakaantuneen kahteen toisiaan tukevaan osaan, joita olivat kirjallisuuskatsaus ja käytännön mittaukset. Näitä molempia osa-alueita vietiin eteenpäin samanaikaisesti. Lisäksi merkittävä töiden suorituksen vaihe oli tämän raportin kirjoittaminen. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin aiheeseen tutustumalla aihetta käsittelevään kirjallisuuteen mahdollisimman laadukkaita ja luotettavia lähteitä käyttäen. Kirjallisuuskatsauksen avulla saatiin käsitystä siitä, mitä aiheeseen liittyen on jo tehty ja tutkittu. Kirjallisuuskatsauksella luotiin lähtökohdat tutkimukselle ja tähän raporttiin sisällytettäviä asioita pystyttiin rajaamaan onnistuneesti ja muihin tutkimuksiin tukeutuen.

Koska sisäilman laadun parantaminen on sinänsä myös konkreettinen ja mitattavissa oleva tavoite, tarvittiin työn suorittamiseksi myös käytännön mittauksia sekä havainnointia. Mittauksilla saatiin mielenkiintoisia tuloksia vallitsevista olosuhteista sekä olosuhteisiin liittyvistä parannuspotentiaaleista. Tässä tutkimusraportissa saadut tärkeimmät tulokset sisäilman laatuun liittyen ovat nimenomaan mitattuja. ”Sitä saat, mitä mittaat.” kuuluu paljon käytetty sanonta, joka pätee etenkin monilla teknisillä aloilla. Käytetyt mittausten menetelmät esitellään tarkemmin myöhemmin tässä raportissa.

## Raportin rakenne

Tämä tutkimusraportti on kirjoitettu ja koottu niin, että sen tärkeimmät asiat voi käydä läpi katsomalla kuvat ja lukemalla kuvatekstit. Kuvien ympärille on koottu tärkeimmät tiedot ja tulokset. Varsinaisesta tekstiosiesta selviää tarkempaa tietoa.

Raportin ensimmäisessä luvussa johdatettiin lukija tutkimuksen aiheeseen sekä rajattiin tutkimus ja asetettiin sille tavoitteet. Toisessa luvussa esitetään sisäilmastoon ja ilmanvaihtoon liittyviä perusasioita, joihin perehtyminen helpottaa raportin myöhempien lukujen ymmärtämistä. Toisessa luvussa esitetään muun muassa sisäilmaan liittyviä suureita sekä määryksiä ja ohjeita. Raportin kolmannessa luvussa esitetään tutkimuksessa käytetyt mittausvälineet ja mittausmenetelmät.

Raportin neljännessä, viidennessä ja kuudennessa luvussa esitetään tutkimuksen kolme kohdetta, joissa tehtiin käytännön mittauksia sekä etsittiin käytännön ratkaisuja sisäilman laadun parantamiseksi. Nämä raportin luvut esitetään kronologisessa järjestyksessä. Luvut on siis järjestetty raporttiin siinä järjestyksessä, jossa ne oikeastikin tapahtuivat. Tällöin lukija ymmärtää, miten tutkimuksessa on edetty vaiheesta toiseen, ja mitä missäkin vaiheessa on opittu. Myös lukujen sisällä tulokset ja havainnot esitetään järjestyksessä, jossa ne tutkimuksen aikana ilmenivät. Kunkin luvun alussa esitetään tutkimuksen kohteena ollut rakennus ja sen tiloja sillä tarkkuudella kuin on tämän raportin kannalta tarkoituksenmukaista.

Raportin seitsemännessä luvussa tarkastellaan ilmapurtojen kulkua erilaisten kaavojen ja laskentojen avulla. Laskennan tuloksia verrataan aiemmissa luvuissa saatuihin tuloksiin käytännön mittauksista. Raportin viimeisessä eli kahdeksannessa luvussa vedetään yhteen tärkeimmät johtopäätökset ja päätelmät, joita tämän raportin tutkimuksista voidaan tehdä.

# 2

## **SISÄILMAN LAATU JA ILMANVAIHTO**

---

*Tässä luvussa esitellään raportissa  
käytettävät tekniset, teoreettiset  
ja muut taustatiedot, jotka ovat  
tärkeitä raportissa myöhemmin  
selostettavien ratkaisujen  
ja käytettyjen menetelmien  
ymmärtämiselle.*

## 2.1

# Sisäilma ja sisäilmasto

*Sisäilmayhdistyksen määritelmän mukaan sisäilma on sisätiloissa hengitettävää ilmaa, jossa ilman perusosien lisäksi saattaa olla eri lähteistä peräisin olevia kaasumaisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Sisäilmalla tarkoitetaan tässä raportissa sitä rakenteiden rajaamaa ilmaa tiloissa, joissa ei ole pääsääntöisesti tuotannollisesta tai muusta poikkeavasta toiminnasta johtuvia päästöjä. Tällaisia tiloja ovat muun muassa asunnot, toimistot ja koulut. (Sisäilmayhdistys, 2013a)*

Sisäilmasto on sisäilmaa hieman laajempi sisäolosuhteita kuvaava kokonaisuus. Sisäilmasto muodostuu sisäilmasta ja siihen vaikuttavista fysikaalisista tekijöistä. Näitä fysikaalisia tekijöitä ovat; sisäilman kaasumaiset yhdisteet, sisäilman hiukkasmaiset epäpuhtaudet, lämpötila, kosteus, ilman liike, säteily, valaistus ja melu (Sisäilmayhdistys, 2013a). Toimisto- ja opetusrakennusten normaaleja sisäilmaston kaasumaisia yhdisteitä ovat muun muassa haihtuvat orgaaniset yhdisteet, materiaalien kemialliset yhdisteet ja formaldehydi. Hiukkasmaisia epäpuhtauksia taas voisivat olla esimerkiksi huonepöly, liikenteen ja teollisuuden hiukkasmaiset epäpuhtaudet ja ihmisten sekä eläinten hilse.

Oleellinen osa sisäilman laatua on se, kuinka rakennusta ja sen tiloja käytetään. Ihmisten toiminta, tupakointi, käytetyt sisustus- ja rakennusmateriaalit, lemmikkieläimet, huonekasvit, siivouksen laatu, tiloissa tehtävät askareet sekä monet muut käyttäjän toimintaan liittyvät asiat vaikuttavat merkittävästi tilojen sisäilmaston muodostumiseen. Talotekniikalla voidaan saada paljon aikaan, mutta tilojen asiallinen on vähintään yhtä merkittävää. Myös rakennukselle ja sen tekniikalle tehtävät erilaiset huolto-, hoito-, siivous-, ylläpito- ja korjaustoimenpiteet näyttelevät merkittävää osaa sisätilojen ilmanlaadun muodostumisessa. Aivan kuten esimerkiksi autot, myös rakennukset tarvitsevat jatkuvaa huoltoa ja huolenpitoa. Huoltokirja on pitkään ollut autoihin kiinteästi kuuluva asiakirja, mutta yksityisomistuksessa olevissa rakennuksissa se on vielä harvinainen. Rakennusten tapauksessa huoltokirjaa kutsutaan rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeeksi. Rakentamismääräyskokoelman osan A4 mukaan rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje on tehtävä kaikkiin uudis- tai korjauskohteisiin, joita käytetään pysyvään asumiseen tai työskentelyyn (Ympäristöministeriö 2000, s. 3).

## 2.2

# Sisäilman tärkeimmät suureet

*Tässä alaluvussa esitellään suureet, joiden perusteiden ymmärtäminen on tärkeää myöhemmin esitettävien tulosten ymmärtämiselle. Suureista esitellään lyhyesti lämpötila, lämpöolot, ilman suhteellinen kosteus ja ilman hiilidioksidipitoisuus.*

Lämpötila on sisäilman suureista yleisesti tunnetuin. Miltei joka kodissa on lämpömittarit ulko- ja sisälämpötilojen seurantaan. Lämpötila on kappaleen, myös ilman, sisäenergian määrä. Lämpötila siis kuvaa, miten lämmin tai kylmä jokin esine tai aine on. Lämpötilan SI-järjestelmän yksikkö on kelvin. Tässä raportissa käytetään kuitenkin celsiusasteita, koska se on huomattavasti käytetympi suure sisäilmaan liittyvissä asioissa.

Lämpöolot on hieman lämpötilaa laajempi käsite ja se koostuu ilman lämpötilan lisäksi kosteuden ja virtausnopeuden sekä ympäröivien pintojen lämpötilojen yhteisvaikutuksesta. Ihmisen elimistö toimii parhaiten silloin, kun se luovuttaa lämpöä yhtä paljon kuin tuottaa. Lämpötasapainon tulisi pysyä yllä viihtyisästi ilman liiallisen kuumuuden aiheuttamaa hikoilua tai kylmyyden aiheuttamaa vapinaa ja muita reaktioita. Lämpötasapainoon vaikuttavat yksilölliset ominaisuudet, liikunta ja työ sekä lämmönhukka, joka määräytyy vaatetuksen sekä



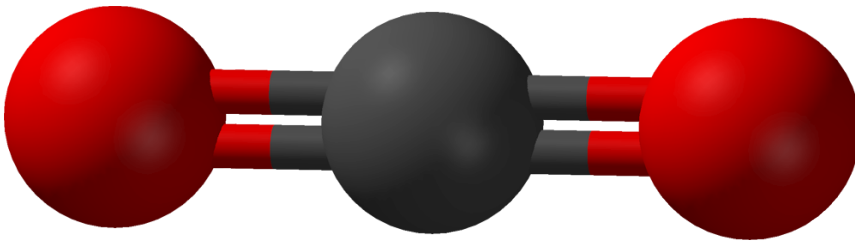
ympäristön lämpötilan, tuulen ja kosteuden mukaan. Yksilöllisillä ominaisuuksilla, kuten vaatetus, ikä, sukupuoli ja kehonkoostumus, voikin olla usean asteen vaikutus siihen, minkä lämpötilan kukin kokee sopivaksi.

Niin sanottu operatiivinen lämpötila edustaa ihmisen tuntemaa kokonaislämpötilaa. Operatiivinen lämpötila ottaa huoneilman lämpötilan lisäksi huomioon myös ihmistä ympäröivien pintojen lämpötilat. Operatiivisen lämpötilan avulla kuvataan tarkemmin ihmisen aistimaa ja kokemaa lämpötilaa.

Ilman suhteellinen kosteus kertoo, kuinka monta prosenttia ilmassa on vesihöyryä siitä määrästä, jonka ilma tietyssä lämpötilassa pystyy itseensä sitomaan. Esimerkiksi suhteellisen kosteuden ollessa 50 prosenttia, pystyisi ilma sitomaan itseensä kyseisessä lämpötilassa vielä saman verran vettä kuin siinä jo on. Lämmin ilma pystyy sitomaan huomattavasti enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma. Esimerkiksi + 23 °C:n lämpötilassa ilma pystyy sitomaan itseensä 20,6 grammaa ja + 10 °C:n lämpötilassa 9,4 grammaa vettä kuutiometriä kohden (Vaisala Humidity Calculator, 2013).

Suhteellinen kosteus on viihtyisyyden ja terveyden kannalta tärkeä sisäilman suure. Ihmisen keuhkot tarvitsevat kosteaa ilmaa. Nenä, nielu ja henkitorvi kostuttavat hengitettyä ilmaa, mutta ne rasittuvat pitkäaikaisesta kuivassa ilmassa oleskelusta. Sisäilma ei siis saisi olla liian kuivaa. Sisäilman liiallinen kosteus taas voi aiheuttaa mikrobikasvustoa rakenteissa ja lisätä punkkien esiintyvyyttä. Korkea sisäilman kosteus on myös homesienten ja lahovaurioiden syntymistä edesauttava tekijä. Sisäilman suhteellinen kosteus on myös rakennusfysikaaliseen toimivuuteen liittyvä tärkeä tekijä.

Hiilidioksidi on hiilestä ja hapesta koostuva kemiallinen yhdiste. Hiilidioksidimolekyylillä on lineaarinen ja 232 pikometriä pitkä, ja piirroskuvan siitä voi nähdä kuvana 2.1. Hiilidioksidi on suurina pitoisuuksina terveydelle haitallista. Puhtaana kaasuna se syrjäyttää hapen ja voi tukahduttaa ihmisen. Alhaisten, alle 3000 ppm:n hiilidioksidipitoisuuksien pitkäaikaisia vaikutuksia ihmiseen on tutkittu hyvin vähän. Normaaleissa olosuhteissa hiilidioksidi esiintyy ainoastaan kaasuna ja se härmistyy kiinteäksi vasta  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa. Hiilidioksidin tiheys on noin  $1,98\text{ kg/m}^3$ , eli noin 1,5 kertaa ilman tiheys, joka on  $1,2\text{ kg/m}^3$  sisäolosuhteissa. (Työterveyslaitos 2011, s. 2)



Kuva 2.1.

Kuvassa nähdään pallo-tikku-malli hiilidioksidimolekyylistä, joka on lineaarinen ja noin 232 pikometrin pituinen. Hiilidioksidi on olennainen osa yhteyttämistä ja siksi elämän kannalta välttämätön. Toisaalta, hiilidioksidin liian korkea pitoisuus Maan ilmakehässä tai rakennusten sisäilmassa aiheuttaa ongelmia. (Ray Alex Web, 2013)

Hiilidioksidipitoisuus on tärkeä ja runsaasti mitattu sekä käytetty sisäilman suure. Ihminen tuottaa hengittäessään hiilidioksidia ja hiilidioksidipitoisuus kuvaakin myös muiden ihmisperäisten päästöjen määrää ilmassa. Aktiivisuustasostaan ja koostaan riippuen ihminen tuottaa puhdasta hiilidioksidia noin 0,3–1,5 litraa minuutissa, äärimmäisessä rasituksessa enemmänkin. Hiilidioksidin tuoton määrä on suoraan verrannollinen fyysiseen aktiviteettiin ja hapenkulutukseen. Ihmisen hiilidioksidituoton ja hiilidioksidin suhteellisen helpon mitattavuuden vuoksi hiilidioksidipitoisuutta käytetään ilmanvaihdon mitoituksen perusteena tiloissa, joissa ihmisten aiheuttama kuormitus on merkittävin

ilmanlaatua alentava tekijä. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus kuvaa siis ilmanvaihdon riittävyttä suhteessa ihmisten läsnäolon aiheuttamaan kuormitukseen. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden on huomattu reagoivan nopeasti ihmisten oleskeluun sisätiloissa ja hiilidioksidipitoisuutta käytetäänkin usein ohjaamaan tarpeenmukaista ilmanvaihtoa.

On huomionarvoista, ettei hiilidioksidipitoisuus ole ainoa tai määräävä sisäilman laadun mittari. Hiilidioksidipitoisuuden on vain huomattu olevan suhteellisen helposti mitattavissa oleva ja hyvin muitakin ihmisperäisiä epäpuhtauksia edustava suure. Mikäli hiilidioksidia on ilmassa paljon, on ilmassa runsaasti myös muita ihmisperäisiä epäpuhtauksia, ja ilma tuntuu ihmisten mielestä tunkkaiselta. Hiilidioksidipitoisuutta ilmassa kuvataan yleensä yksiköllä miljoonasosina tilavuudesta (ppm) tai mikrogrammana kuutiometrissä ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Tässä raportissa käytetään hiilidioksidipitoisuuden suureena miljoonasosaa tilavuudesta (ppm). Ilmakehän ja ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on ollut kasvussa viime vuosikymmeninä ihmisen runsaan fossiilisten polttoaineiden käytön seurauksena. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus vaihtelee hieman sijainnista riippuen. Ilmatieteen laitoksen Pallaksen asemalla kuukausittainen hiilidioksidipitoisuuden taso ylitti 400 ppm ensimmäisen kerran huhtikuussa 2012 (Ilmatieteen laitos, 2013). Tätä noin 400 ppm:n pitoisuutta voidaan pitää raikkaana lähtötasona myös sisäilman hiilidioksidipitoisuudelle.

## 2.3

# Sisäilmastoluokat sekä määräyksiä ja suosituksia sisäilman suureille

*Sisäilmaan ja ilmanvaihtoon liittyvin määräyksiin, asetuksiin ja ohjein pyritään takaamaan kaikille rakennuksia käyttäville ihmiselle terveelliset, turvalliset ja viihtyisät sisäilmasto-olot vaikuttamalla rakennusten suunnitteluun, rakentamiseen ja käyttöön. Tässä alaluvussa esitellään tämän raportin kannalta oleellimmat määräykset, asetukset ja ohjeet, joihin vertaamalla myöhemmin esitettävien tulosten arviointi on helppoa.*

Sisäilmayhdistys ry on vuonna 1990 perustettu aatteellinen yhdistys, jonka tarkoituksena on edistää rakennusten terveelliseen ja viihtyisään sisäilmastoon tähtäävää työtä (Sisäilmayhdistys, 2013b). Sisäilmayhdistyksen Sisäilmastoluokitus 2008 asettaa sisäilmaston kolmeen eri laatuluokkaan: S1 on erinomainen ja yksilöllinen luokka, S2 on hyvä ja S3 on tyydyttävä sisäilmasto. Luokan S1 rakennuksessa on yksilöllinen sisäilmasto, ilmanlaatu 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 luokassa sallitaan S1 luokkaa suurempia lämpötilan nousuja esimerkiksi hellepäivinä sekä hetkellistä vetoa. S3 luokassa tilan sisäilman laatu ja lämpöolot sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. (Säteri, 2008)

Sisäilman laatu ei ole täysin absoluuttinen arvo, vaan myös henkilökohtaisilla mieltymyksillä, mielipiteillä ja psykososiaalisilla tekijöillä on merkittävä vaikutus siihen, kuinka laadukkaaksi sisäilma koetaan. Sisäilman laatu on siis myös tottumiskysymys, muodostettu mielipide ja makuasia. Hyvää sisäilman laatua on melko vaikea määritellä pelkästään tiettyjen suureiden numeroarvojen avulla. Tämä lienee yksi syy siihen, miksi Sisäilmayhdistyksen Sisäilmastoluokituksessa sanalliset kuvailut olosuhteista ovat luokittelussa oleellisessa osassa. Numeeriset raja-arvot annetaan suureista ainoastaan lämpötilalle ja hiilidioksidille. Hiilidioksidipitoisuudelle annettavat maksimipitoisuudet luokittain ovat S1 750 ppm, S2 900 ppm ja S3 1200 ppm. Sisälämpötilan raja-arvot vaihtelevat luokituksessa ulkolämpötilan 24 tunnin keskiarvon mukaan. Luokissa S1 ja S2 sisäilman lämpötila tulee lämmityskaudella olla välillä 20 – 23 °C. Kesällä sallitaan luokassa S1 nousu korkeintaan 26 °C:een, S2:ssa 27 °C:een ja S:ssa ei anneta maksimiarvoa kesäkaudelle. Lisäksi luokissa S1 ja S2 lämpötiloille annetaan 90 tai 95 prosentin pysyvyyksivaatimukset kapeammalle tavoitealueelle.

Lainvoimaisen Suomen ympäristöministeriön asettaman rakentamismääräyskokoelman ilmanvaihtoa käsittelevä osa D2 määrää ilmanlaatuun liittyen seuraavaa: ”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että sisäilmassa ei esiinny haitallisessa määrin kaasuja, hiukkasia tai mikrobeja eikä viihtyisyyttä alentavia hajuja.” Lisäksi rakentamismääräyskokoelma ohjeistaa, että sisäilman hiilidioksidin pitoisuus tavanomaisissa sääoloissa ja huonetilan käyttöaikana on yleensä enintään 1200 ppm. Oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan suunnitteluarvoksi D2 ohjeistaa lämmityskaudella 21 °C ja kesäkaudella 23 °C. (Ympäristöministeriö 2012, s. 6) Asumisterveysohjeen mukaan sisäilma ei ole terveydensuojelain vaatimukset täyttävää, jos hiilidioksidipitoisuus on yli 2700 mg/m<sup>3</sup> eli 1500 ppm (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, s. 22).

Mitattavien suureiden lisäksi yksi sisäilman laadun selvittämiseen ja luokitteluun käytetty keino on kyselytutkimus. Kyselytutkimuksissa kysytään tilojen käyttäjien tyytyväisyyttä sisäilmasto-olosuhteisiin. Voidaankin määritellä esimerkiksi, että sisäilma on hyvää, jos tietty osa rakennuksen käyttäjistä on tyytyväisiä sisäilman laatuun ja jos sisäilman haittatekijät eivät aiheuta terveydellistä vaaraa (Sisäilmayhdistys, 2013). Kuvassa 2.2 esiintyvä kyselylaite on yksi tapa selvittää, kuinka tyytyväisiä käyttäjät tiloihin ovat. Kyselytutkimuksia ja käyttäjien mielipiteitä kysyttäessä tehtäessä on otettava huomioon, että tutkimusten mukaan vähintään 5 prosenttia ihmisistä on aina tyytymättömiä sisäolosuhteisiin (Seppänen, O. 1988, s. 12). Osa ihmisistä on siis joka tapauksessa tyytymättömiä, olivatpa olosuhteet millaiset tahansa.



Kuva 2.2.  
Sisäilman laatua voidaan arvioida fysikaalisten suureiden mittaamisen lisäksi myös tilojen käyttäjille suunnatuilla kyselytutkimuksilla.

## 2.4

# Ilmanvaihtotapoja

*Ilmanvaihdolla tarkoitetaan yleisesti huoneilman laadun ylläpitämistä ja parantamista huoneen ilmaa vaihtamalla. Ilmastoinnista puhutaan silloin, kun sisäilmaa käsitellään jotenkin sisäilman laadun, lämpötilan, kosteuden tai puhtauden parantamiseksi. Toimiva ilmanvaihto on lähtökohta laadukkaalle sisäilmalle. Tässä luvussa esitellään lyhyesti Suomessa yleisimmin käytetyt rakennusten ilmanvaihtotavat.*

Ilmanvaihto perustuu aina paine-eroihin, joiden ansiosta ilma virtaa suuremmasta paineesta kohti pienempää painetta. Paine-erot taas syntyvät joko luonnostaan lämpötila- ja korkeuserojen ansiosta tai koneellisesti puhaltimien avulla. Rakennusten ilmanvaihto voidaankin toteuttaa niin sanottuna luonnollisena tai koneellisena ilmanvaihtona. Näiden molempien periaatteiden ilmanvaihtotapoja tehostetaan usein tarpeen mukaan esimerkiksi ikkunatuuletuksella.

Perinteinen luonnollisiin paine-eroihin perustuva niin sanottu painovoimainen ilmanvaihto oli aiemmin käytetyin menetelmä. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa ajatuksena on järjestää sekä tulo- että poistoilmalle vapaat virtausreitit rakennukseen ja sieltä ulos. Virtausreittien tulee olla riittävän vähän painehäviöitä aiheuttavat, jotta lämpötila- ja korkeuserojen aikaansaamat suhteellisen pienet paine-erot saisivat aikaan

riittävän ilmanvaihdon. Käytännössä virtausreitit toteutetaan tuloilman osalta seinissä olevien korvausilmareikien, korvausilmaventtiilien sekä rakennuksen vaipassa olevien vuotokohtien avulla. Tuloilman tehokas suodattaminen on haastavaa, koska suuria paine-eroja ei saa syntyä. Poistoilma kulkeutuu ulos rakennuksesta tiloista rakennuksen katolle kulkevien poistoilmahormien kautta. Poistoilmahormeja on oltava useita, koska ilman ei välttämättä haluta siirtyvän tilasta toiseen, ja toisaalta hormien on oltava mahdollisimman mutkattomia pienen painehäviön saavuttamiseksi.

Painovoimaisen ilmanvaihdon etuna on helppo ylläpito, sillä huollettavia koneita ei ole. Yhtenä ongelmana on huono säädettävyys, sillä luonnollisen paine-eron ja sitä kautta ilmanvaihdon syntyminen on voimakkaasti riippuvainen vallitsevista sääolosuhteista. Myös kylmän ilman kulkeutuminen rakennukseen korvausilmaventtiilien tai muiden vaipan vuotokohtien kautta on hallitsematonta. Kehittyneiden tekniikoiden sekä rakennusten kiristyneiden energiatehokkuusvaatimusten myötä painovoimainen ilmanvaihto on saanut väistyä koneellisten ilmanvaihtotapojen tieltä. (Seppänen & Seppänen 1996, s. 166 - 168)

Asunnoissa hyvin yleinen ilmanvaihtotapa on koneellinen poistoilmanvaihto, jossa likainen ilma poistetaan rakennuksesta koneellisesti ja korvausilma tulee rakennukseen ikkunarakojen, korvausilmaventtiilien ja vuotokohtien kautta. Koneellisen poistoilmanvaihdolla voidaan saada aikaan parempi ilmanvaihtuvuus vuodenajasta ja sääolosuhteista riippumatta. Lisäksi rakennuksen sisällä sisäilman siirtyminen tilasta toiseen saadaan tapahtumaan halutulla tavalla koneellista poistoilmanvaihtoa käytettäessä.

Myös koneellisen poistoilmanvaihdon energiatehokkuus kärsii siitä, että korvausilma otetaan rakennukseen suoraan ulkoilmana lämmittämättä sitä lämmöntalteenotolla. Myös veto-ongelmia esiintyy etenkin talviaikaan, jolloin sisään lämmittämättä vuotava ilma on kylmää. Rakenteiden epäpuhtauksia saattaa kulkeutua sisäilmaan, koska pelkkä poistoilmanvaihto saa aikaan vaipan tiiveydestä riippuen suurenkin paine-eron rakennuksen ja ulkoilman välille.

Julkisissa rakennuksissa ja uusimmissa asunnoissa yleisimmin käytetty ilmanvaihtotapa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Tässä ilmanvaihtotavassa sekä tulo- että poistoilman kuljettaminen hoidetaan koneellisesti. Tällaisella ilmanvaihtotekniikalla voidaan



saada hallitusti aikaan riittävä ja vedoton ilmanvaihto kaikissa tiloissa ulko-olosuhteista juurikaan riippumatta. Hallittu tuloilman tuonti mahdollistaa sen suodattamisen ja lämmittämisen, mikä parantaa sisäilmastoa useissa tapauksissa. Poistoilman sisältämän lämpöenergian hyödyntäminen tuloilman lämmittämisessä on mahdollista lämmön talteenottojärjestelmillä. Poistoilman lämmön talteenotto parantaa rakennusten energiatehokkuutta. Lämmön talteenottojärjestelmiä on lukuisia erilaisia ja niiden vuosihyötysuhde vaihtelee tyypillisesti välillä 0,45 – 0,75 (Ympäristöministeriö 2007, s. 23).

Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihto vaatii säännöllistä huoltoa. Vikaantuvia osia on muita ilmanvaihtotapoja huomattavasti enemmän. Ongelmia syntyy, jos koneet ja kanavat eivät ole kunnossa. Rakentamisen ja remonttien aikana on kiinnitettävä huomiota siihen, etteivät kanavat likaannu rakennuspölyistä.

## 2.5

# Määräyksiä ja ohjeita ilmanvaihdolle

*Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan D2 luvun 3 alussa (Ympäristöministeriö 2012, s. 9) määrätään seuraavaa:  
”Ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja rakennettava rakennuksen suunnitellun käyttötarkoituksen ja käytön perusteella siten, että se luo omalta osaltaan edellytykset tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa terveelliselle, turvalliselle ja viihtyisälle sisäilmastolle.”*

Yllämainitun tavoiteltavan tilanteen saavuttamiseksi ilmanvaihdolle asetetaan myös tarkkoja määräyksiä ja ohjeita. Määräyksiä ja ohjeita annetaan muun muassa ilmavirroille, äänitasoille, kanavien painetasoille, vaipan ja ulkoilman paine-eroille sekä ilman virtausnopeuksille oleskeluvyöhykkeellä. Tässä luvussa tutustutaan määräyksistä tämän tutkimuksen kannalta oleellisiin osiin.

Tiloihin johdettavien ulkoilmavirtojen määriin annetaan ohjeita ja määräyksiä, jotta rakennusten sisäilma pysyisi raikkaana. Ilmanvaihdon ulkoilmavirran määrän mitoittamiseen käytetään rakennuksen ja tilan käyttötarkoituksen huomioon ottavaa ilmanvaihdon suuruuden

määräävää kriteeriä. Näitä kriteerejä voivat olla muun muassa ilman hiilidioksidipitoisuus, ihmisperäiset hajut, tupakan savu, kosteus ja rakennus- ja sisustusmateriaalien päästöt (Seppänen & Seppänen 1996, s. 163 - 164). Määräyksissä ja ohjeissa ulkoilmavirta määräytyy ensisijaisesti tilojen henkilömäärien perusteella. Mikäli henkilöiden lukumäärän mukaiseen mitoitukseen ei kuitenkaan ole perusteita, käytetään huoneiden lattiapinta-alaan perustuvaa mitoitusta.

Oppilaitosten opetustilojen ilmajirroiksi Rakentamismääräyskokoelman osa D2 (Ympäristöministeriö 2012, liite 1, taulukko 3) ohjeistaa 6 litraa sekunnissa henkilöä kohden tai 3 L/(s,m<sup>2</sup>). Luentosaleihin puolestaan tuodaan D2:n ohjeiden mukaan 8 litraa sekunnissa henkilöä kohden tai 6 litraa sekunnissa lattianeliömetriä kohden. Oppilaitosten käytäville ja auloihin D2 opastaa tuotavan ulkoilmaa 4 litraa sekunnissa lattianeliömetriä kohden. Tässä tutkimuksessa tutkittavat tietokoneluokat voidaan laskea kuuluviksi opetustiloihin. Lisäksi ilmanlaadun tasaamisessa oleellisessa osassa ovat myös kuormitettujen tilojen viereiset käytävät ja aulat.

”Ihmistä häiritsevä, haitallinen tai tarpeeton ääni on melua.”, sanotaan tutkimusraportissa Talonrakentamisen akustiikka (Kylliäinen 2006, s. 13). Kylliäinen (2006, s. 143) listaa edelleen, että rakennusten talotekniset järjestelmät vaikuttavat rakennusten ääniosuhteisiin lähinnä kolmella tavalla; ilman virtausäänet, koneiden värähtelyn aiheuttamat runkoäänet sekä läpivientien rakenteiden ilma- tai askeläänieristyskykyä heikentävä vaikutus. Jotta ilmanvaihto ei tuottaisi liikaa melua, on sen akustiikkaan kiinnitettävä huomiota. Rakentamismääräyskokoelman osan

C1 (Ympäristöministeriö 1998, s. 7) mukaan oppilaitosten luokkahuoneita vastaavissa tiloissa taloteknisten laitteiden aiheuttama suurin ohjeellinen keskiäänitaso on 33 dB (A) ja enimmäisäänitaso 38 dB (A). A-merkintä tarkoittaa mitattujen äänenpainetasojen painotusta ihmiskorvan kannalta oleellisilla taajuuksilla niin, että luvut kuvaavat paremmin äänen häiritsevyyttä ihmisille.

Rakennuksen eri huonetilojen painesuhteet pyritään aina suunnittelemaan siten, että ilma virtaa puhtaammista tiloista sellaisiin tiloihin, joissa syntyy enemmän epäpuhtauksia. Ulkoilmaan nähden rakennus pyritään suunnittelemaan yleensä lievästi alipaineiseksi, jottei muodostuisi riskiä kostean sisäilman kondensoitumisesta viileisiin ulkoseiniin. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa rakennuksen alipaineisuus ulkoilmaan nähden saadaan aikaan tekemällä poistoilmavirrasta hieman tuloilmanvirtaa suurempi.

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

Taulukko 1

Suosittelut paine-erot rakennuksen ulkovaipan yli. Miinus-merkki tarkoittaa sisätilojen alipaineisuutta ulkoilmaan nähden. (Asumisterveysopas 2009, s. 60)

## 2.6

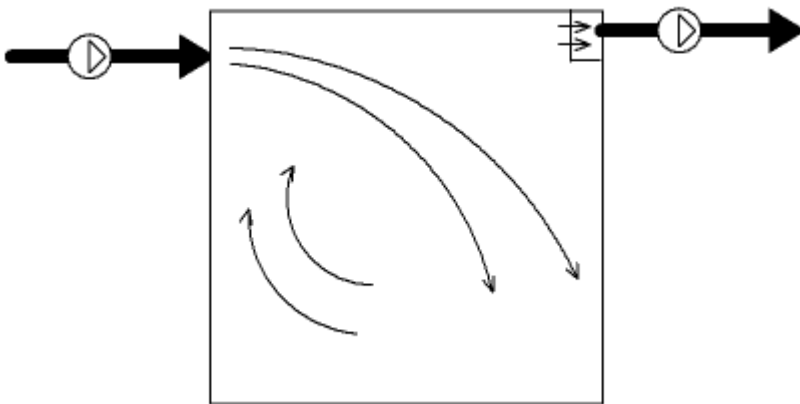
# Huonekohtaisia ilmanjakotapoja

*Ilmanjakotavalla tarkoitetaan sitä tapaa, jolla ilman tuonti tilaan ja ilman poistuminen tilasta on toteutettu. Suomalaisissa opetus- ja toimistorakennuksissa yleisimmät ilmanjakotavat voidaan jakaa karkeasti kahteen; sekoittaviin ja syrjäyttäviin. Näiden kahden ilmanjakotavan lisäksi tässä alaluvussa esitellään laminaarinen ilmanjakotapa. Ilmanjakotapa valitaan tilakohtaisesti ottaen huomioon muun muassa tilan ominaisuudet ja käyttötarkoitus.*

Sekoittavan ilmanjaon tarkoituksena on sekoittaa tuloilma huonetilassa jo olevaan ilmaan siten, että tilan lämpötila ja epäpuhtauskonsentraatiot olisivat mahdollisimman tasaiset joko koko huonetilassa tai valitulla alueella, esimerkiksi oleskeluvyöhykkeellä. Yleensä tuloilma tuodaan tilan yläosiin ja melko kovalla nopeudella, jotta saataisiin aikaan sekoittava vaikutus. Kuva 2.3 havainnollistaa ilmavirtojen liikettä huoneessa, jossa on sekoittava ilmanjakotapa.

Sekoittava ilmanjako pitää sisäilman laadun tasaisena kaikkialla tilassa. Tuloilman suuren nopeuden takia on suunnittelussa kiinnitettävä

erityistä huomiota tuloilmalaitteiden akustisiin ominaisuuksiin meluongelmien estämiseksi sekä tuloilman oikeaan suuntaamiseen käyttäjien vedontunteen välttämiseksi. Sekoittavassa ilmanvaihdossa poistoilmassa on suurin piirtein yhtä paljon epäpuhtauksia kuin huoneessa keskimäärin. Sekoittava ilmanjakotapa on hyvin yleisesti käytetty ilmanjakotapa, jolla huolehditaan yleensä muun muassa luokkahuoneiden ja toimistohuoneiden ilmanlaadusta.

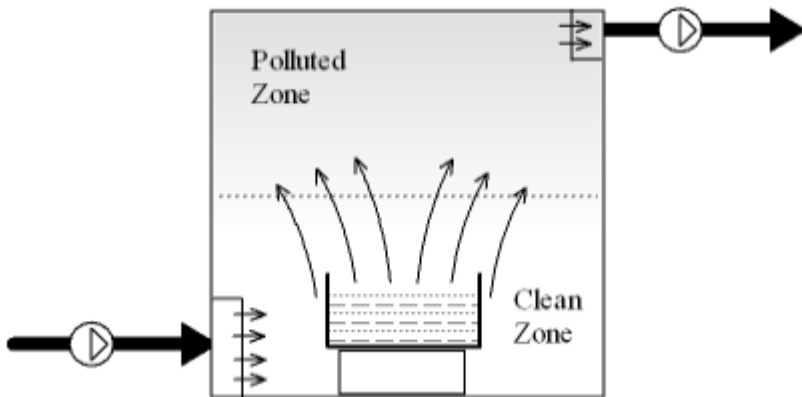


Kuva 2.3

Sekoittavan ilmanjakotavan periaatteena on sekoittaa tilaan tuotava ilma mahdollisimman tehokkaasti tilassa jo olevaan ilmaan aiheuttamatta kuitenkaan vetoa. Sekoittava ilmanjako pyrkii takaamaan tasaisen ilmanlaadun koko tilassa. (EngineerToolBox, 2013)

Syrjäyttävän ilmanvaihdon periaatteena on pitää oleskeluvyöhykkeen ilmanlaatu hyvänä ohjaamalla epäpuhdas ilma kohti poistoilmavaihtoa, joka sijaitsee yleensä huoneen yläosissa. Huonelämpötilaa viileämpi tuloilma johdetaan huonetilan alaosiin pienellä nopeudella kuvan 2.4 osoittamalla tavalla. Syrjäyttävässä ilmanvaihdossa on ajatuksena käyttää hyväksi ihmisten ja muiden huoneessa olevien lämpökuormien lämmittävää vaikutusta niin, että tuloilma lämpenee, kevenee ja nousee huonetilassa ylemmäs kohti poistoilmakanavia. Syrjäyttävässä ilmanvaihdossa poistoilman epäpuhtauspitoisuudet ovatkin huonetilan

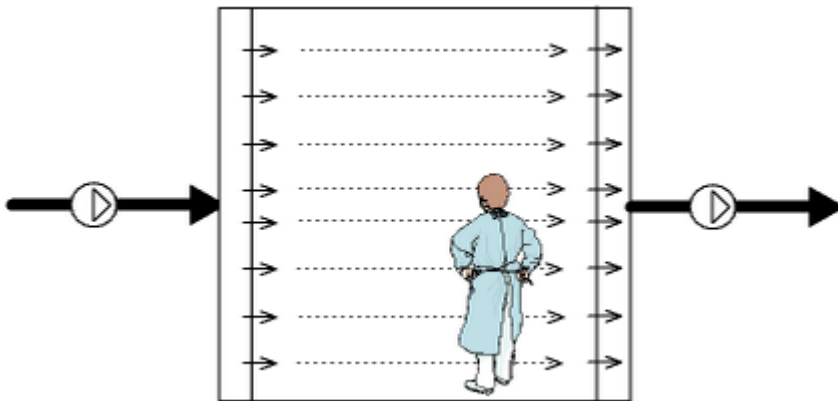
keskiarvoa suuremmat. Syrjäyttävä ilmanjakotapa vaatii toimiakseen oleskeluvyöhykkeen lämmönlähteen. Lisäksi tilan on oltava riittävän korkea, jotta lämmenneen ilman luonnollista siirtymistä ylöspäin voi tapahtua ilman, että katto tulee heti vastaan. Syrjäyttävää ilmanjakotapaa käytetäänkin usein esimerkiksi auditorioissa, elokuvateattereissa ja suurissa luentosaleissa.



Kuva 2.4

Syrjäyttävän ilmanjakotavan periaatteena on, että tuloilma kulkeutuu rintamana tiettyyn suuntaan ja näin työntää epäpuhtauksia ja ylimääräistä lämpöä edellään kohti poistoilmavaihtoa. Yleensä tuloilma tuodaan tilan alaosiin. Tuloilma on tällöin huoneilmaa viileämpää ja lämmitessään kulkee hitaasti alhaalta ylöspäin (EngineerToolBox, 2013)

Mäntäperiaatteen mukaisen eli laminaarisen ilmanjaon tavoitteena on saada tilaan tasainen suora ja pyörteetön ilmavirtaus tuloilmakojeesta poistoilmakojeeseen. Laminaarisessa ilmanjaossa tuloilma tuodaan tilaan suurelta pinta-alasta ja alhaisella nopeudella. Usein tuloilma tuodaan tilaan ylhäältä katosta, ja suurta tuloilmapäätettä sanotaankin laminaarikatoksi. Laminaarinen ilmanjako voi toimia myös seinästä seinään, kuten kuvassa 2.5 on esitetty. Laminaarisessa ilmanjaossa ilmamäärät ovat suuria, ja siksi osa poistoilmasta kierrätetään uudelleen tilaan suodatettuna kierrätysilmana. Laminaarista ilmanjakoa käytetään etenkin tiloissa, joissa vaaditaan tavallista tehokkaampaa ilmanvaihtoa ja korkeampaa puhtaustasoa, esimerkiksi leikkaussaleissa.



Kuva 2.5

Laminaarisessa ilmanjakotavassa ilmamassojen sekoittumista pyritään välttämään aiheuttamalla tilaan tietyn suuntainen ilmavirtaus melko suurilla ilmamäärillä. Tätä tapaa käytetään esimerkiksi leikkaussaleissa ja muissa tiloissa, joissa vaaditaan tavallista tehokkaampaa ilmanvaihtoa. (EngineerToolBox, 2013)

Erilaisia ilmanjakotapoja koneellisessa ilmanvaihdossa on tässä esiteltyjen kolmen yleisimmän lisäksi muitakin. Ei voida sanoa, mikä jakotapa olisi selvästi muita parempi, vaan jokaiselle ilmanjakotavalle on omat käyttökohteensa ja ilmanjakotapa on valittava tapauskohtaisesti. Ilmanjakotapaa valittaessa on otettava huomioon lukuisia tilaan ja rakennukseen liittyviä asioita. Näitä asioita ovat esimerkiksi tilan käyttötarkoitus nyt ja vastaisuudessa, käytettävissä olevat resurssit ja tavoiteltava laatutaso.



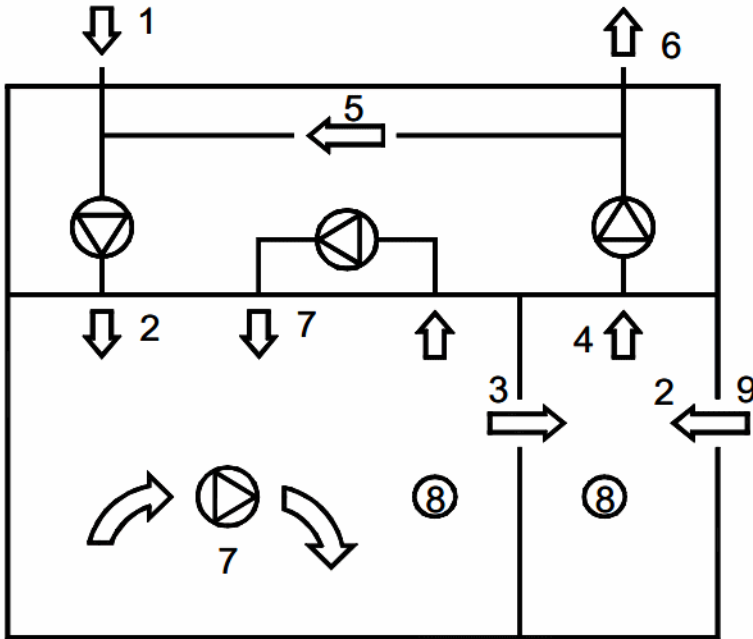
## 2.7

# Siirtoilma ja muut rakennuksen ilmavirrat

*Siirtoilmaksi kutsutaan ilmaa, joka siirtyy rakennuksen sisällä tilasta toiseen. Usein ilmanvaihto pyritään suunnittelemaan siten, että ilma siirtyisi rakennuksen sisällä ilmanvaihdon kannalta puhtaista tiloista, esimerkiksi makuuhuoneista, kohti likaisia tiloja kuten keittiö ja saniteettitilat. Juuri tämä rakennuksen sisällä huoneista toisiin siirtyvä sisäilma on siirtoilmaa. Tutkimuksissamme oli ajatuksena tutkia, voitaisiinko siirtoilman avulla tasata vierekkäisten tilojen ilmanlaatua tarpeen mukaan.*

Rakentamismääräyskokoelman osa D2 (Ympäristöministeriö 2012, s. 12) antaa poistoilmaluokituksen, jonka poistoilmaluokan 1 kuvaus on seuraava: ”Poistoilma, joka sisältää vain vähän epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet ovat pääasiallisesti lähtöisin ihmisistä tai rakenteista. Ilma soveltuu palautus- ja siirtoilmaksi.” Ja edelleen tilaesimerkkeinä annetaan: ”Toimistotilat ja niiden yhteydessä olevat pienet varastotilat, yleisöpalvelutilat, opetustilat, eräät kokoontumistilat sekä liiketilat, joissa ei ole hajukuormitusta.” Rakentamismääräyskokoelman osa D2 tarkoittaa myöhemmin seuraavasti: ”Palautus- ja siirtoilmana saadaan käyttää

vain ilmanpuhtaudeltaan samanarvoisten tai puhtaampien tilojen ilmaa, joka ei saa sisältää haitallisia määriä epäpuhtauksia.” Kuva 2.6 näyttää ilmanvaihdossa eri ilmavirroista käytetyt nimitykset.



Kuva 2.6

Ilmavirtojen nimitykset: 1. ulkoilma, 2. tuloilma, 3. siirtoilma, 4. poistoilma, 5. palautusilma, 6. jäteilma, 7. kierrätysilma, 8. sisäilma ja 9. ulkoilma eli korvausilma. (Ympäristöministeriö 2012, s. 4)

Siirtoilma-aukot ovat lyhyitä ilmankulkureittejä kahden tilan tai tilan ja ulkoilman välillä. Siirtoilma-aukko tehdään tyypillisesti seinään ja kohtaan, josta on tarpeen johdattaa siirtoilmaa tilasta toiseen. Hyvin tavallisesti siirtoilma-aukon voi nähdä WC- tai suihkutilojen ja viereisen aulan, käytävän tai pukuhuoneen välisessä seinässä. Usein siirtoilma-aukko sijoitetaan myös WC-tilojen oveen tai oven päälle. WC- ja pesuhuonetiloissa on lähes poikkeuksetta pelkkä poistoilmanvaihto, jotta painesuhteet säilyisivät siirtoilma-ajatuksen kannalta edullisina ja edelleen välttyttäisiin likaisen ja kostean ilman kulkeutumiselta viereisiin tiloihin. Pelkkä poistoilmanvaihto tarkoittaa sitä, että tilat tulevat alipaineiseksi viereisiin tiloihin nähden

ja tiloihin tulee saada jostain korvausilmaa. WC-tiloihin tuloilma tuleeekin viereisistä tiloista siirtoilmana siirtoilma-aukkojen kautta. Pientaloissa WC-tilojen siirtoilma-aukkona toimii usein oven kynnysrako, joka sekkin otetaan huomioon ilmanvaihtosuunnittelussa siirtoilman kulkureittinä.

Siirtoilma-aukon sijainti ja tilan käyttötarkoitus määräävät, millainen siirtoilma-aukko on sopiva. Tilojen välisiin seiniin rakennettavat siirtoilma-aukot voivat olla pelkkiä yksinkertaisia reikiä mutta myös hieman monimutkaisempia ilmankulkureittejä, jotka toimivat esimerkiksi eristävät ilmaa ääntä eivätkä siten päästä lävitseen melua. Tekniikkaa tai akustisia ominaisuuksia sisältäviä siirtoilma-aukkoja kutsutaan usein siirtoilmalaitteiksi. Akustiset vaatimukset ja ilmankulkureittien monimutkaisuus hankaloittavat ilman kulkua siirtoilma-aukon läpi. Suuremman painehäviön voittamiseksi tarvitaan suurempi paine-ero. Siirtoilma-aukon painehäviö onkin yksi siirtoilman käyttöä suunniteltaessa huomioon otettava asia. Akustiset siirtoilmalaitteet varustetaan usein koneellisin puhaltimin äänenvaimentimien aiheuttaman painehäviön kattamiseksi ja ilman kulun tehostamiseksi. Tähän raporttiin liittyen asennetuissa siirtoilma-aukoissa ei ollut erityisiä akustisia ominaisuuksia.



**UUSIA  
MITTAUSVÄLINEITÄ  
JA -MENETELMIÄ**

---

*Mittaustekniikoiden kehittyessä tärkeimpien sisäilman suureiden, kuten hiilidioksidipitoisuuden, lämpötilan ja suhteellisen kosteuden, mittaaminen ja mittaustulosten kerääminen on yhä vaivattomampaa ja edullisempaa. Tarkkojen ja jatkuvien mittausten tekeminen on mahdollista yhä useammissa paikoissa eikä alan asiantuntemusta välttämättä vaadita. Sisäilmasuureiden ei enää tarvitse olla vain alaan tarkasti perehtyneiden ammattilaisten mitattavissa ja arvioitavissa, vaan jo pienelläkin perehtyneisyydellä ja resursseilla voidaan tehdä onnistuneita mittauksia. Tietojen tallentuminen esimerkiksi johonkin pilvipalveluun tekee tulosten keräämisestä vaivatonta. Myös tämän tutkimuksen alulle panneet ensimmäiset kiinnostusta herättäneet tulokset tulivat esiin osittain juuri siitä syystä, että mittausvälineet olivat helposti saatavissa ja käytettävissä.*

## 3.1

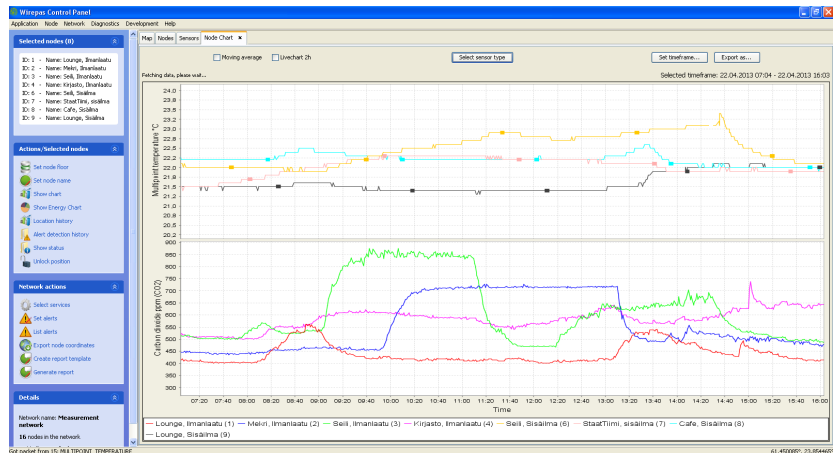
# Wirepas mittausjärjestelmä olosuhteiden seurantaan

*Tämän tutkimuksen kannalta merkittävien sisäilman suureiden mittaamiseen ja mittaustulosten keruuseen käytettiin liikuteltavaa Wirepas-mittausjärjestelmää. Wirepas-mittausjärjestelmä on alun perin kehitetty Tampereen teknillisellä yliopistolla ja sen on kaupallistanut yritys nimeltä Wirepas Oy.*

Wirepasin langaton järjestelmä mittaa ja tallentaa mittaustulokset sisäilman suureista kuten hiilidioksidipitoisuudesta, lämpötilasta, valaistusvoimakkuudesta ja suhteellisesta kosteudesta. Järjestelmän anturit muodostavat tiedonsiirtoverkon, joka välittää tiedot yhdyspisteelle. Yhdyspiste siirtää tiedot edelleen Internet-yhteyden avulla palvelimen tietokantaan.

Palvelimen tietokannasta mittaustuloksia voidaan tarkastella reaaliaikaisesti Wirepasin kehittämällä Java-pohjaisella Wirepas Control Panel –käyttöliittymällä, jonka yksi näkymä esitetään kuvassa 3.1. Control Panelia voidaan käyttää tietokoneella tai mobiililaitteella missä tahansa

kunhan Internet-yhteys on saatavilla. Control Panelissa käyttäjä pystyy tarkastelemaan haluamiensa antureiden mittaustuloksia reaaliaikaisesti tai jälkikäteen valitsemiltaan aikaväleiltä. Mittaustuloksia esitetään tarkemmin tämän raportin neljännessä, viidennessä ja kuudennessa luvussa. Yhteen mittauskokonaisuuteen kuuluvien anturien lukumäärä voi vaihdella muutamasta useisiin kymmeneen. Kaikkien antureiden ei kuitenkaan tarvitse olla aina yhtä aikaa käytössä, vaan jo yksikin anturi riittää, kunhan se vain saa yhteyden yhdyspisteeseen.



Kuva 3.1  
Näkymä Wirepas Control Panel – käyttöliittymässä. Kuvaan on esimerkin vuoksi haettu kahdeksan anturin arkipäivän aikana mittaamat lämpötila- ja hiilidioksidipitoisuuskäyrät monitilatoimisto Syklingistä.

Wirepas-anturit sijoitettiin mittaamaan tutkittujen tilojen oleskeluvyöhykkeille edustaviin paikkoihin. Joissain tapauksissa antureita sijoitettiin runsaasti eri puolille tilaa, jotta voitiin varmistua esimerkiksi hiilidioksidin jakautuneen tasaisesti luokan sisäilmaan. Varsinaisten tuloksia keräävien antureiden sijoittamisessa kiinnitettiin erityistä huomiota siihen, että mittaukset edustavat käyttäjän kokemia olosuhteita. Toisaalta varottiin sijoittamasta antureita liian lähelle käyttäjiä, jotta yksittäisen ihmisen läsnäolo lähellä anturia ei vääristäisi mittaustuloksia. Antureita ei sijoitettu tulo- ja poistoilmalaitteiden läheisyyteen, mikäli ei erityisesti ollut tarkoitus mitata tulo- tai poistoilman ominaisuuksia. Savukynän avulla varmistettiin, etteivät anturit olleet tuloilmavirtauksen tai ulkoa tulevan vuodon aiheuttamien virtausten kohdalla. Mittaustapahtumia seurattiin myös paikanpäällä, jolloin voitiin varmistua siitä, ettei mittausolosuhteissa tapahtunut mitään normaalista poikkeavaa, joka olisi saattanut aiheuttaa virhettä tuloksiin.

Ilman hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen käytettyjen Wirepas-mittareissa käytetyt anturit olivat nimeltään Dynament Premier Infrared Gas Sensor (sertificated). Anturin toiminta on NDIR-tekniikan mukaista ja perustuu kaasumaisen hiilidioksidin kykyyn absorboida infrapunasäteilyä. Antureiden mittaalue oli 0 – 5000 ppm, ja se oli riittävä tämän tutkimuksen tarpeisiin. Valmistaja ilmoittaa antureiden tarkkuudeksi +/- 2 prosenttia mittaalueen maksimista tai 10 prosenttia mittaustuloksesta riippuen siitä kumpi on suurempi. Tämän mukaan esimerkiksi 1000 ppm:n pitoisuudessa anturien tarkkuus on +/- 100 ppm. Käytännössä mittareiden huomattiin olevan tätä tarkempia, ja mittaustulosten nähtiin olevan poikkeuksetta korkeintaan +/- 70 ppm:n päässä oikeasta. Lisäksi antureiden systemaattista virhettä poistettiin tekemällä vertailukalibrointeja, jossa huolellisesti tuuletetun tilan vertailuarvoksi valittiin 400 ppm ja antureiden mittaamia tuloksia verrattiin tähän arvoon. Vertailuarvon oikeellisuus myös varmistettiin vertaamalla tuloksia seuraavassa alaluvussa esiteltävän käsimittarin antamiin tuloksiin.



Antureiden mittausresoluutiolla, josta käytetään myös nimeä erottelukyky tai erottelukynnys, tarkoitetaan anturin kykyä erottaa toisiaan lähellä olevien mittaussuureiden arvoja. On myös huomattava, että sähköisissä mittareissa lukematarkkuus ei ole sama asia kuin erottelukyky, vaan lukematarkkuus voidaan usein asettaa erittäinkin tarkaksi mittausresoluutiosta riippumatta. Wirepasin hiilidioksidiantureiden mittausresoluutio välillä 0 – 2500 ppm oli 50 ppm ja 100 ppm välillä 2500 – 5000 ppm. Tämän raportin tutkimuksissa ilman hiilidioksidipitoisuus pysyi



Kuva 3.2

Tutkimuksissa sisäilman suureiden arvojen seuraamiseen käytettiin Wirepasin mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmää, joka esiintyy kuvassa kantosalkkuunsa koottuna.

alle 2500 ppm:n, joten mittausrésoluutio oli 50 ppm. Lukematarkkuus Wirepasin järjestelmässä on 1 ppm. Kuvassa 3.2 voidaan nähdä kaikki Wirepas-mittausjärjestelmään kuuluvat komponentit kantosalkkuunsa koottuna. Valkoiset laitteet ovat antureita, niissä on vaihtelevasti valmiuksia eri suureiden mittaamiseen.

Wirepasin Control Panelin antamaa mittausdataa hiilidioksidipitoisuudesta, lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta prosessoitiin ja havainnollistettiin Microsoft Excel - taulukkolaskentaohjelman avulla. Taulukkolaskentaohjelmalla luotiin myös mittau tuloksista esitettävät kuvat. Käyriä piirrettäessä niitä muokattiin laskemalla käyrän arvopisteiksi liukuvan keskiarvon tulokset. Näin menetellen tiedonsiirtosignaalin voimakkuuden vaihtelusta



Kuva 3.3

Wirepasin hiilidioksidipitoisuutta mittaava anturi. Hiilidioksidimittaus vaatii korkeamman jännitteen ja anturi on muista antureista poiketen kytkettävä verkkovirtaan. Myös paristokäyttöisiä malleja hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen on nykyään saatavilla.

aiheutuvan mittauskohinan vaikutukset eivät näy käyrän jokaisessa arvossa. Käyrä on täten sileämpi ja helpommin luettavissa. Mittauskohinan vaikutukset mittaustuloksiin ovat häviävän pieniä, vain noin luokkaa 5 ppm, ja niiden aiheuttamat virheet tasoittuvat pidemmällä seurantajaksolla. Kuvassa 3.3 verkkovirtaa toimiakseen tarvitseva hiilidioksidianturi on asennettu seinään mittaamaan erään neuvotteluhuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuutta.

Tutkimuksissa käytetyt hiilidioksidi- ja lämpötila-anturit kalibroitiin vertailumenetelmällä, jossa anturit sijoitettiin vierekkäin mittaamaan ja niiden näyttämiä vertailtiin referenssimittarina toimineeseen käsimittariin TSI Airflow TA460. Wirepas-antureiden näyttämiä verrattiin käsimittarin tuloksiin eri lämpötiloissa ja erilaisilla hiilidioksidipitoisuuksilla. Wirepas-antureiden tuloksiin tehdyt korjaukset olivat verrattain pieniä. Wirepasin hiilidioksidiantureiden mittaustuloksiin tehtiin korjauksia välillä 0 ... 70 ppm ja lämpötila-antureiden mittaustuloksiin välillä 0,1 – 0,8 °C. Toisaalta mittareiden absoluuttinen tarkkuus ei ollut tässä tutkimuksessa ensiarvoisen tärkeää, koska mitatessa käytettiin aina samoja mittareita samoissa paikoissa. Näin menetellen tuloksia kootessa pystyttiin vertaamaan saman mittarin mittaamia tuloksia. Systemaattinen mittausrvirhe suuntaan tai toiseen ei siis ollut tässä tapauksessa äärimmäisen vahingollista.

## 3.2

# Käsimittari nopeaan mittaamiseen

*Käsimittaria TSI Airflow TA460 ja sen kahta mittauspäätä 964 Probe sekä 980 Probe käytettiin muiden mittareiden kalibrointiin. Sitä hyödynnettiin myös mittausten aikana hiilidioksidipitoisuuden, lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden välittömään seuraamiseen.*

Käsimittaria ja sen paine-eroantureita käytettiin lisäksi ilmanvaihdon ilmamäärien mittaamiseen. Kuvassa 3.4 oleva käsimittari antaa tulokset välittömästi mittaussiiveen ollessa hyvin lyhyt. Nopeasti toimiva käsimittari oli erittäin kätevä työkalu tilanteen välittömään tarkasteluun pidempiaikaisen mittaamisen tukena.

Varsinaisten mittaamisten lisäksi tutkimuksissa oli tarpeen käyttää myös normaalia paikan päällä tehtävää aistienvaraista havainnointia. Ihmisten lukumäärä tiloissa oli tärkeä muuttuja ilmanvaihtoratkaisujen toimivuutta arvioitaessa. Ihmisten lukumäärä todettiin tiloissa paikan päällä laskien. Mikäli tutkittavassa tilassa olevien ihmisten lukumäärä muuttui mittausten aikana, lukumäärät laskettiin ja kirjattiin ylös viiden minuutin välein.



Kuva 3.4  
Kalibroinnissa ja mittausten tukena käytetty käsimitari TSI Airflow TA460 ja sen kaksi mittauspäätä. Kuvassa keskellä hiilidioksidipitoisuuden, lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden mittauspäätä 980 Probe ja oikealla ilmavirran nopeuden mittaamiseen 964 Probe.

## 3.3

# Tutkimus- ja mittausmenetelmät

*Tämän raportin tutkimuksissa selvitettiin, voitaisiinko tilojen välistä ilmanvaihtoa hyödyntämällä tasata kuormitusta tilojen välillä ja edelleen parantaa sisäilman laatua kuormitetuissa tiloissa. Olosuhteiden tasaamisen vaikuttavuutta tilojen ilmanlaatuun tutkittiin mittauksin, havainnoin sekä laskelmin.*

Tutkimusten mittaustapahtumat pyrittiin järjestämään niin, että mittaustuloksiin vaikuttavat muuttujat, kuten tiloihin ja ilmanvaihtoon liittyvät asiat ilmanlaadun tasaamista lukuun ottamatta, pysyisivät mahdollisimman muuttumattomina. Näin menetellen pyrittiin saamaan vertailukelpoisia tuloksia nimenomaan ilmanlaadun tasaamisen aikaansaamista vaikutuksista sisäilman laatuun. Tämän tutkimuksen tutkimusasetelmana käytettiin vertailumenetelmää, jossa vertailtiin tilojen sisäilman viihtyisyyttä indikoivaa, jo aiemmin tässä raportissa esiteltyä sisäilman hiilidioksidipitoisuutta. Myös muita suureita mitattiin tulosten tueksi.

Tutkimuksen perusajatuksena oli kuormittaa tiloja ja niiden ilmanvaihtoa joko ihmisten läsnäololla tai synteettisellä hiilidioksidilla. Kun haluttiin ottaa ilmanlaadun tasaamisen vaikuttavuus vertailuun, kuormitustapahtumia järjestettiin kaksi toisiaan vastaavaa, joista toisessa olosuhteiden tasaamisen idea oli käytössä ja toisessa ei. Näitä kahta kuormitustapahtumaa vertailemalla päästäisiin selville siitä, onko tilojen välisen ilmanvaihdon käytöllä merkittävää vaikutusta sisäilman laatuun kyseisissä tapauksissa. Erilaisten ratkaisujen toimivuutta mitattiin lähinnä sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan avulla. Tässä raportissa ei pyritty muodostamaan mittaustapahtumiin erityisen tarkkoja olosuhteita, kuten laboratorio-olosuhteissa olisi mahdollista tehdä. Enemminkin ajatuksena oli tarkastella erilaisien ratkaisujen toimivuutta oikeaa käytäntöä vastaavissa tilanteissa keskittymättä liikaa vähäpätöisiin yksityiskohtiin. Kaikki olosuhteisiin ja tuloksiin merkittävästi vaikuttavat asiat ympäristössä ja tutkimusmenetelmissä otettiin kuitenkin huomioon.

## 3.4

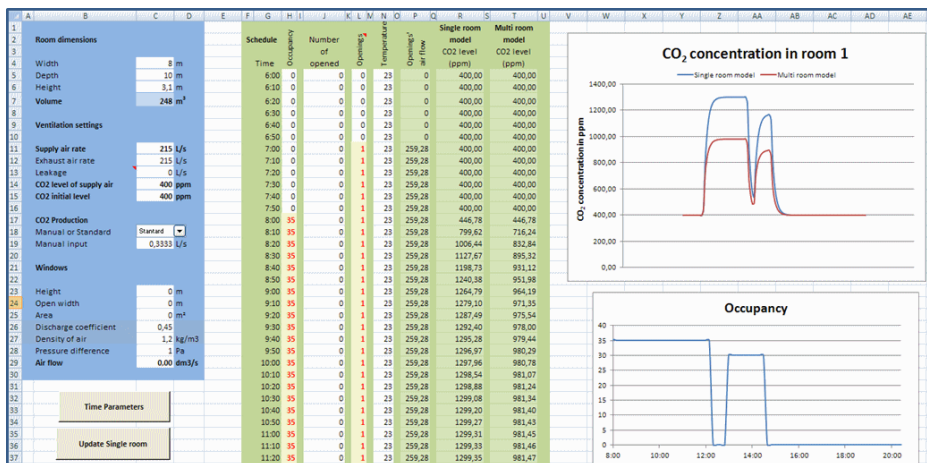
# Olosuhteiden laskennallinen tarkastelu

*Tulosten laskennalliseen tarkasteluun käytettiin Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitettyä huoneiden hiilidioksidipitoisuuden laskentamenetelmää (Kalema et al. 2013). Laskentamenetelmä perustuu hiilidioksidin massataseeseen huoneiden välillä ja se ottaa huomioon myös lämpötilaerojen vaikutuksesta tapahtuvat konvektiiviset virtaukset tilojen välillä.*

Tutkimuksissa käytetty laskentamenetelmä ottaa hiilidioksidipitoisuutta laskiessaan huomioon paitsi ikkunat ulos niin myös ilman kulkeutumisen rakennuksen sisällä tilasta toiseen tilojen välisten aukkojen, esimerkiksi ovien kautta. Laskentaohjelmaan tarvitaan lähtötiedoiksi muun muassa tilojen mitat, ilmanvaihtomäärät, lämpötilat, oleskelevien ihmisten lukumäärä ja aktiivisuus sekä tilojen välisten aukkojen koot. Kuvassa 3.5 voidaan nähdä laskentaohjelman näkymää Excel-laskentaohjelmassa.



Kuten laskentaohjelman esittelevässä julkaisussakin (Kalema, Viot 2013) laskentaohjelman antamien tulosten havaittiin myös tämän raportin tutkimuksissa olevan mittaustulosten kanssa hyvin samankaltaisia. Käytännön mittauksen tekeminen on usein työlästä ja aikaa vievää. Lisäksi käytännön mittaukset ovat usein alttiita normaaleissa käyttötilanteissa tapahtuville poikkeamille ajateltuun mittausjärjestelyyn verrattuna. Hyvin toimivan laskentaohjelman avulla sen sijaan on tehokasta vertailla erilaisia tilanteita. Lisäksi laskentaohjelmalla saadaan arvokasta tietoa jo tehtyjen mittauksen tueksi. Ohjelman käyttämiseksi tietyt lähtötiedot on oltava tiedossa eikä tarkasteltava tapaus saa olla liian monimutkainen esimerkiksi geometrian tai ilmanvaihdon kannalta.



Kuva 3.5

Näkymä Tampereen teknillisellä yliopistolla kehitetystä hiilidioksidipitoisuuden laskentamallista. Malli ottaa tilojen pitoisuuksia laskiessaan huomioon normaalin ilmanvaihdon lisäksi myös lämpötilaerojen ansiosta rakennuksen sisällä tilasta toiseen kulkeutuvan ilman vaikutuksen.



**MONITILATOIMISTON  
SISÄILMA PYSYY  
RAIKKAANA**

---

*Case Syklinki*

*Tässä luvussa käsitellään tutkimusten toimisto-olosuhteissa tehtyjä mittauksia ja havaintoja. Hippotalossa Tampereen Kalevassa tehtiin ensimmäisiä havaintoja ja mittauksia raportissa käsiteltävän tilojen välisten ilmanvaihdon hyödyntämisen tehokkuudesta. Voidaankin sanoa, että tässä neljännessä luvussa esitetään tapahtumat, joista tämän raportin tarina sai alkunsa. Syntyi ajatus tilojen välisen olosuhteiden tasaamisen tehokkuuden tutkimisesta.*

## 4.1

# Tampereen Hippotalo ja monitilatoimisto Syklinki

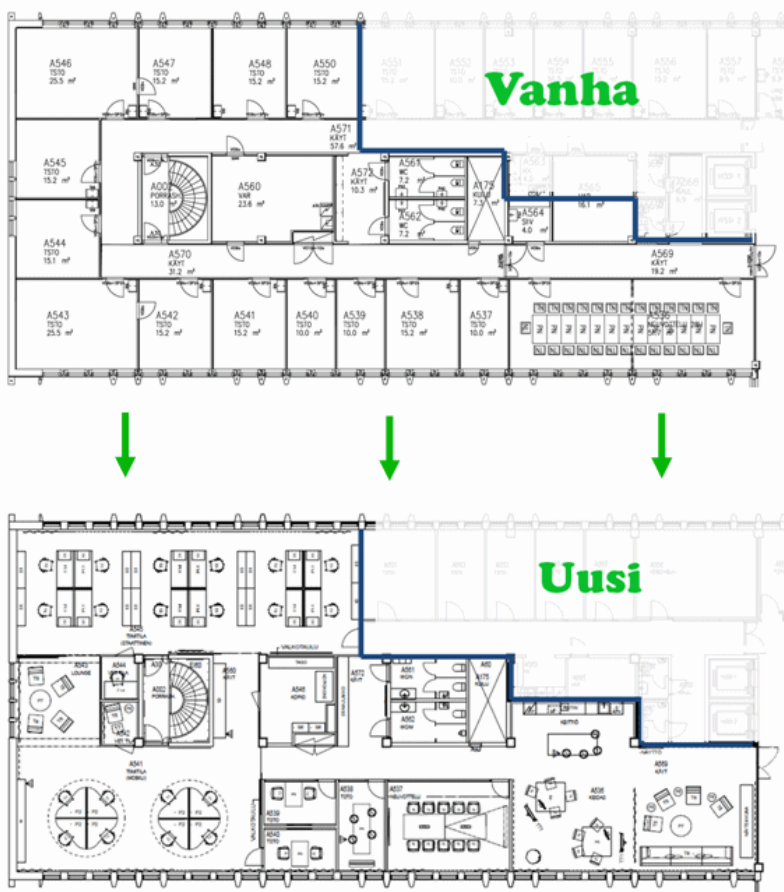
*Tässä raportissa tutkittu toimistoympäristö on Suomen Yliopistokiinteistöjen käytössä oleva monitilatoimisto valtion virastotalo Hippotalossa Tampereen Kalevassa. Tila on muutettu koptikonttorista monitilatoimistoksi vuonna 2010, ja sitä kutsutaan nimellä Syklinki.*

Toimistoa käyttävä Suomen Yliopistokiinteistöt on kiinteistöalan yritys, joka omistaa, rakennuttaa ja vuokraa tiloja pääasiassa yliopistojen ja ammattikorkeakoulujen tarpeisiin pääkaupunkiseudun ulkopuolella. Kuvassa 4.1. esiintyvän Hippotalon omistaa Senaatti-kiinteistöt ja se valmistui vuonna 1980. Hippotalossa on pääasiassa toimistotilaa ja alemmissa kerroksissa muun muassa ravintola-, harraste- ja pukuhuonetiloja. Maanpäällisiä kerroksia Hippotalossa on seitsemän. Suomen Yliopistokiinteistöt Oy remontoi loppuvuodesta 2010 vanhasta koptikonttorista itselleen 400 neliömetrin monitilatoimiston Hippotalon pohjoissiiven viidenteen kerrokseen. Uusi toimisto sai nimekseen Syklinki ja siellä työskentelee päivittäin noin 20 ihmistä. Lisäksi ulkopuolisia vierailijoita käy runsaasti erilaisissa tapaamisissa. Erillisten



Kuva 4.1

Tampereen Kalevassa sijaitseva ja Senaatti-kiinteistöjen omistama Hippotalo on ehtinyt hieman yli 30 vuoden ikään. Hippotalossa tutkittiin toimistotilojen sisäilman laatua ja tehtyjen havaintojen kautta syntyi ajatus tilojen välisestä olosuhteiden tasaamisesta ja ilmanvaihdosta.



Kuva 4.2

Monitilatoimisto Syklingin pohjapiirros ennen ja jälkeen remontin. Vanhanaikainen koppikonttori muutettiin paremmin tuottavaksi ja viihtyisemmäksi monitilatoimistoksi loppuvuodesta 2010. Syklingin lattiapinta-ala on kokonaisuudessaan noin 400 neliometriä.

huoneiden sijaan päädyttiin monitilaratkaisuun, koska tilojen haluttiin kuvastavan yrityksen arvoja vuorovaikutteisuudesta ja avoimuudesta. Monitilatoimiston on myös käytössä huomattu parantaneen organisaation sisäistä tiedonkulkua sekä työn tuottavuutta. Tätä työtä ajatellen monitilatoimisto oli myös mielenkiintoinen ympäristö sisäilman laadun vertailuun erilaisissa tiloissa. Kuvan 4.2 uusi ja vanha pohjapiirros sekä monikäyttöisestä sisääntuloaulasta nimeltään Lounge otettu kuva 4.3 kertovat Syklingistä lisää.



Kuva 4.3

Syklingin sisääntuloaula Loungea käytetään pääsääntöisesti taukotilana. Verhoin ja liikuteltavin kalustein varustettu tila voidaan kuitenkin nopeasti järjestellä vaikkapa 35 osallistujan luentotilaksi. (Kuva: Kimmo Torkkeli)

## 4.2

# Avarissa tiloissa koko toimiston ilmanvaihto hyödynnetään tehokkaasti

*Vanhaa rakennusta remontoitaessa nousee usein haasteeksi ilmanvaihtojärjestelmän päivittämiseen liittyvät ongelmat. Näin myös Syklingin tapauksessa, jossa Hippostalon vanha ilmanvaihtojärjestelmä ei järkevällä tavalla taipunut siihen, että pelkästään Syklingin ilmanvaihtoon olisi tehty merkittäviä muutoksia. Päätettiin seurata, millainen on uuden monitilatoimiston ilmanlaatu.*

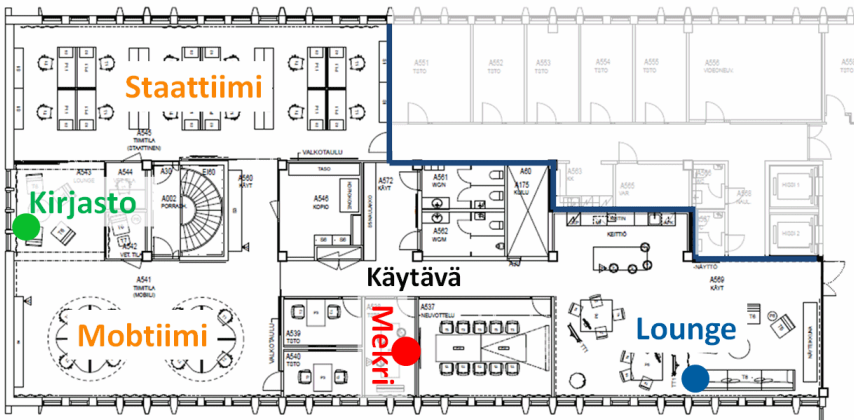
Myös Syklingin tapauksessa Hippostalon vanha ilmanvaihtojärjestelmä ei taipunut siihen, että pelkästään Syklingin ilmanvaihtoon olisi tehty merkittäviä muutoksia. Niinpä ilmanvaihto jäi pääpiirteissään vanhalle tasolle. Koska toimiston tilatehokkuus parani remontin ansiosta, pelättiin vanhalle tasolle jäävän ilmanvaihdon aiheuttavan ongelmia sisäilman laatuun. Syklingin sisäilman laadun seuraamiseksi tiloihin hankittiin edellisessä luvussa esitelty Wirepas-mittausjärjestelmä. Päätettiin mittaamalla seurata, millaiseksi ilmanlaatu uudistetuissa tiloissa uudenaikaisella käytöllä muodostuu.

Käyttäjien kokemus uusista tiloista työpaikkana oli hyvin positiivinen. Myös monitilaratkaisuun ennen sen toteuttamista epäillen

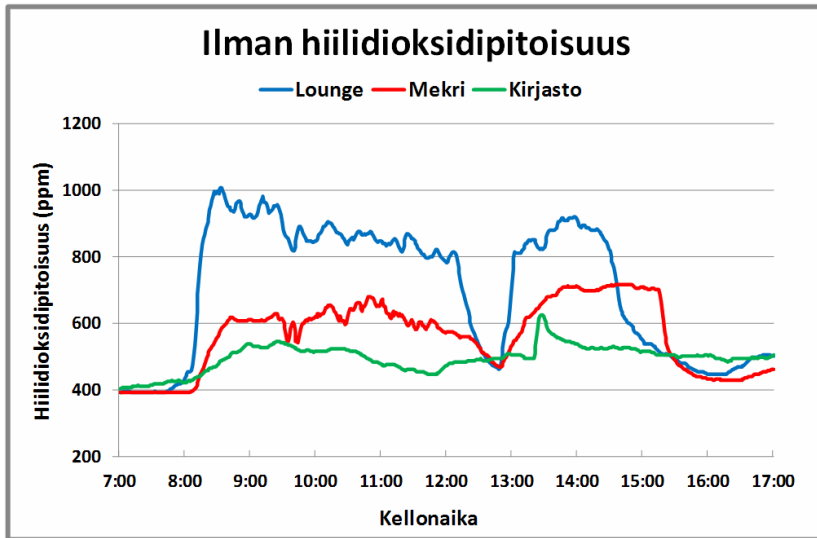


suhtautuneet myönsivät ratkaisun olevan suuri positiivinen yllätys. Ilmanlaadussakaan ei koettu olevan ongelmaa. Ilmanlaadun jatkuvan mittauksen lisäksi joitain Syklingin käyttötilanteita päätettiin seurata ja dokumentoida tarkemmin luotettavien tulosten saamiseksi.

Vaikka Syklingin tilavuudeltaan suurien tiloihin, Loungeen (lattian pinta-ala 85 m<sup>2</sup>) sekä varsinaisiin työtiloihin Mobtiin (72 m<sup>2</sup>) ja Staattiimiin (100 m<sup>2</sup>) kokoontuu ajoittain runsaasti ihmisiä, koettiin ilmanlaadun pysyvän hyvänä kyseisissä tiloissa. Jotta saataisiin selville, oliko kyseessä ainoastaan aistinvarainen tuntemus hyvistä olosuhteista, seurattiin Loungeen hiilidioksidipitoisuutta tilaisuudessa, jonka aikana Loungeessa oli 35 ihmistä. Loungeen lisäksi hiilidioksidimittaus tehtiin kokoontumisen aikana myös Kirjastossa ja Mekrissä. Toimiston muut tilat olivat normaalissa käytössä, eli Staattiimissä ja Mobtiinissä työskenteli Loungeen kokouksen aikana yhteensä noin 15 ihmistä. Kyseiselle alueelle tuodaan koneellisesti ilmaa yhteensä 240 litraa sekunnissa, eli 16L/s henkilöä kohden. Lattiapinta-alaa alueella on noin 227 m<sup>2</sup>, eli 15 ihmisellä Loungeen käytävyyhteudessa olevien työskentelytiloissa oli tilaa noin 15 m<sup>2</sup> per henkilö. Sekä ilmanvaihtoa että tilatehokkuutta voidaan pitää normaaleina. Kuvassa 4.4. Syklingin pohjapiirrokseseen on merkitty mittareiden paikat sekä Loungeen mittauksen kannalta oleellisten tilojen nimet.



Kuva 4.4  
Monitilatoimisto Syklingin pohjapiirros, johon on palloilla merkitty olosuhdemittauksiin käytettyjen hiilidioksidiantureiden sekä myös tilojen nimet.

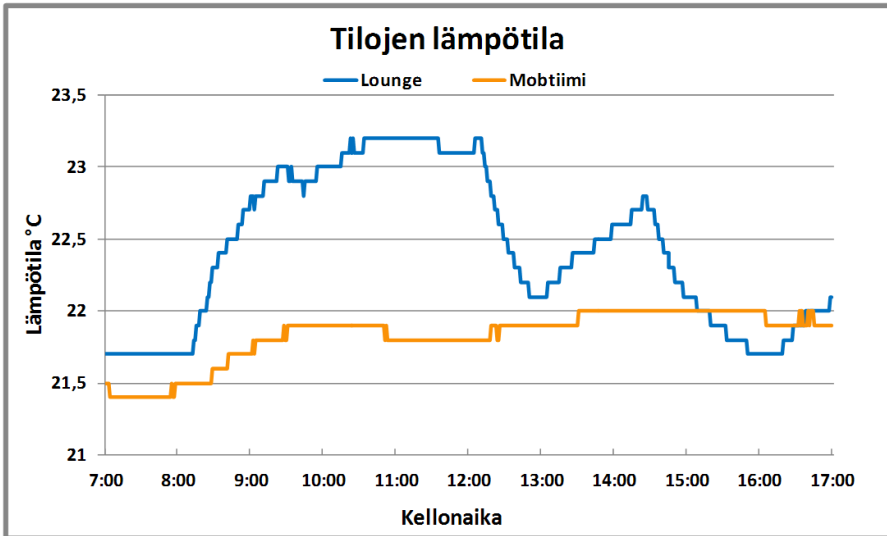


Kuva 4.5

Ilman hiilidioksidipitoisuus eri puolilla Syklinkiä Loungea 35 henkilön kokoontumisen aikana. Yllättävää oli nähdä, että Loungea ollessa täynnä ihmisiä myös Mekrin ja Kirjaston hiilidioksidipitoisuuden perustaso kohoaa muihin päiviin verrattuna. Avarassa toimistossa koko toimiston ilmanvaihto osallistuu Loungeen tulevan kuormituksen tasaamiseen! Mekrin käyrä on iltapäivän osalta poistettu kuvaajasta, koska Mekrissä oli iltapäivällä oma tapaamisensa suljettu ovin.

Kun Lounge on niin sanotussa normaalissa käytössä, eli taukotilana noin 15 ihmiselle, on sen sisäilman hiilidioksidipitoisuus pysytellyt toimistopäivien aikana arvoissa 400 - 600 ppm. Tässä mittauksessa Loungea kuormitettiin kuitenkin 35 ihmisellä, jolloin CO<sub>2</sub>-pitoisuus nousi huomattavasti normaalia korkeammalle tasolle. Tilaisuus Loungeessa alkoi aamulla klo 8:00. Kello 12:10 - 13:00 välisenä aikana pidettiin ruokatauko, jonka jälkeen tilaisuutta jatkettiin 30 ihmisen voimin kello 14:30 saakka.

Kuva 4.5. esittää hiilidioksidipitoisuudet kolmessa mitatussa tilassa eri puolilla toimistoa; Loungeessa, Mekrissä ja Kirjastossa. Kuva 4.6 näyttää mitatut lämpötilat Loungeessa ja Mobtiimissä vastaavana ajankohtana. Mekrin ja Kirjaston ovet olivat auki. Poikkeuksena tähän Mekrissä oli iltapäivällä oma tilaisuus, joka voidaan nähdä aamupäivää



Kuva 4.6

Loungen lämpötila nousee kun siellä on runsaasti ihmisiä, tässä tapauksessa 35 henkilöä. Tällöin muihin tiloihin, esimerkiksi toimiston perällä sijaitsevaan Mobtiimiin verrattuna lämpötilaeroa muodostuu reilun asteen verran.

korkeampana hiilidioksidipitoisuutena. Kuvasta voidaan selvästi nähdä suuren ihmisjoukon läsnäolo Loungeessa. Myös ruokatunti voidaan kaaviosta paikantaa Loungen hiilidioksidipitoisuuden laskuna. Mittaustuloksia pitkältä aikaväliltä tarkasteltaessa oli yllättävää nähdä, että myös Mekrin ja Kirjaston hiilidioksidipitoisuuden käyttäytyminen poikkesi Loungen suuren kuormituksen päivänä normaaleista päivistä selvästi. Loungen ollessa täynnä ihmisiä myös Mekrin ja Kirjaston sisäilman hiilidioksidipitoisuuden perustaso kohosi. Ilma siis kiertää käytävän kautta toimiston perällä olevista tiimitiloista Loungeen ja takaisin muihin tiloihin. Hiilidioksidipitoisuus jakautuu tehokkaasti avaran toimiston tiloihin ja näin ollen koko toimiston ilmanvaihto osallistuu Loungeen aiheutuvan kuormituksen hoitamiseen!

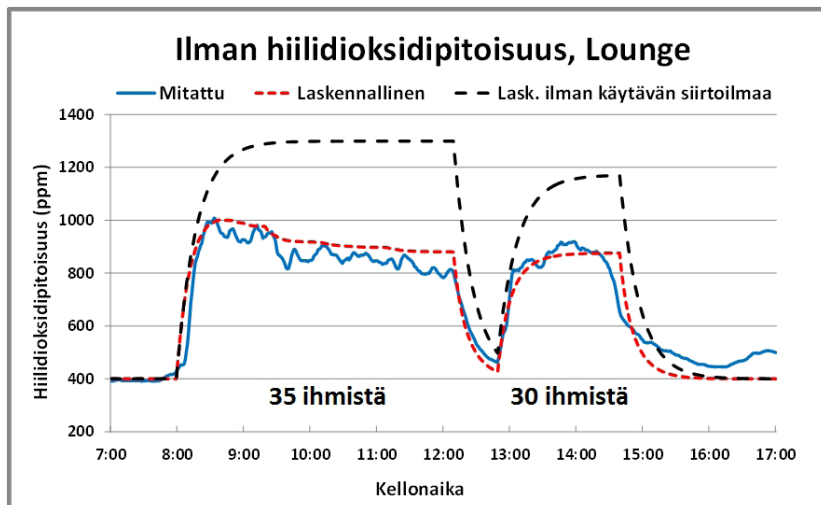
Kuten kuvasta 4.4 voitiin nähdä, Loungen takaosasta lähtevä noin kaksitoista metriä pitkä käytävä yhdistää Loungen muihin toimiston tiloihin. Ja tilojen yhdistymisen toisiinsa huomattiin siis tapahtuvan myös ilmanvaihdon näkökulmasta. Tiloihin epätasaisesti jakautuvasta kuormituksesta Loungen ja muiden tilojen välille syntyvä lämpötilaero, joka voitiin nähdä mitattuna kuvassa 4.6, saa aikaan ilman liikettä, joka vaihtaa ilmaa käytävää pitkin. Vaikka Loungea ei ole ilmanvaihdon kannalta suunniteltu näin suuren ihmismäärän kokoontumispaikaksi, tämä lämpötilaerojen aikaansaama ilman vaihtuminen yhdessä koneellisen ilmanvaihdon kanssa mahdollistavat ilmanlaadun pysymisen hyvällä tasolla jopa 35 osallistujan tapaamisissa!

Käytävän avulla tapahtuvan ilmanlaadun tasaantumisen vaikuttavuutta tutkittiin laskennallisesti edellisessä luvussa esitetyn Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitetyn hiilidioksidipitoisuuden laskentaohjelman avulla. Laskennan avulla mallinnettiin kaksi tilannetta, joista ensimmäinen rakennettiin mahdollisimman samankaltaiseksi kuin tilanne oikeastikin oli. Toinen laskennallinen tilanne järjestettiin niin, että Lounge olisi vain yksittäinen suljettu tila, josta ei ole suoraa ilmayhteyttä muihin tiloihin. Niinpä tässä toisessa laskentatapauksessa käytävän kautta tapahtuva olosuhteiden tasaantuminen ei vaikuta tilanteeseen. Tällöin Loungen ilmanvaihdesta huolehtii ainoastaan Loungen koneellinen ilmanvaihto suuruudeltaan 215 L/s.

Kuva 4.7 näyttää tulokset mitatuista pitoisuuksista sekä kahdesta laskennallisesta tapauksesta. Tuloksista voidaan huomata, että kyseessä olevilla henkilömäärillä hiilidioksidipitoisuus olisi vailla ilmanlaadun tasaantumista noussut huomattavasti toteutuneita korkeammalle. Laskennan perusteella 35 henkilöllä olisi noustu ensimmäisen puolen tunnin aikana yli 1200 ppm:n ja päädytty noin arvoon 1300 ppm. 30 ihmisen läsnäollessa hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvoksi olisi tullut hieman vajaa 1200 ppm. Tilojen välisten olosuhteiden tasaantumisessa oleellisessa osassa on tilojen välille muodostuva lämpötilaero. Koska Loungen ja muiden tilojen välinen lämpötilaero kasvoi (kuva 4.6) tapaamisen aikana, käytävän kautta kulkeutuvan ilman määrä lisääntyi,

ja edelleen hiilidioksidipitoisuus alkoi laskea saavutettuaan ensin tietyn arvon. Kasvavan lämpötilaeron aiheuttama hiilidioksidipitoisuuden lasku voidaan nähdä etenkin aamupäivän osalta.

Klo 9:20 voidaan nähdä Loungein mitatussa hiilidioksidipitoisuudessa porrasmainen noin 100 ppm:n lasku. Tämä lasku aiheutui siitä, että käytävän varrella sijainneen neuvotteluhuoneen ikkuna avattiin raolleen. Laskentamallissa tämä otettiin myös huomioon, koska Loungesta oli neuvotteluhuoneen avoimen oven kautta ilmayhteys Loungeen. Kuvasta 4.7 voidaan nähdä, että laskentamalli reagoi ikkunan avaamiseen hieman mittausta hitaammin.

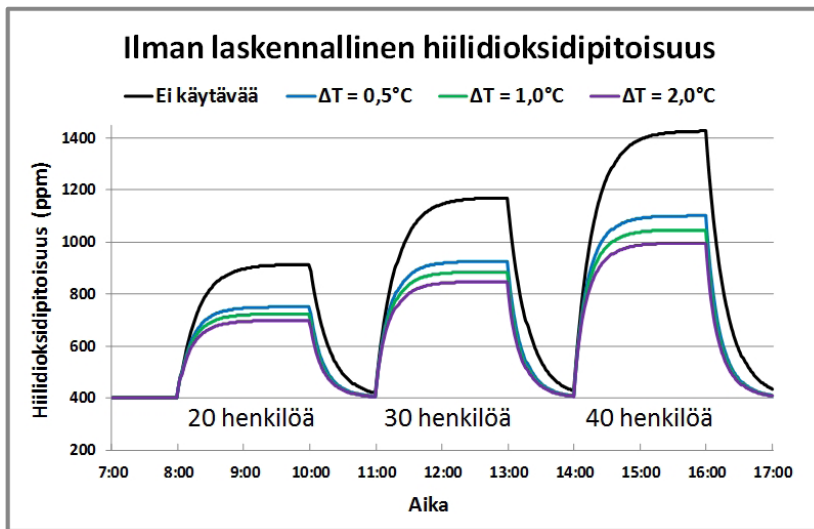


Kuva 4.7

Mittausten lisäksi selvitetiin laskennallisesti, miten Loungein CO<sub>2</sub>-pitoisuus olisi kehittynyt kokoontumisen aikana, jos Lounge ei olisi pystynyt käytävän avulla hyödyntämään raikasta ilmaa toimiston vähemmän kuormitetuista tiloista. Tiloista toisiin siirtyvällä sisäilmalla on merkittävä vaikutus sisäilman laatuun!

Olosuhteiden tasaamiseen osallistuvien tilojen väliset lämpötilaerot siis vaikuttavat olosuhteiden tasaamisen tehokkuuteen. Päätettiin laskennallisesti määrittää, miten Loungen hiilidioksidipitoisuus käyttäytyy erilaisilla lämpötilaeroilla ja henkilömäärillä. Lämpötilan suhteen kokeiltiin puolen, yhden ja kahden asteen lämpötilaeroja tilojen välillä. Loungea kuormitettiin laskennassa kuvitteellisilla työpäivillä klo 8:00 – 16:00 välisenä aikana. Päiviin hahmoteltiin olevan kolme kahden tunnin tapaamista henkilömäärillä 20, 30 sekä 40. Tapaamisten väliin laitettiin tunnin tauot, joiden aikana tilan ajateltiin tyhjentävän ihmisistä.

Kuvasta 4.8 nähdään laskennasta saadut tulokset. Hiilidioksidipitoisuuden käyrästä voidaan selvästi erottaa korkeimmalle kohoava musta käyrä, jossa Lounge on yksittäinen, muista tiloista seinin



Kuva 4.8

Loungen sisäilman laskennalliset hiilidioksidipitoisuudet erilaisilla lämpötilaeroilla ja henkilömäärillä. Selvästi korkeimmalle nouseva musta käyrä kuvaa tapausta, jossa olosuhteiden tasaantumista käytävän kautta ei tapahdu, eli ainoastaan koneellinen ilmanvaihto huolehtii Loungen ilmanvaihdesta. Erot eri lämpötilaerojen vaikuttavuuksissa ovat yllättävän pienet ja jo pienikin lämpötilaero saa aikaan suuren ilmavirran.

eristetty tila, jossa ilmanlaadusta huolehtii ainoastaan koneellinen ilmanvaihto suuruudeltaan 215 L/s. Ilmayhteyden avautuessa jo puolen asteen lämpötilaero aikaansaa Loungen ja muiden tilojen välille ilmanvaihtuvuutta 140 L/s. Lämpötilaeron kasvaessa ilman vaihtuminen tilojen välillä tehostuu edelleen ja Loungen hiilidioksidipitoisuus pysyy yhä alempana. Yhden asteen lämpötilaero aiheuttaa edestakaisen 200 L/s ilmavirran, eli ilmanvaihtuvuus lähes kaksinkertaistuu verrattuna pelkästään koneellisen ilmanvaihdon tilanteeseen. Kahdella asteella saadaan aikaan ilmanvaihtuvuutta jo 280 L/s ja hiilidioksidipitoisuus pysyy 40 henkilölläkin tasossa 1000 ppm. Kuvana 4.9 nähdään valokuva Loungesta ja käytävästä, joka yhdistää Loungen toimiston muihin tiloihin.



Kuva 4.9

Loungen (harmaa lattia) perältä lähtevä käytävä (keltainen lattia) yhdistää Loungen muihin toimiston tiloihin. Toimiston muista tiloista käytävyyhteyden kautta tapahtuvan ilmanlaadun tasaantuminen mahdollistaa ilmanlaadun pysymisen hyvällä tasolla jopa 35 ihmisen tapaamisissa, vaikka Loungea ei ole ilmanvaihdon näkökulmasta suunniteltu niin suurelle ihmismäärälle!

## 4.3

# Neuvotteluhuoneiden ilmanlaatu koettiin ajoittain huonoksi

*Runsaasti käytetyissä Syklingin neuvotteluhuoneissa, Mekrissä ja Seilissä, huomattiin kuitenkin ilmanlaatuun liittyviä ongelmia pian tilojen käyttöönoton jälkeen. Käyttäjät kokivat neuvotteluhuoneiden ilman tunkkaiseksi etenkin pitkien kokousten aikana. Neuvotteluhuoneiden tilanne otettiin tarkempaan tarkasteluun ja Merkissä saatuja tuloksia esitetään tässä raportissa.*

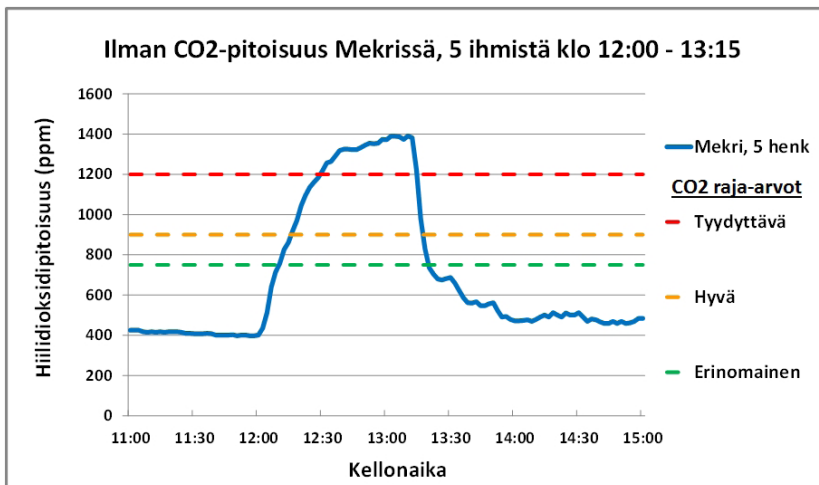
Mekri on pieni neuvotteluhuone, jossa on paikat korkeintaan kuudelle. Mekrin lattian pinta-ala on 11 neliometriä. Mekrissä on sekoittava ilmanjakotapa ja ilmamäärät ovat 30 litraa sekunnissa sekä tulo- että poistoilmaa. Kuvassa 4.10 Mekri esittäytyy viereisestä käytävästä kuvattuna. Käytävän puoleiset lasiseinät tekevät tilasta kokoistaan avaramman.





Kuva 4.10

Kun neuvotteluhuone Mekrissä pidettiin pitkiä 4-6 osallistujan palavereita, huomattiin ilmanlaadun heikkenevän ja ilma koettiin tunkkaiseksi. Koneellinen ilmanvaihto (30 L/s) todettiin tämän tilan osalta riittämättömäksi pitämään jatkuvasti yllä laadukkaita sisäilmaolosuhteita.



Kuva 4.11

Käyttäjien kokemus Mekrin sisäilman tunkkaisuus todettiin pian myös mittauksin. Kyseisenä päivänä Mekrissä pidettiin 5 osallistujan palaveri klo 12:00 – 13:15 välisenä aikana. CO<sub>2</sub>-taso nousi 30 minuutissa tyydyttävänä pidetyn 1200 ppm:n yläpuolelle ja edelleen aina lähelle 1400 ppm:ää.

Vallitsevien olosuhteiden selvittämiseksi Syklingin toimistoon asennettiin aiemmin tässä raportissa esitelty Wirepas-mittausjärjestelmä mittaamaan ja valvomaan toimiston olosuhteita jatkuvasti. Myös neuvotteluhuone Mekriin asennettiin mittaukset sisäilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta ja hiilidioksidipitoisuudesta sekä valaistusvoimakkuudesta ja läsnäolosta. Wirepas-mittausjärjestelmän antureita oli lisäksi mahdollista liikutella halutun mittausasetelman järjestämiseksi.

Käyttäjien kokemusten lisäksi myös mittaukset osoittivat Mekrin ilman olevan hetkittäin tunkkaista, sillä ilman hiilidioksidipitoisuus nousi palavereiden aikana yli tyydyttävänä pidetyn 1200 ppm:n tason. Noin 1000 ppm:n tasossa tilassa olleet ihmiset huomasivat ilman olevan tunkkaista. Kuva 4.11 esittää Mekrin sisäilman hiilidioksidipitoisuuden eräänä arkipäivänä klo 11:00 ja 15:00 välisenä aikana. Tuona päivänä Mekrissä pidettiin 5 henkilön palaveri klo 12:00 – 13:15 ja tuon palaverin aikaansaama nousu hiilidioksidipitoisuudessa on selvästi nähtävissä kuvassa 4.11.

## 4.4

# Neuvotteluhuoneiden oven avaaminen paransi ilmanlaadun

*Tapaamisia Mekrissä pidettäessä huomattiin, että oven avaaminen raikastaa erittäin tehokkaasti Mekrin sisäilmaa. Pian muodostuikin tavaksi, että aina kun mahdollista, Mekrin ovi käytävään pidettiin auki tai avattiin tarpeen mukaan. Hyvien kokemusten lisäksi päätettiin mittauksin selvittää, onko oven avaamisella todella vaikutusta huoneilman mitattaviin suureisiin vai oliko tilan raikastuminen vain käyttäjien kokema tuntemus. Kuinka oven avaaminen vaikuttaa Mekrin sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen, lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen?*

Näihin kysymyksiin vastauksen saamiseksi Mekrissä järjestettiin kaksi tuntia kestänyt viiden ihmisen palaveri. Palaveri aloitettiin klo 12:00 ja päätettiin klo 14:00. Palaverin alussa ovet ja ikkunat pidettiin suljettuina. Puolen tunnin kuluttua palaverin aloittamisesta ilma tuntui jo tunkkaiselta ja 45 minuutin kohdalla klo 12:45 ovi viereiseen käytävään avattiin kokonaan auki. Neuvotteluhuoneen ilman tunnettiin välittömästi

raikastuvan ja viilenevän. Palaveria jatkettiin normaalisti klo 14:00 asti pitäen kuitenkin ovi käytävään avoinna.

Kuvasta 4.12 nähdään Mekrin sisäilman hiilidioksidipitoisuusmittausten tulokset kyseisen palaverin aikana. Hiilidioksidipitoisuus nousee palaverin alussa nopeasti oven ollessa kiinni. Sisäilma tunnettiin raskaaksi hengittää noin 20 minuuttia palaverin aloittamisen jälkeen. Tuolloin pitoisuus oli ehtinyt nousta noin 1000 ppm:ään. Ovea pidettiin vielä hetki kiinni kunnes se avattiin klo 12:45. Oven avaamiseen mennessä hiilidioksidipitoisuus oli ehtinyt nousta jo noin 1250 ppm:ään. Välittömästi oven avaamisen jälkeen ilman huomattiin raikastuvan ja viilenevän.

*Palaverin aikaisella oven avaamisella viereiseen käytävään todettiin siis myös mittausten perusteella olevan varsin merkittävä*

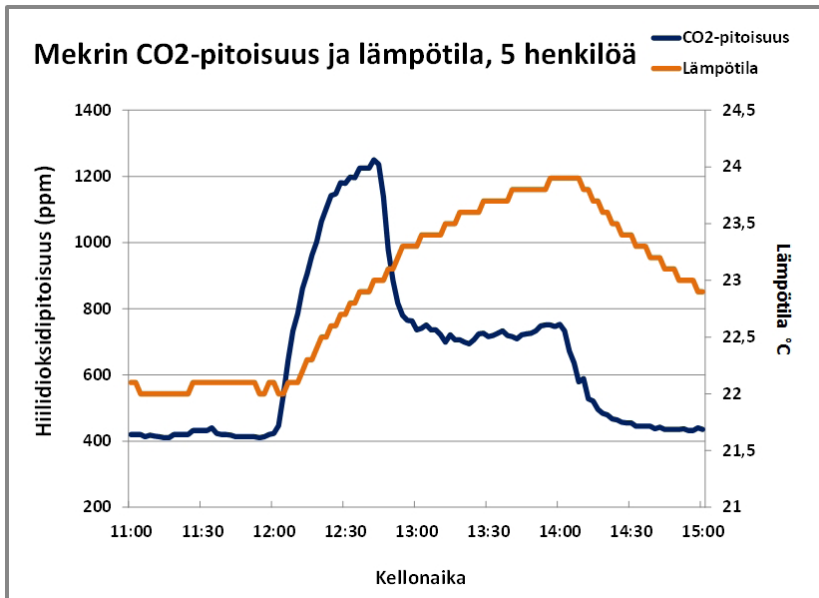


Kuva 4.12

Oven avaamisen tehokkuutta testattiin mittaamalla Mekrin CO<sub>2</sub>-pitoisuutta kaksi tuntia kestäneen viiden ihmisen palaverin aikana. 1) Palaveri alkoi klo 12:00 ja ovi suljettiin. 2) Ilman koettiin tunkkaiseksi noin klo 12:20 alkaen. 3) Ovi avattiin klo 12:45 ja palaveria jatkettiin normaalisti. 4) Klo 14:00 palaveri päättyi ja ihmiset poistuvat tilasta. Oven avaamisen jälkeen ilman tunnettiin huomattavasti raikastuvan ja myös mittaus osoittaa hiilidioksidipitoisuuden romahtavan!

positiivinen vaikutus Mekrin sisäilman laatuun. Oven avaaminen laski CO<sub>2</sub>-pitoisuuden huomattavasti alhaisemmalle tasolle verrattuna tilanteeseen, jossa ovi olisi pidetty kiinni. Oven ollessa suljettuna nousiinkin nopeasti yli 1200 ppm:n. Sen sijaan oven ollessa avoinna 5 henkilöä pystyi pitämään palaveria Mekrissä hiilidioksidipitoisuuden pysyessä erinomaisena pidetyllä 750 ppm:n tasolla.

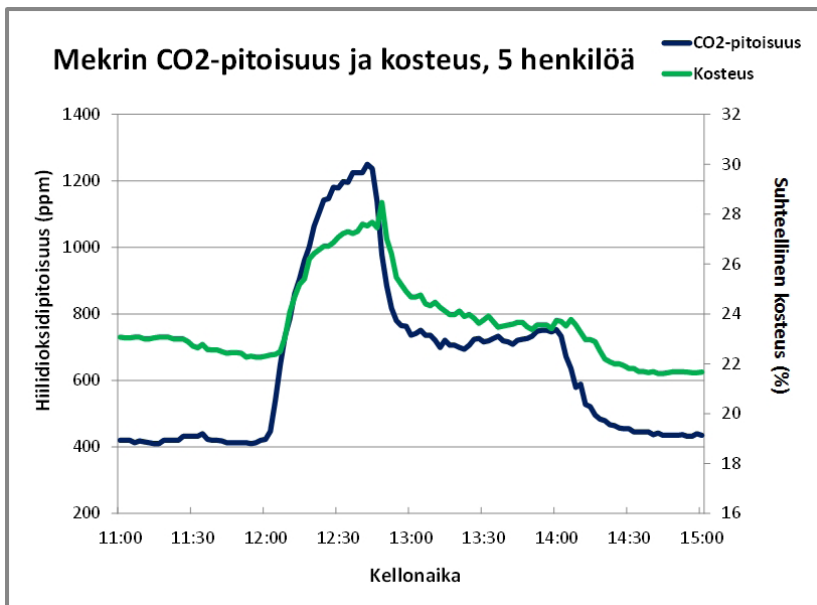
Lämpötiloihin liittyen huomionarvoista on, että vaikka Merissä olijat tunsivat ilman raikastuvan ja viilenevän ovi avattaessa, ei tämä koettu viileneminen näy mitatuissa lämpötiloissa. Sen sijaan Mekrin lämpötila jatkoi nousuaan koko palaverin ajan. Oven avaamisen voidaan nähdä vain hieman hidastaneen lämpötilan nousunopeutta klo 12:45 alkaen. Käytävän lämpötila ei muuttunut palaverin aikana ja se pysyi koko ajan vakaasti noin 22 asteessa. Kuva 4.13 osoittaa samassa kuvaajassa lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden kehityksen palaverin aikana.



Kuva 4.13

Edellisen kuvan kanssa samassa palaverissa mitattiin myös Mekrin sisäilman lämpötila tapaamisen ajan. Tässä kuvassa on esitetty lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden käyrät. Tilassa olleet ihmiset kokivat Mekrin ilman raikastuvan ja viilenevän merkittävästi kun ovi avattiin klo 12:45. Hämmästyttävää on, että mittausten mukaan lämpötila kuitenkin nousi vakaasti koko palaverin ajan!

Hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan lisäksi palaverin aikana mitattiin ilman suhteellisen kosteuden arvoja. Suhteellisen kosteuden huomattiin käyttäytyvän hyvin samankaltaisesti kuin hiilidioksidipitoisuuden. Se reagoi nopeasti ihmisten läsnäoloon sekä oven avaamiseen. Suhteellisessa kosteudessa tapahtuvat muutokset olivat kuitenkin huomattavasti maltillisemmat, noin 5 prosenttiyksikön luokkaa. Hiilidioksidipitoisuuden ja suhteellisen kosteuden samankaltaisen käyttäytymisen voidaan nähdä aiheutuvan siitä, että neuvotteluhuoneessa sekä hiilidioksidin että kosteuden merkittävimmät lähteet lyhyellä aikavälillä ovat nimenomaan ihmiset. Kuva 4.14 esittää samassa kuvaajassa hiilidioksidipitoisuuden ja suhteellisen kosteuden arvot neuvotteluhuone Mekrissä pidetyn viiden osallistujan palaverin aikana.



Kuva 4.14

Tässä kuvassa vertaillaan hiilidioksidipitoisuuden ja suhteellisen kosteuden muutoksia samassa palaverissa. Myös sisäilman suhteellinen kosteus reagoi nopeasti ihmisten läsnäoloon ja sen voidaan nähdä käyttäytyvän hyvin hiilidioksidipitoisuuden kaltaisesti. Suhteellisessa kosteudessa tapahtuvat muutokset ovat kuitenkin huomattavasti hiilidioksidipitoisuutta pienemmät.

## 4.5

# Miksi oven avaaminen toimii niin hyvin?

*Oven avaaminen oli siis koettu ja mittaustulosten perusteella myös todettu hyvin tehokkaaksi ilmanlaadun parantajaksi. Heräsi kysymys, miten on mahdollista, että oven avaaminen vaikuttaa olevan koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtoa tehokkaampi tapa pitää tilan ilmanlaatu hyvällä tasolla?*

Mekrin ja käytävän välille mitattiin syntyvän pieni, noin 0,5 – 2,0 asteen lämpötilaero palavereiden aikana, joten lämpötilaerojen aikaansaamilla konvektiivisilla virtauksilla ajateltiin olevan vaikutusta asiaan. Kuitenkin, lämpötilaerot tilojen välillä olivat sen verran pienet, että muitakin syitä Merkin hiilidioksidipitoisuuden laskuun saattoi olla olemassa.

Päätettiin selvittää, olisiko diffuusiolla eli pitoisuuserojen tasoittumisella vaikutusta asiaan. Diffuusion vaikutuksen ajateltiin periaatteessa olevan mahdollista, koska pitoisuuserot olivat lyhyellä matkalla merkittävän suuret. Mekriin järjestettiin kaksi tuntia kestänyt kuuden ihmisen palaveri. Lämpötila ja hiilidioksidimittareita asennettiin edellisistä mittauksista poiketen myös käytävään. Käytävässä mittareita asennettiin ylös ja alas, jotta pitoisuuden merkittävimäksi laskijaksi

arvioitujen konvektiivisten virtausten merkitys saataisiin selville. Kuva 4.15 näyttää mittareiden asennuspaikat käytävässä. Mikäli hiilidioksidipitoisuus Mekrissä laskee pääasiassa diffuusion avulla, nähdään Mekrin ovi avattaessa hiilidioksidipitoisuuden muutosta yhtä lailla alhaalla kuin ylhäällä.

Mekrissä pidetyn kahden tunnin pituisen kuuden henkilön palaverin aikana ovi avattiin kaksi kertaa. Jälleen hiilidioksidipitoisuus Mekrin sisällä laski nopeasti molemmilla oven avauskerroilla. Molemmilla kerroilla saatiin myös selvä ja samansuuntainen tulos, jossa käytävän yläosissa ollut hiilidioksidimittari reagoi voimakkaasti Mekrin oven avaamiseen. Alhaalla oleva mittari taas ei juuri huomannut oven

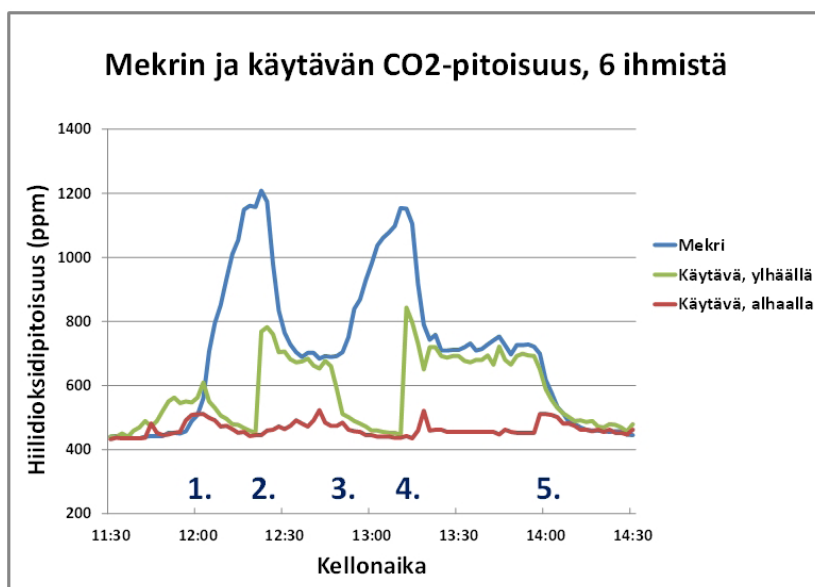


Kuva 4.15  
Mekrin viereisen käytävän ylä- ja alaosaan asennettiin hiilidioksidi- ja lämpömittarit, kun haluttiin selvittää, miten CO<sub>2</sub>-pitoisuus ja lämpötila muuttuvat käytävässä Mekrissä pidettävän palaverin aikana.



avaamista. Näiden mittaustulosten perusteella voitiin päätellä, että oven avaamisen tehokkuus perustuu viereisten tilojen välisiin lämpötilaeroihin ja lämpötilaerojen aiheuttamiin konvektiivisiin virtauksiin. Diffuusiolla ei sen sijaan nähty olevan merkittävää roolia. Tätä selittää myös se, että hiilidioksidin diffusiviteetti ilmassa on verrattain alhainen 16 mm<sup>2</sup>/s eivätkä hiilidioksidipitoisuuserot tasoitu pitkiä matkoja ilmassa diffuusion avulla.

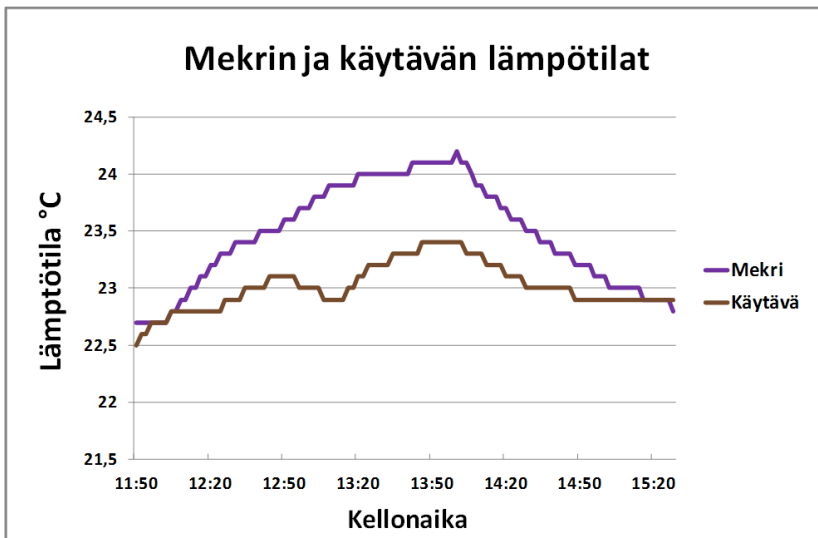
Kuva 4.16 esittää tämän mittausjärjestelyn tulokset hiilidioksidipitoisuuden osalta. Kuuden osallistujan palaveri Mekrissä alkoi klo 12:05 (kuvassa numero 1.) ja ovi käytävään suljettiin. Klo 12:23 (2.) ovi avattiin ja klo 12:50 (3.) se suljettiin. Klo 13:14 (4.) ovi jälleen avattiin ja ovea pidettiin avoinna palaverin loppuun klo 13:58 (5.) asti. Kuva 4.17 näyttää Mekrin ja käytävän yläosan lämpötilat palaverin aikana.



Kuva 4.16

Ovi käytävään avatessa Mekrin CO<sub>2</sub>-pitoisuus laskee taas nopeasti. Käytävässä ylhäällä oleva CO<sub>2</sub>-anturi reagoivat molempiin oven avaamisiin voimakkaasti kun taas alhaalla oleva ei reagoi juuri lainkaan.

Viereisen suuren käytävän raikasta ilmaa otettiin siis tehokkaasti Mekrin käyttöön avoimen oven ja tilojen välille muodostuneen pienen lämpötilaeron avulla. Ilmanlaadun tasaantumista tehosti oviaukon suuri koko verrattuna huoneen lattiapinta-alaan ja tilavuuteen.



Kuva 4.17

Lämpötilat Mekrissä ja käytävällä mitaamalla saatiin tulos siitä, että Mekrin sisäilma lämpeni palaverin aikana noin puoli astetta käytävän ilmaa lämpimämmäksi. Niinpä ovi avattaessa Mekrin hieman käytävää lämpimämpi ilma purkautuu oven yläosista käytävään, mikä voitiin todeta kuvasta 4.16.

## 4.6

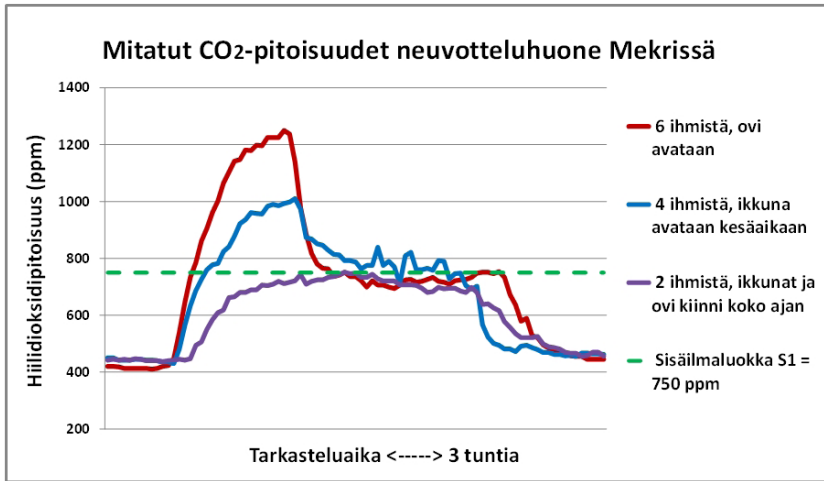
# Ovi verrattuna muihin keinoihin

*Oven avaamisen huomattiin siis toimivan erittäin tehokkaasti kuormitettua tilaa tuulettavana tekijänä. Päätettiin järjestää mittaus- ja käyttötilanteita, joiden avulla voitaisiin verrata oven avaamisen tehokkuutta esimerkiksi ikkunan avaamiseen. Vertailuun otettiin myös tilanne, jossa sekä ikkuna että ovi ovat kiinni ja pelkästään koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto huolehtii neuvotteluhuoneen ilmanvaihdosta.*

Kuvaan 4.18 on koottu erilaisten käyttötapauksen hiilidioksidipitoisuuskäyriä neuvotteluhuone Mekristä. Kuvaa tarkasteltaessa voidaan arvioida saman tilan sisäilman laadun kehittymistä erilaisissa käyttötilanteissa.

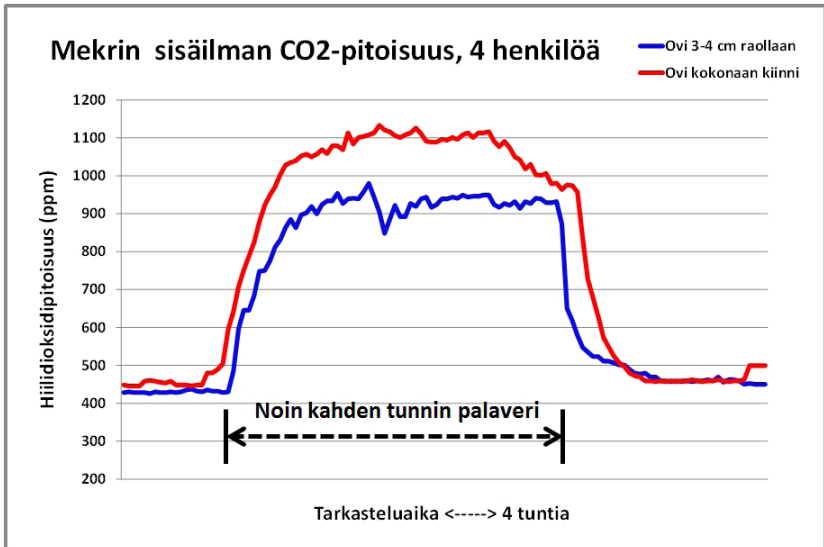
Kuva 4.19 esittää tulokset kahdesta Merkissä pidetystä neljän ihmisen noin kaksi tuntia kestäneistä palaverista. Toisessa palaverissa Mekrin ovi pidettiin kiinni koko palaverin ajan. Toisessa palaverissa sen sijaan ovea käytävään pidettiin jatkuvasti noin 3 – 4 cm raollaan. Jo raollaan olevalla ovella voidaan nähdä olevan huomattava vaikutus Mekrin sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen. Raollaan olevan oven avulla pitoisuus pysyy 4 ihmisen palaverin aikana noin 900 ppm:n pitoisuudessa, kun se suljetun oven tapauksessa nousee noin arvoon 1100 ppm.

Hippotalolta toimisto-olosuhteista saatujen hyvien kokemusten ansiosta tilojen välistä olosuhteiden tasaamista päätettiin kokeilla muissakin tiloissa. Näin saataisiin kokemusta siitä, millä tavalla tutkittu idea toimisi erilaisissa tiloissa. Toisaalta voitaisiin poistaa mahdollisia yksittäisen tilan ominaisuuksien aiheuttamia virheitä tehtävistä johtopäätöksistä.



Kuva 4.18

Mekrissä päästään CO<sub>2</sub>-pitoisuuden osalta parhaaseen sisäilmaluokkaan seuraavissa tilanteissa: 6 henkilön läsnä ollessa oven tulee olla auki koko ajan, 4 ihmisellä riittää avoin ikkuna ja kahdestaan Mekrissä oltaessa ovi ja ikkuna voivat olla kiinni.



Kuva 4.19

Raollaan olevan oven vaikutusta tutkittiin Mekrissä kahden noin kaksi tuntia kestäneen palaverin aikana. Molemmissa palavereissa oli paikalla neljä henkilöä. Jo raollaan oleva ovi parantaa pienen neuvotteluhuoneen sisäilman laatua!



**ILMAVIRTAUKSIA  
TIETOKONELUOKKIEN  
VÄLILLÄ**

---

*Case Konetalon  
CAD-luokat*

*Tässä raportissa käsiteltävät tietokone luokat sijaitsevat Tampereen Hervannassa Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennuksessa nimeltä Konetalo. Konetalo on TTY:n Hervannan kampuksen ensimmäinen rakennus ja se on valmistunut vuonna 1974. Viisikerroksisen Konetalon omistaa Suomen Yliopistokiinteistöt Oy ja siinä on huoneistoalaa noin 26000 neliometriä ja lämmintä tilavuutta noin 115000 kuutiometriä. Konetalo on neliön muotoinen ja sen sisällä on suuri sisäpiha. Kaksi rakennuksen sivua on toteutettu kaksikäytävä ratkaisuna, jossa keskelle jää erilaisia sosiaali-, varasto ynnä muita tiloja. Kaksi muuta sivua on toteutettu yhdellä käytävällä, jossa työtilat sijaitsevat käytävän molemmilla puolilla. Rakennuksessa on oppimistiloja, laboratoriotiloja, toimistotilaa ja verstaita.*

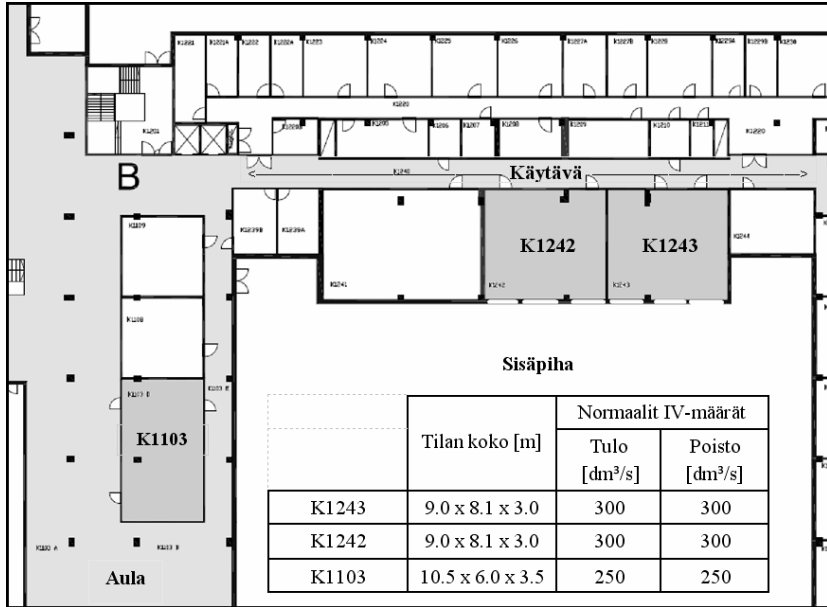
Kuvassa 5.1 esiintyvän Konetalon tiloissa toimii muun muassa Teknisen suunnittelun laitos, TTY:n kielikeskus, ravintola Newton ja kahvila Motivaattori. Rakennuksen käyttö on vilkkainta toimistoaikaan eli arkisin aamukahdeksasta iltapäivään kello neljään. Konetaloa on peruskorjattu kuudessa vaiheessa vuosina 1999 - 2004. Tässä työssä tarkemmin tutkittavat tilat rakennusosassa C on remontoitu kolmannessa vaiheessa. Uudet ilmanvaihtokoneet tutkittavien tilojen rakennusosalle C on asennettu vuonna 2004. Uusin remontti Konetalossa tehtiin vuoden 2012 aikana, jolloin rakennukseen vaihdettiin ikkunat ja uudistettiin ulkovourausta osittain. Konetalon yksittäisten tilojen käyttötarkoitus on vaihdellut vuosien varrella runsaasti käyttäjän eli yliopiston ja sen eri laitosten tarpeiden mukaan.



Kuva 5.1

TTY:n Konetalo valmistui Tampereen Hervantaan vuonna 1974. Konetalossa sijaitsevat tietokoneluokat, joissa tutkittiin olosuhteiden tasaamisen toimivuutta ilmanlaatua parantavana tekijänä.





Kuva 5.2  
 Osa Konetalon ensimmäisen kerroksen pohjapiirrosta, josta nähdään tässä luvussa tarkasteltavien tietokonehuoneiden K1242 ja K1243 sijainnit rakennuksessa. Myös seuraavassa luvussa tarkasteltava aulan tietokonehuone K1103 voidaan nähdä tässä kuvassa.

Konetalossa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, jota käytetään ns. päiväkäytöllä arkisin noin kello 6.45 – 17.15. Saniteettitilojen erilliset poistoilmakoneet ovat päällä vuorokauden ympäri ja viikon jokaisena päivänä. Konetalon yleiset aula- ja ryhmätötilat sekä luokat ovat aina opiskelijoiden käytössä. Tämä vapaa ympärivuorokautinen käyttö saa aikaan runsaasti rakennuksen varsinaisten käyttötuntien ulkopuolista käyttöä, esimerkiksi juuri tässä työssä tutkittavien tietokonehuoneiden osalta. Rakennusta lämmitetään kaukolämmöllä ja osassa tiloista on jäähdytys. Kuvassa 5.2 nähdään osa Konetalon alimman kokonaan maanpinnan yläpuolella olevan kerroksen pohjapiirroksista. Pohjapiirroksista voidaan nähdä tässä raportissa tutkittavien tietokonehuoneiden K1103, K1242 ja K1243 sijainti.

# 5.1

## Konetalon CAD-tietokone luokkien K1242 ja K1243 esittely

*Seuraavaksi tutkimuksessa tarkasteltiin kokeellisin mittauksin Tampereen teknillisen yliopiston Konetalon ensimmäisessä kerroksessa vierekkäin sijaitsevia tietokone luokkia K1242 ja K1243. TTY:n tilat tarjosivat erinomaiset mahdollisuudet olosuhteiden tasaamisen käyttökelpoisuuden ja tehokkuuden selvittämiseen.*

Luokkia käyttävät suureksi osaksi Kone- ja tuotantotekniikan laitoksen kursseilla opiskelevat CAD-piirustusten laatimiseen. Molemmissa luokissa on noin 25 tietokonetta ja kaikkiaan noin 40 istumapaikkaa. Pohjaratkaisultaan luokat ovat toistensa peilikuvat. Molempien luokkien pituus on 9,0 metriä, leveys 8,1 metriä ja korkeus 3,0 metriä. Luokkien lattiapinta-alat siis ovat noin 73 neliometriä ja ilmatilavuudet noin 220 kuutiometriä. Molemmat luokat K1242 ja K1243 ovat normaalisti opiskelijoiden vapaassa käytössä. Luokkien ovet pidetään aina turvallisuussyistä lukittuina, mutta opiskelijat pääsevät sisään kulkukorteillaan. Tässä mittauksessa päädyttiin kuormittamaan luokkaa synteettisellä hiilidioksidilla, ja niinpä luokat suljettiin normaalilta käytöltä tehtyjen mittausten ajaksi. Kuvassa 5.3 esiintyy tietokone luokka K1243.

Luokkien ilmanjako on toteutettu sekoittavana siten, että tuloilma tuodaan yläkautta kolmella tuloilmapäätteellä ja poistoilma imetään käytävän puoleiselta seinältä läheltä katonrajaa. Luokkien ilmavirrat ilmanvaihdon ollessa päällä ovat suunnitelmien mukaan 300 L/s. Ilmamäärien mitattiin olevan myös käytännössä samaa suuruusluokkaa. Luokan käyttötarkoituksen mukaan sen sisäilma on luokiteltavissa Rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaiseen poistoilmaluokkaan 1, eli myös tilasta poistuva ilma on verrattain puhdasta. Yksi luokkien seinistä on ulkoseinää, yksi rajautuu pitkään käytävään luokkien vieressä ja kaksi seinää on luokkien välisiä seiiniä. Luokkia jäähdytetään tarvittaessa koneellisesti puhallinkonvektoreiden ja kierrätysilman avulla. Puhallinkonvektorit ovat käyttäjien käsin säädettävissä.



Kuva 5.3  
Konetalon tietokonehuoneessa K1243 on noin 25 tietokonetta ja siellä opiskellaan muun muassa koneenpiirustusta CAD-ohjelmilla. Olosuhteiden tasaamisen ideaa kokeiltiin yhdessä viereisen luokan K1242 kanssa.

## 5.2

# Luokkien väliseen seinään tehtiin aukko

*Luokissa K1242 ja K1243 tutkittiin tilojen välille tehtyjen aukkojen vaikutusta sisäilman laatuun liittyviin kysymyksiin. Koska haluttiin tutkia muodoltaan ja kooltaan erilaisten aukkojen sekä eri tavalla sijoitettujen aukkojen vaikutus ilman vaihtuvuuteen, päätettiin luokkien väliseen seinään tehdä yksi suurehko aukko, jonka kokoa voitiin muuttaa tarpeen mukaan.*

Aukon alareuna on 8 senttimetriä ja yläreuna 273 senttimetriä lattiapinnan yläpuolella. Aukon yläreuna jää siis vajaan kolmenkymmenen senttimetrin päähän luokan katosta. Aukko on 265 senttimetriä korkea ja leveyttä sillä on 116 senttimetriä. Aukko ei ole aivan yhtenäinen, sillä seinässä vajaan metrin korkeudella lattiasta kulkee vaakatasossa johtokouru. Erilaiset aukot muodostettiin peittämällä suurta aukkoa 5 senttimetrin paksuisella eristelevyllä. Kuva 5.4 esittää tehdyn aukon eri suunnista peitettynä ja avoimena.

Tähän luokkien K1242 ja K1243 väliseen suureen 265 senttimetriä korkeaan ja 116 senttimetriä leveään aukkoon tehtiin kolme erilaista mittausasetelmaa, joita kutsutaan tässä tutkimuksessa

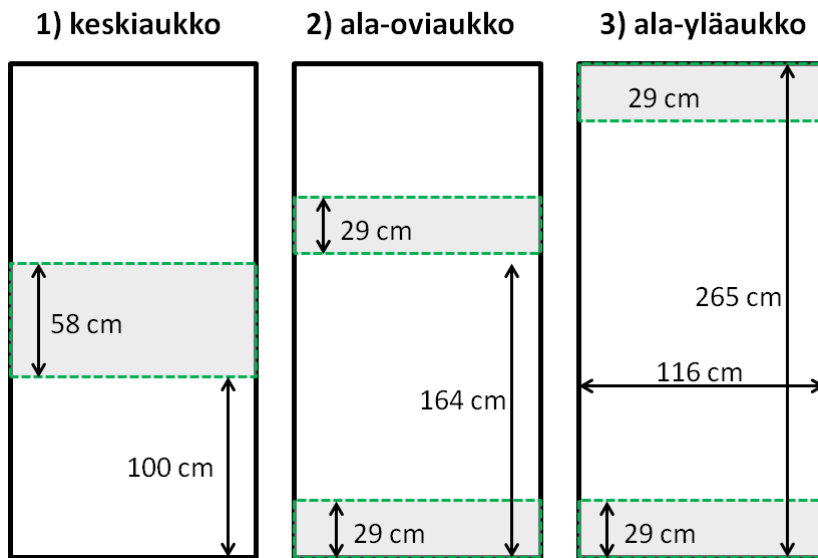
nimillä keskiaukko, ala-oviaukko sekä ala-yläaukko. Näiden kolmen erilaisen aukon mitat ja sijainnit voidaan nähdä kuvassa 5.5. Kaikkien kolmen mittausasetelman aukkojen pinta-ala oli sama 0,67 neliometriä. Vain aukkojen sijainti oli asetelmissa erilainen. Ensimmäisessä näissä luokissa toteutetussa mittauksessa haluttiin tutkia seinään tehdyn aukon toimivuutta vailla tilojen välisiä lämpötilaeroja, ja tutkittavaksi aukoksi valittiin korkeussuunnassa keskellä seinää oleva 58 senttimetriä korkea ja 116 senttimetriä leveä keskiaukko. Aukon sijainnilla etäällä katosta ja lattiasta haluttiin edelleen varmistaa, etteivät mahdollisten pientenkään lämpötilaerojen aiheuttamat virtaukset vaikuta merkittävässä määrin tuloksiin tässä ensimmäisessä mittauksessa.



Kuva 5.4

Luokkien K1242 ja K1243 väliseen seinään tehty aukko. Koko aukko on 265 senttimetriä korkea ja 116 senttimetriä leveä. Osa aukosta voitiin tarpeen mukaan peittää eristelevyillä, ja näin päästiin tutkimaan erilaisten aukkomuodostelmien tehokkuutta luokkien välisessä ilmanvaihdossa.

Toisella mittauskerralla luokkien K1242 ja K1243 välille muodostettiin reilun kahden celsiusasteen lämpötilaero ja tutkittaviksi aukoiksi valittiin aivan alhaalla lähellä lattianrajaa ja normaalin oven yläreunan eli noin kahden metrin korkeudella olevilla aukoilla, jotka molemmat olivat 29 senttimetriä korkeita ja 116 senttimetriä leveitä. Kolmannella mittauskerralla oli toisen mittauskerran tapaan reilun kahden asteen lämpötilaero. Aukon alaosa pidettiin samassa paikassa kuin toisella mittauskerralla. Aukon yläosa sen sijaan nostettiin lähelle katon rajaa, jotta nähtäisiin, onko aukkojen korkeussuuntaisella erolla vaikutusta mittaustuloksiin.



Kuva 5.5

Luokkien K1242 ja K1243 välillä testattujen aukkojen mitat ja sijainnit sekä aukkoasetelmien nimeäminen. Ala-oviaukko nimitys tulee ajatuksesta, että ylempi aukkoista voisi olla oven yläreunassa. Ala-yläaukossa ylempi aukko voisi olla normaalikorkeudessa huoneessa lähellä katon rajaa.

## 5.3

# Ilmanvaihdon, CO<sub>2</sub>-pitoisuuden ja lämpötilojen säätöä

*Luokassa K1243 ja sen viereisessä luokassa K1242 tutkittiin tilojen väliseen seinään tehtyjen aukkojen vaikutusta tilojen väliseen ilmanvaihtoon ja edelleen hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin. Vertailtavaksi testiksi otettiin tilan kyky laskea hiilidioksidipitoisuutta pitoisuudesta 2000 ppm lähtien.*

Molempien tilojen ilmanvaihto tukittiin muovein ja teippaamalla huolellisesti kuvan 5.6 mukaisella tavalla. Täysin tiiviiksi päätelaitteiden peittoa ei etenkään poistoilmanvaihdon osalta saatu, mutta tiivistykset olivat samat eri tilanteissa, joten saatavien mittaustulosten vertailu toisiinsa oli mahdollista. Luokat myös suljettiin normaalilta käytöltä mittausten ajaksi. Myös luokan ovet ja ikkunat pidettiin kiinni. Ilmanvaihdon ja luokan sulkemiseen päädyttiin, jotta muiden kuin tilojen välisen ilmanvaihdon vaikutukset saavutettaviin tuloksiin voitiin sulkea pois mahdollisimman hyvin.

Luokan K1243 ilman hiilidioksidipitoisuutta nostettiin puhtaan synteettisen hiilidioksidin avulla. Ennen mittausten aloittamista luokan K1242 ilma pidettiin raikkaana sisäilmana. Alussa hiilidioksidipitoisuus oli noin arvossa 500 ppm. Hiilidioksidia laskettiin luokkaan K1243 paineistetusta pullosta venttiilin avulla kuvan 5.7 asetelman mukaisesti. Huoneilmaa sekoitettiin tuulettimin niin kauan, että haluttu hiilidioksidipitoisuuden taso saavutettiin tasaisesti koko luokassa. Wirepas-anturit eri puolilla luokkaa kertoivat pitoisuudet reaaliaikaisesti. Lisäksi apuna käytettiin kannettavaa Airflow-käsimittaria.

Synteettisen hiilidioksidin käyttöön päädyttiin, koska ihmisten käyttö hiilidioksidin lähteenä olisi ollut vaikeasti hallittava muuttuja kahdessa tilassa, joista poistuu ja joihin tulee jatkuvasti ihmisiä. Synteettistä hiilidioksidia käytettäessä erilaisten ratkaisujen vertailu toisiinsa oli huomattavasti suoraviivaisempaa. Toisaalta, kun luokat K1242 ja K1243 oli suljettu normaalilta käytöltä, voitiin varmistua siitä, ettei esimerkiksi



Kuva 5.6

Kun luokissa K1243 ja K1241 haluttiin tutkia seinään tehtyjen aukkojen vaikutusta vailla ilmanvaihtoa vaikutusta hiilidioksidipitoisuutta laskevana tekijänä, tuloilmapäätteet muovitettiin ja teipattiin huolellisesti ilmanvaihdon vaikutuksen vähentämiseksi.





Kuva 5.7

Luokkaan K1243 laskettiin synteettistä hiilidioksidia ja ilmaa sekoitettiin tuulettimin niin kauan, että tietty pitoisuus saavutettiin tasaisesti koko luokassa. Tasainen pitoisuus varmistettiin mittaamalla hiilidioksidipitoisuutta Wirepas-mittareilla sekä käsimittarilla.

luokan ovien ja ikkunoiden avaaminen vaikuttanut tuloksiin. Otettiin myös huomioon, että alas lattianrajaan saattaisi synteettistä hiilidioksidia käytettäessä muodostua korkeampi pitoisuus. Kerrostuman aiheuttaisi hiilidioksidin ilmaa suurempi tiheys ja hiilidioksidin jäähtyminen, kun se päästetään pois korkeasta paineesta ja sen olomuoto muuttuu nesteestä kaasuksi. Huoneilmaa voimakkaasti sekoittamalla sekä kattavasti mittaamalla varmistettiin pitoisuuden tasaisuus koko luokassa.

Vertailtavaksi mittaustapahtumaksi otettiin hiilidioksidipitoisuuden lasku alkaen pitoisuudesta 2000 ppm. Näin meneteltiin siksi, koska arvioitiin, ettei painepullosta saada venttiilin avulla annosteltua riittävän tarkasti hiilidioksidin määrää, joka vastaisi esimerkiksi tietyn ihmismäärän jatkuvaa oleskelua tilassa. Niinpä päädyttiin laskemaan luokkaan K1243 hiilidioksidia ja sitä sekoitettiin tuulettimin, kunnes mitattiin sama 2000 ppm:n pitoisuus kaikkialla luokassa. Hiilidioksidipullo ja käytetyt tuulettimet esiintyvät kuvassa 4.9. Lisäksi luokkien normaali koneellinen ilmanvaihto suljettiin tutkimusten

ajaksi, jotta nimenomaan tilojen välisen ilmanlaadun tasaamisen vaikutukset tulisivat hyvin näkyviin. Näin saatiin vertailukelpoinen lähtökohta erilaisten aukkoratkaisujen vertailuun ja niiden toimivuuden arviointiin.

Kaikissa tiloissa ilmavaihtuuvarsinaisen ilmanvaihdon lisäksi myös vuotamalla rakenteellisten epätiivyyksien kautta. Tämän vuoksi luokalle K1243 tehtiin ennen testejä kaksi mittausta, joiden avulla selvitettiin, kuinka nopeasti hiilidioksidipitoisuus laskee luokassa itsestään vailla normaalin ilmanvaihdon, tuuletuksen tai olosuhteiden tasaamisen vaikutusta. Olosuhteet olivat näissä kahdessa testissä samanlaiset kuin varsinaisissa mittauksissa. Vuototesteissä luokan K1243 hiilidioksidipitoisuus nostettiin arvoon 2000 ppm synteettisen hiilidioksidin avulla. Kun tasainen arvo 2000 ppm saavutettiin koko luokassa, ryhdyttiin seuraamaan, kuinka nopeasti luokan ilman hiilidioksidipitoisuus laskee seuraavien tuntien aikana ilman avoimia ovia ja ikkunoita.

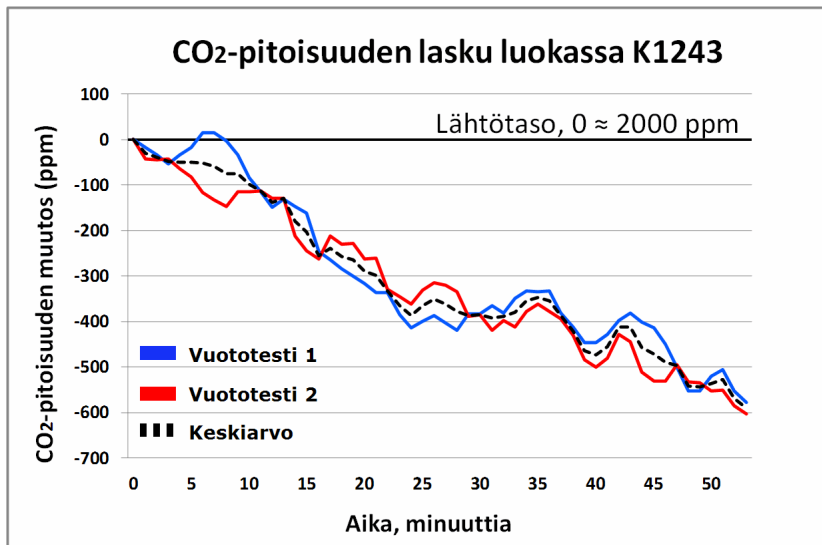
Mittaus toistettiin kahteen kertaan ja tulokset ovat nähtävissä kuvassa 5.8. Kahden mittauskerran keskiarvosta saatiin tilan rakenteellisten vuotojen ja jäljelle jääneen ilmanvaihdon aiheuttama hiilidioksidipitoisuuden lasku. Tähän laskunopeuteen voitiin myöhemmin vertailla tilojen välisen olosuhteiden tasaamisen, luokkien K1242 ja K1243 tapauksessa seiniin tehtyjen erilaisten aukkojen, vaikuttavuutta hiilidioksidipitoisuuksiin. Luokan hiilidioksidipitoisuuden laskun huomattiin olevan suhteellisen nopeaa. Rakennusten rakenteellisten vuotojen määrää arvioidaan yleensä vuotoilmakertoimen avulla. Vuotoilmakerroin kertoo, kuinka nopeasti tilan ilma vaihtuu pelkästään rakenteellisten vuotojen takia. Uudet rakennukset yritetään tehdä tiiviiksi ja niissä vuotoilmakertoimen arvoksi pyritään saamaan noin 0,05 1/h. Olemassa oleville rakennuksille tyypillinen vuotoilmakerroin on 0,16 1/h. Luokan K1243 tilavuuden ollessa 216 m<sup>3</sup> saadaan vuotoilmakertoimella 0,16 1/h luokan vuotoilman määräksi noin 10 L/s.

Tampereen teknillisellä yliopistolla kehitettyä tilan hiilidioksidipitoisuutta erilaisissa tilanteissa ennustavaa laskentaohjelmaa (Viot, 2012) ja vuototesteistä saatuja hiilidioksidipitoisuuden laskuja käyttämällä saatiin luokassa K1243 lopulta toteutuneeksi ilmanvaihdoksi noin 33 L/s. Rakenteiden vuotoilman määräksi laskettiin aiemmin 10 L/s, joten lasketun ilmanvaihdon erotuksen voidaan päätellä johtuvan siitä, ettei luokan normaalia 300 L/s ilmanvaihtoa onnistuttu täysin sulkemaan.

Etenkin poistoilmalaitteiden, joita luokissa on molemmissa peräti seitsemän kappaletta, peittäminen oli haastavaa. Päätteiden ollessa peitettynä todettiin merkksavun avulla ilmanvaihtokanaviin kulkeutuvan pieni määrä ilmaa peittämisestä huolimatta. Laskennallisen tarkastelun avulla jäljelle jääneen koneellisen ilmanvaihdon voidaan siis arvioida olleen noin 20 L/s kaikissa mittaustilanteissa.

Hiilidioksidipitoisuuksien lisäksi toinen tärkeä mitattava suure oli lämpötila. Eri lämpötilassa olevilla ilmoilla on erilaiset tiheydet. Tiheyserot taas pyrkivät tasoittumaan, mikä aiheuttaa ilman liikettä. Tämän vuoksi näissäkin mittauksissa lämpötilan ja etenkin lämpötilaerojen rooli on merkittävä aukkojen kautta tapahtuvan tilojen välisen ilmanvaihtuvuuden toimivuutta tarkasteltaessa.

Molempien luokkien K1242 sekä K1243 puhallinkonvektoreita ja tietokoneita käytettiin hyödyksi, kun haluttiin muuttaa luokkien ilman lämpötilaa. Jos oli tarvetta luokkien sisäilman jäähdyttämiseen, säädettiin puhallinkonvektoreita suuremmalle teholle. Mikäli luokkia taas haluttiin lämmittää, käynnistettiin tietokoneita sisäilmaa lämmittämään.

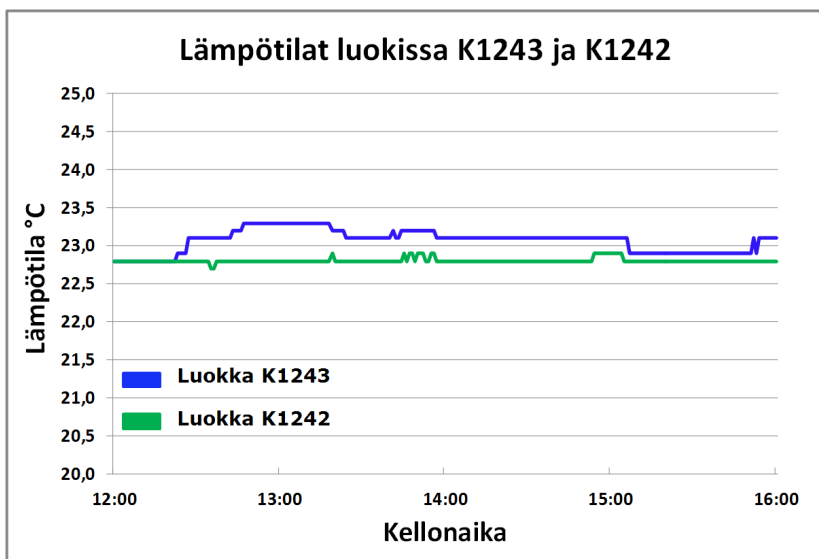


Kuva 5.8

Luokan K1243 hiilidioksidipitoisuuden laskunopeus ilman tilojen välistä olosuhteiden tasaamista selvitettiin, jotta aukkojen vaikuttavuutta voitaisiin arvioida paremmin. Kuva näyttää kahden mittauskerran hiilidioksidipitoisuuden laskun arvosta 2000 ppm alkaen. Keskiarvosta saatiin vertailukäyrä tilanteisiin, joissa aukkoja hyödynnettiin tasattaessa olosuhteita ATK-luokkien välillä.

Ensimmäisessä varsinaisesti seinään tehtyjä aukkoja testaavassa mittauksessa haluttiin selvittää, voiko pelkkä aukko ilman puhaltimia toimia ilman lämpötilaerojen aikaansaamia konvektiivisia virtauksia. Voivatko luokkien väliset olosuhde-erot tasoittua pelkästään diffuusion eli pitoisuuserojen tasaantumisen vaikutuksesta?

Ensimmäisessä mittauksessa luokkien lämpötilat pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta lämpötilaerojen aikaansaamat ilmavirtaukset aukon läpi olisivat vähäisiä tai niitä ei olisi käytännössä lainkaan. Puhallinkonvektoreiden ja tietokoneiden avulla tutkimuksen kannalta sopivien sisäilman lämpötilojen saavuttaminen onnistui hyvin molemmissa luokissa. Varsinainen mittaus toteutettiin kello 13:45 ja 14:45 välisenä aikana, jolloin tilojen lämpötilaero oli keskimäärin 0,3 astetta siten, että luokka K1243 oli aavistuksen lämpimämpi. Kuvassa 5.9 näkyvät lämpötilat mitattiin keskellä luokkaa 1,8 metrin korkeudella lattiasta. Lämpötilaa mitattiin myös 1,3 metrin ja 0,4 metrin korkeudella lattiasta. Koska luokkien ilmaa sekoitettiin tuulettimin,

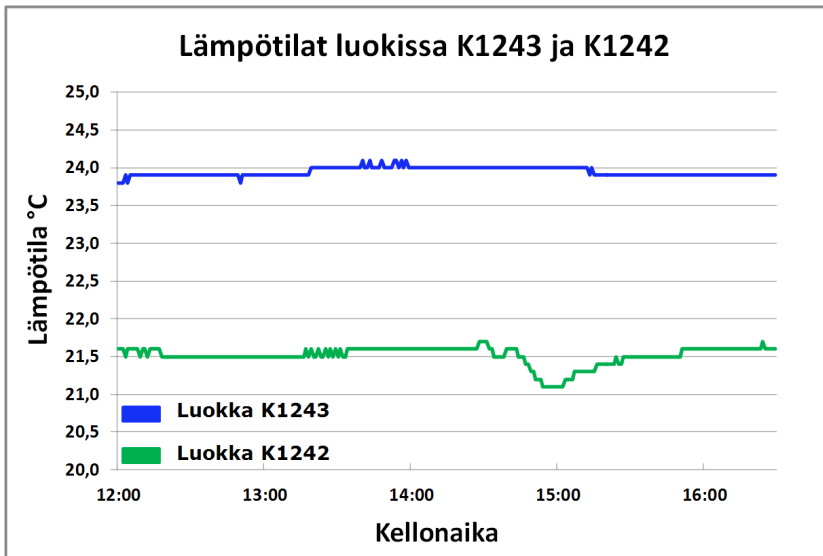


Kuva 5.9

Luokkien K1243 ja K1242 lämpötilat ensimmäisessä mittauksessa. Luokkien lämpötilat pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle toisiaan hyödyntämällä luokkien tietokoneita ja puhallinkonvektoreita. Lämpötilojen asettamisessa onnistuttiin hyvin.

ei lämpötilakerrostumaa päässyt tapahtumaan. Niinpä mitatuissa lämpötiloissa ei korkeussuunnassa ollut merkittävää eroa, ja alla olevaan kuvaan 5.9 otettiin mukaan kummastakin luokasta vain yhden anturin mittaamat lämpötilat.

Toisessa ja kolmannessa luokkiin K1242 ja K1243 liittyvässä mittauksessa luokkien välille haluttiin ensimmäisestä mittauksesta poiketen luoda lämpötilaero. Näissä mittauksissa tarkoituksena oli tutkia, kuinka merkittävä vaikutus lämpötilaerolla ja aukkojen sijainnilla on tilojen välisen olosuhteiden tasaamisen toimivuuteen. Toista ja kolmatta mittauskertaa voitiin vertailla paitsi toisiinsa niin myös luokalle K1243 aiemmin tehtyihin vuototesteihin. Lämpötilaeron luomisessa luokkien välille onnistuttiin ja tulokset voidaan nähdä kuvasta 5.10. Varsinaiset mittaukset tehtiin tässä tapauksessa kello 13:15 - 14:15 sekä 15:25 -16:25 välisinä aikoina. Lämpötilaerot luokkien välillä näinä ajanhetkinä olivat keskimäärin 2,3 ja 2,4 astetta.



Kuva 5.10

Luokkien K1243 ja K1242 lämpötilan toisessa ja kolmannessa mittauksessa. Näissä kahdessa jälkimmäisessä mittauksessa haluttiin luoda luokkien välille noin kahden asteen lämpötilaero, jotta saataisiin tuloksia siitä, millainen vaikutus lämpötilaerolla on aukkojen tehokkuuteen hiilidioksidipitoisuutta laskevana tekijänä.

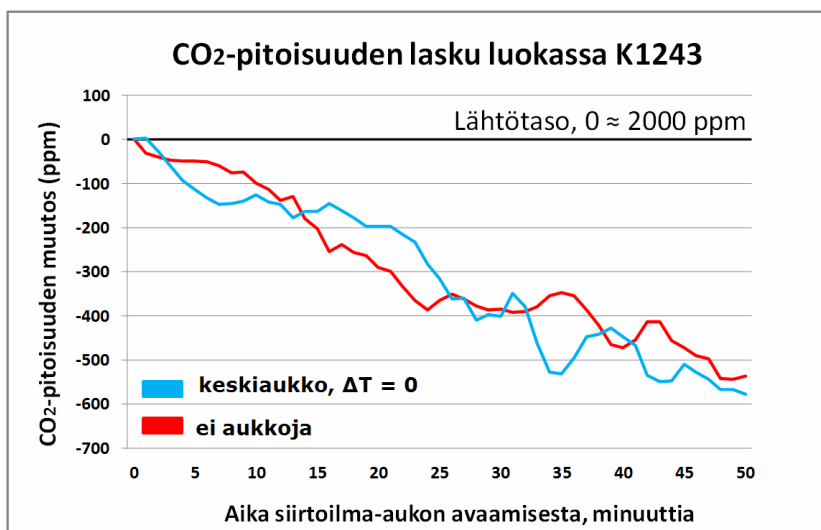
## 5.4

# Lämpötilaerolla ja aukkojen sijainnilla on suuri merkitys

*Aiemmin kuvattujen mittausasetelmien avulla haluttiin selvittää tilojen välisten lämpötilaerojen sekä tilojen väliseen seinään tehtyjen aukkojen sijainnin vaikutusta tilojen välisen olosuhteiden tasaamisen toimivuuteen. Tässä alaluvussa esitetään tuloksia.*

Ensimmäisessä mittauksessa olosuhteiden tasaamisidean toimivuutta lähdettiin kokeilemaan korkeussuunnassa keskellä seinää olevalla 58 senttimetriä korkealla ja 118 senttimetriä leveällä aukolla. Lämpötilan aiheuttaman konvektion vaikutus haluttiin sulkea pois, joten luokkien K1243 ja K1242 sisäilmojen lämpötilat pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle toisiaan, kuten aiemmin todettiin. Suljetun luokan K1243 hiilidioksidipitoisuus nostettiin synteettisellä hiilidioksidilla tasaisesti koko luokassa arvoon 2000 ppm. Luokan K1242, johon luokkaa K1243 on tarkoitus seinään tehdyn aukon avulla tuulettaa, hiilidioksidipitoisuus oli tässä vaiheessa alhainen noin 500 ppm. Tämän jälkeen aukko luokkaan K1242 avattiin ja hiilidioksidipitoisuuden laskunopeutta luokassa K1243 seurattiin.

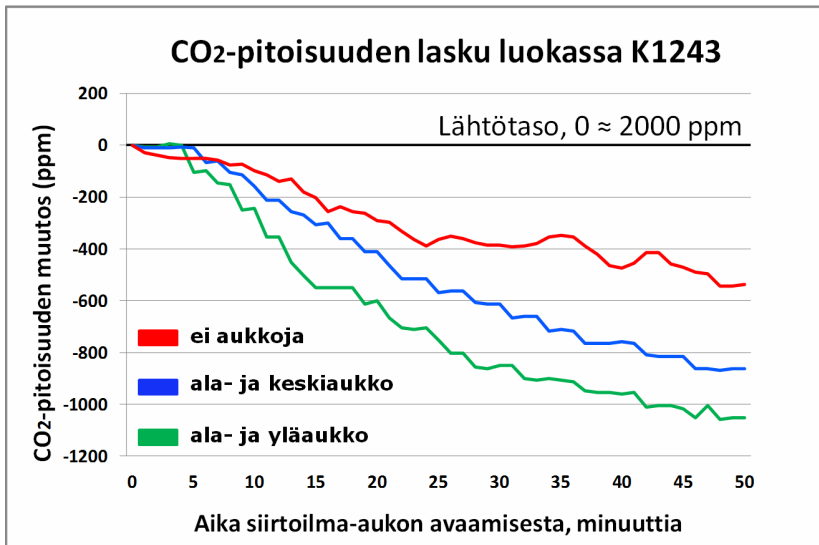
Kuvassa 5.11 esitetään ensimmäisen luokassa K1243 tehdyn mittauksen tulokset ensimmäisten viidenkymmenen minuutin aikana aukon avaamisesta. Hiilidioksidin laskunopeutta tällä mittauskerralla kuvaa vaaleansininen käyrä. Kuvassa on myös aiemmin luokalle tehtyjen kahden vuotokokeen keskiarvon punainen käyrä. Tämä punainen ”ei aukkoja”-käyrä edustaa sitä, kuinka nopeasti hiilidioksidipitoisuus laskee luokassa itsestään rakenteellisten vuotojen sekä pienen ilmanvaihdon vaikutuksesta. Kun tätä vuototestien käyrää verrataan tapaukseen, jossa aukko viereiseen luokkaan oli avattuna, voidaan nähdä, ettei keskiaukolla ole merkittävää vaikutusta hiilidioksidipitoisuuden laskunopeuteen. Tämän tuloksen avulla voidaankin todeta, ettei pitoisuuserojen tasoittumista tapahdu luokkien välillä pelkästään diffuusion avulla. Keskiaukon toimimattomuuden syyksi arvioidaan tilojen välisen lämpötilaeron puuttumista.



Kuva 5.11

Muutokset luokan K1243 hiilidioksidipitoisuudessa, kun luokkien välillä ei ole lämpötilaeroa. Sininen käyrä kuvaa tilannetta keskiaukon ollessa avoinna. Punainen, kun aukkoa ei ollut. Tulosten perusteella voidaan todeta, ettei suurikaan aukko toimi olosuhteita tasaavana tekijänä ilman lämpötilaeroa.

Ensimmäisen mittauskerran kokemusten perusteella toiseksi ja kolmanneksi mittauskerraksi mittausasetelmaa muutettiin hieman sekä aukkojen että luokkien lämpötilojen osalta. Toisella ja kolmannella kerralla haluttiin selvittää, kuinka tehokkaasti sisäilman laatua olisi mahdollista parantaa pelkkien seinään tehtyjen aukkojen avulla, kun tilojen välillä on lämpötilaeroa. Yhden korkeussuunnassa keskellä sijaitsevan aukon sijaan näissä mittauksissa aukko jaettiin kahteen osaan, joiden pinta-ala oli yhteensä ensimmäisen mittauksen yhden aukon suuruinen. Aukon alaosa oli toisessa ja kolmannessa mittauksessa samassa paikassa, mutta yläosa oli toisessa mittauksessa vajaan kahden metrin korkeudella ja kolmannessa mittauksessa lähellä katonrajaa noin kahden ja puolen metrin korkeudella (kuva 5.5).

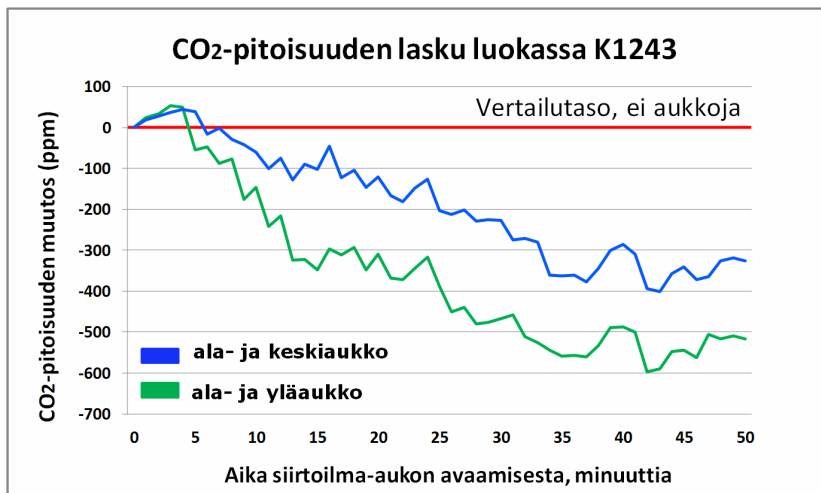


Kuva 5.12

Hiilidioksidipitoisuuden lasku luokassa K1243 ilman aukkoja sekä ala-oviaukon tai ala-yläaukon ollessa avoimina. Luokkien välillä on reilun kahden asteen lämpötilaero. Lämpötilaeron ja aukkojen avulla voidaan selvästi tehostaa hiilidioksidipitoisuuden laskua. Mikäli aukko jakaantuu kahteen osaan, olisi aukon osien hyvä olla korkeussuunnassa mahdollisimman kaukana toisistaan.



Hiilidioksidipitoisuuden huomattiin laskevan huomattavasti nopeammin, kun tilojen välillä on lämpötilaeroa. Lisäksi asiaan vaikuttaa merkittävästi myös aukkojen korkeussuuntainen sijainti. Alhaalla lähellä lattiaa ja ylhäällä lähellä katonrajaa sijainneet aukot toimivat selvästi tehokkaammin kuin lähellä lattiaa ja noin kahden metrin korkeudella sijainneet aukot. Kuvasta 5.12 voidaan nähdä ala-oviaukon sekä ala-yläaukon vertailu tilanteeseen, jossa hiilidioksidipitoisuuden laskua aiheuttaa ainoastaan tilan rakenteelliset vuodot. Ala-yläaukko laskee pitoisuutta ensimmäisen viidentoista minuutin aikana noin 200 ppm enemmän kuin ala-oviaukko ja noin 300 ppm enemmän kuin tila ilman aukkoja. Kolmen varttitunnin kohdalla eroa on 200 ja 500 ppm.

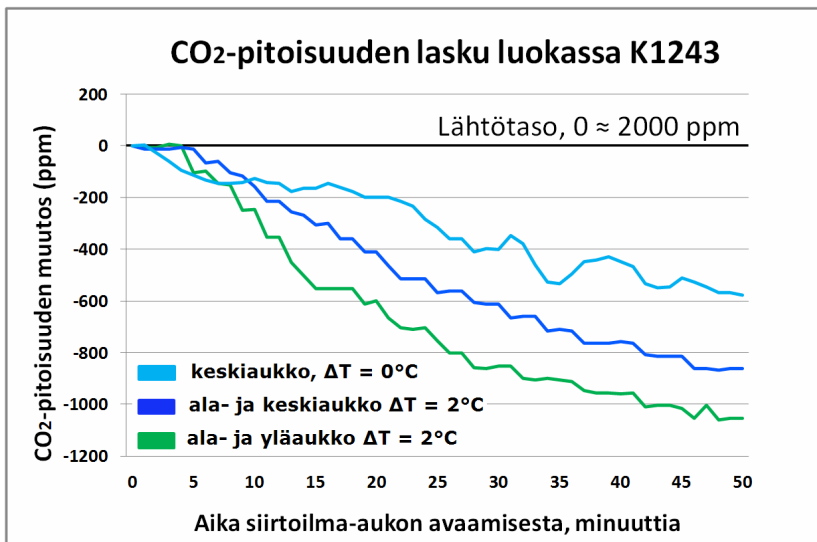


Kuva 5.13

Ala-oviaukon sekä ala-yläaukon aiheuttamat hiilidioksidipitoisuuden muutokset, kun tilan vuototestien keskiarvo on otettu vertailu- eli nollassoksi. Aukot saavat aikaan merkittävän eron verrattuna tilanteeseen, jossa aukkoja ei ole lainkaan.

Kuvassa 5.13 on seinään tehtyjen aukkojen väliseksi vertailu- eli nollatasoksi otettu pelkkien rakenteellisten vuotojen aikaansaama pitoisuuden muutos. Näin nähdään vielä paremmin, kuinka paljon nimenomaan aukot vaikuttivat hiilidioksidipitoisuuden alenemaan. Lisäksi aukkojen sijaintien vaikutus tulee kuvassa selvemmin näkyviin.

Kuvaan 5.14 on koottu kaikkien kolmen erilaisen aukkoasetelman aiheuttamat muutokset luokan K1243 hiilidioksidipitoisuudessa ensimmäisten 50 minuutin aikana aukon avaamisen jälkeen pitoisuudesta 2000 ppm alkaen. Näiden kolmen asetelman mitat ja sijainnit esitettiin aiemmin kuvassa 5.5. Keskiaukon eli vaaleansinisen käyrän tapauksessa tilojen välillä ei ollut lämpötilaeroa (kuva 5.9). Ala-oviaukon sekä alayläaukon mittauksissa lämpötilaeroa tilojen välillä oli hieman reilu kaksi astetta (kuva 5.10). Kuvasta 5.14 voidaan helposti nähdä aukkojen tehokkuusjärjestys hiilidioksidipitoisuutta laskevana tekijänä.



Kuva 5.14

Kolmen tutkitun aukkoasetelman aikaansaamat laskut hiilidioksidipitoisuudessa, kun lähtötaso on 2000 ppm ja tarkastelu-aika 50 minuuttia. Korkeussuunnassa keskellä olevan aukon vaikutus ilman tilojen välistä lämpötilaeroa on kaikkein vaatimattomin ja lasku onkin lähinnä rakennevuotojen ja peittämisistä huolimatta jäljelle jääneen koneellisen ilmanvaihdon ansiota. Laskennan perusteella ala- ja keskiaukon kautta ilmaa vaihtui 41 L/s ja ala- ja yläaukosta 71 L/s.

Mikäli aukkojen tehokkuutta halutaan käyrien lisäksi vertailla yhtenä lukuarvona, onnistuu se laskemalla aukosta virtaavan ilmavirran suhde tilojen välisen lämpötilaeron ja aukon pinta-alan tuloon. Aukon tehokkuusluku olisi:  $\epsilon = q/(A\Delta T)$ . Luku siis kertoo aukon aikaansaaman ilmavirran määrän suhteessa aukon pinta-alaan ja tilojen väliseen lämpötilaeroon. Aukoista virrannut ilmavirta laskettiin mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien avulla laskentaohjelmalla (Viot, 2012). Laskennassa otettiin huomioon rakenteellisten vuotojen ja koneellisen ilmanvaihdon osuus pitoisuutta laskevana tekijänä. Ala-oviaukon tapauksessa aukkojen läpi vaihtuneeksi ilmavirraksi saatiin  $41 \text{ dm}^3/\text{s}$  ja ala-yläaukon tapauksessa  $71 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Lämpötilaero tilojen välillä oli keskimäärin  $2,3 \text{ K}$  ja molempien aukko yhdistelmien pinta-ala  $0,67 \text{ m}^2$ . Näistä luvuista laskemalla saatiin tehokkuusluvuksi ala-oviaukolle  $27$  ja ala-yläaukolle  $41 \text{ dm}^3/\text{sm}^2\text{K}$ .

Saavutetuista tuloksista voidaan päätellä, että mikäli tilojen kuormitusta halutaan tasata ja ilmanlaatua parantaa pelkkien seinään tehtyjen aukkojen avulla, täytyy kuormituksen tasaamiseen osallistuvien tilojen välillä olla lämpötilaeroa. Lisäksi aukkojen vaikutusta edelleen tehostaa se, että aukon kokonaiskorkeus on mahdollisimman suuri. Toisin sanoen aukot on sijoitettava korkeussuunnassa kauaksi toisistaan niin, että aukkojen sijainti tehostaa lämpötilaerojen aiheuttamia konvektiivisia virtauksia niiden läpi. Lisäksi kahden aukon tapauksessa toteutuu tilanne, jossa molemmissa aukoissa ilmaa liikkuu vain yhteen suuntaan. Toisesta aukosta ilmaa tulee sisään tilaan ja toisesta ulos. Tällöin ilmavirtojen liikkuminen on tehokkaampaa, kun eri suuntiin kulkevien ilmavirtojen aiheuttamaa ilman pyörteilyä aukon suulle syntyy vähemmän.



**PIENILLÄ  
PUHALTIMILLA SUURI  
VAIKUTUS**

---

*Case Konetalon  
aulan ATK-luokka*

*Seuraavaksi lähdettiin tutkimaan ajatusta  
tehostaa tilojen välistä olosuhteiden  
tasaamista pienten sähkökäyttöisten  
siirtoilmapuhaltimien avulla.*

## 6.1

# Konetalon aulan ATK-luokka K1103 on suosittu paikka

*Joissain Tampereen teknillisen yliopiston tietokonealuokissa havaittiin sisäilman laadun heikentyvän ajoittain. Ilma tuntui tunkkaiselta ja raskaalta hengittää. Joidenkin tietokonealuokkien ilma antoi samanlaisen kokemuksen kuin esimerkiksi makuuhuoneen ilma juuri nukutun yön jälkeen. Tämän tutkimuksen seuraava kohde oli Konetalon sisääntuloaulan tietokonealuokka K1103.*

Luokka K1103 on opiskelijoiden vapaassa käytössä kulkukortin avulla vuorokauden ympäri ja vuoden jokaisena päivänä. Tietokonealuokkaa käytetään ryhmätöiden tekemiseen, tulostamiseen, vapaa-ajan käyttöön ja moniin muihin tietokonetta vaativiin askareisiin. Luokka on keskeisen sijaintinsa vuoksi suosittu ja sen 26 tietokonepaikkaa ovat etenkin päivisin lähes aina täynnä. Koska luokka on opiskelijoille aina avoin, jatkuu käyttö iltamyöhään etenkin arkisin. Luokka on 10,5 metriä pitkä, 6 metriä leveä ja 3,5 metriä korkea, joten sen tilavuus on 221 kuutiometriä.

Tällä luokalla ei ole lainkaan ulkoseinää ja heti sen vieressä on Konetalon tilava aula. Luokalla on kolme ovea aulaan, mutta vain yksi ovista on päivittäisessä käytössä. Luokan ovet eivät ole erityisesti äänieristettyjä. Tietokoneluokka K1103 voidaan nähdä sisäpuolelta kuvassa 6.1. Kuva 6.2 esittää Konetalon aulan ja sen viereisten tilojen pohjapiirroksen lattiapinta-aloineen. Edellisen luvun kuvasta 5.2 voidaan nähdä luokan K1103 sijainti Konetalossa verrattuna viidennessä luvussa tutkittuihin tietokoneluokkiin K1242 ja K1243.

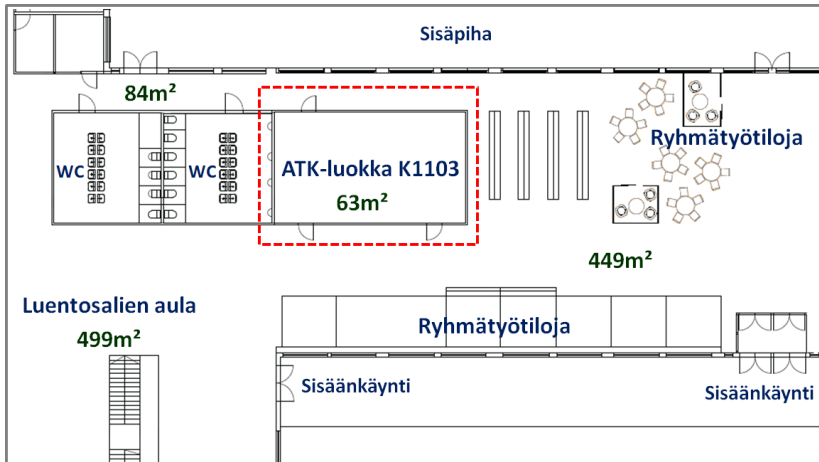
Luokka K1103 on suurten ilmanvaihtokoneiden palvelualueella. Vesikatolla sijaitsevilla ilmanvaihtokoneilla vaihdetaan ilmaa rakennusosan C tiloissa neljässä eri kerroksessa. Tulopuolen ilmanvaihtokoneen ilmanvaihtomäärä on piirustusten mukaan yhteensä 6100 L/s ja poistopuolen ilmanvaihtokoneen yhteensä 5120 L/s. Erillistä huippumurein toteutettuja poistoilmanvaihtoa rakennusosassa C on



Kuva 6.1  
TTY:n Konetalon ATK-luokka K1103 sijaitsee rakennuksen sisäntuloaulassa ja on opiskelijoiden vapaassa käytössä ympäri vuorokauden.

kohdepoistoissa, vetokaapeissa ja kemiallisissa varastoissa kojeluettelon mukaan yhteensä 1755 L/s. Kokonaisilmavirrat kyseessä olevassa rakennusosassa ovat siis noin 6100 L/s tuloilmaa ja 6875 L/s poistoilmaa. Suuret ilmanvaihtokoneet ovat käynnissä arkipäivisin noin kello 6.45 ja 17.15 välisenä aikana.

Luokan K1103 ilmanjako on toteutettu sekoittavana ilmanvaihtoa siten, että sekä poisto- että tuloilmapäätteet ovat huoneen yläosissa lähellä katonrajaa. Poisto- ja tuloilmavirrat ovat suunnitelmien mukaan 250 L/s. Näiden määrien todettiin mittauksin toteutuvan myös käytännössä. Normaalisti tässä tietokonealuokassa on koneellinen jäädytys ja se on toteutettu käyttäjien säädettävissä olevien vesijäähdytteisin puhallinkonvektoreiden ja kierrätysilman avulla. Koska puhallinkonvektoreiden toiminnassa oli epävarmuutta, päätettiin ne kytkeä kokonaan pois päältä tämän tutkimuksen ajaksi. Luokassa ei ole mitään erityisiä päästö- tai kosteuslähteitä, joten merkittävimpänä päästölähteenä ja ilmanvaihdon määrän mitoittavana tekijänä voidaan pitää ihmisten lukumäärää tilassa. Luokan ja viereisen aulan käyttötarkoituksen mukaan niiden sisäilma on luokiteltavissa Rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaiseen puhtaimpaan poistoilmaluokkaan 1.



Kuva 6.2

Tampereen teknillisen yliopiston Konetalon sisääntuloaulan pohjapiirros lattiapinta-aloineen. Siirtoilmapuhaltimien vaikutusta sisäilman laatuun tutkittiin ATK-luokassa K1103, joka on rajattu kuvassa punaisella katkoviivalla.

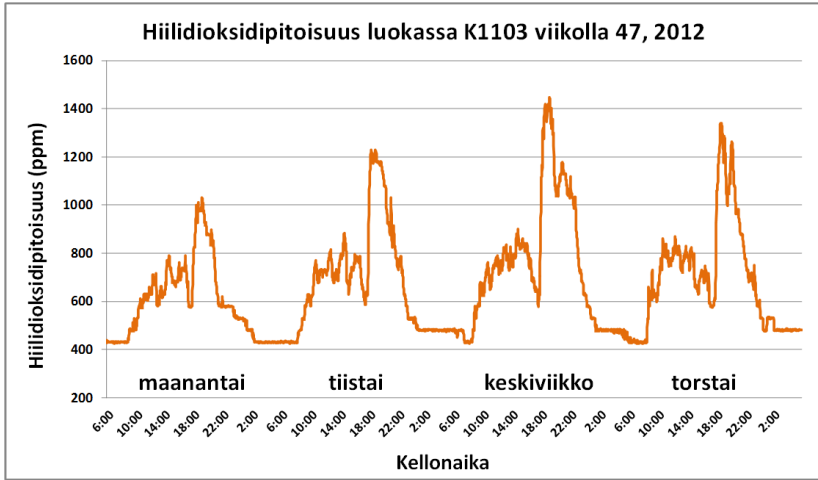


## 6.2

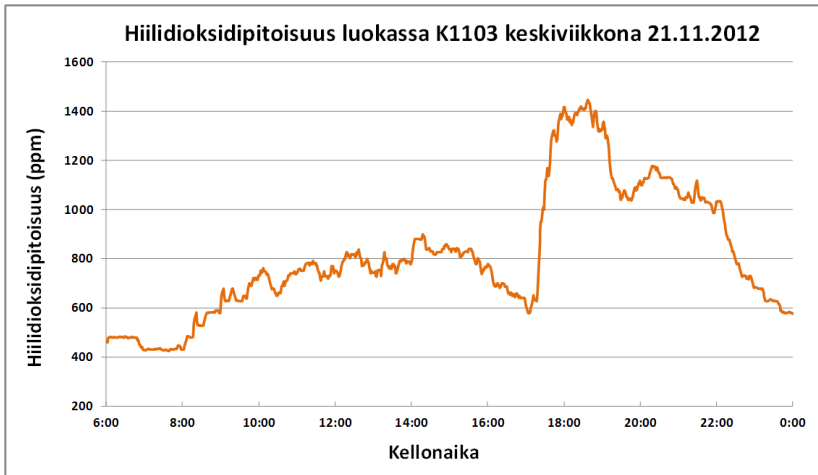
# ATK-luokan ilmanlaatu huononee iltaisin

*Koska tietokoneluokkaa K1103 käytetään paljon myös normaalin toimistoajan ja ilmanvaihtokoneiden toiminta-ajan ulkopuolella, huomattiin luokan sisäilman hiilidioksidipitoisuuden nousevan etenkin arki-iltaisin huomattavasti normaalia korkeammalle.*

Tietokoneluokan sisäilman hiilidioksidipitoisuus kohoaa heti suurten ilmanvaihtokoneiden sammuttua myöhään iltapäivällä kello 17.15 alkaen. Luokan tunkkaisuus aistittiin myös paikan päällä havainnoimalla. Kuva 6.3 esittää luokan K1103 sisäilman hiilidioksidipitoisuuden viikolla 47 vuonna 2012 maanantaista torstaihin. Kuva 6.4 näyttää ilman hiilidioksidipitoisuuden tarkemmin yhdeltä päivältä eli keskiviikolta 21.11.2012. Ilmanvaihdon sammumisesta ja iltakäytöstä aiheutuva hiilidioksidipitoisuuden nousu iltaisin on selvästi nähtävissä.



Kuva 6.3  
Luokan K1103 sisäilman hiilidioksidipitoisuus viikolla 47 vuonna 2012. Kuvasta voidaan helposti nähdä, kuinka hiilidioksidipitoisuus nousee joka päivä klo 17 jälkeen.



Kuva 6.4  
Luokan K1103 yhden arkipäivän hiilidioksidipitoisuus keskiviikolta 21.11.2012. Konetalon suuret ilmanvaihtokoneet sammuvat arkisin klo 17:15. Tämä näkyy selvästi luokan iltaisin kohoavassa hiilidioksidipitoisuudessa.

Kuvasta 6.3 ja vielä tarkemmin kuvasta 6.4 nähdään, että hiilidioksidipitoisuus luokassa nousee alkuillasta liian korkeaksi koneellisen ilmanvaihdon sammumisen jälkeen. Yhtenä vaihtoehtona pitoisuuden kurissa pitämiseen olisi ilmanvaihtojärjestelmän käyntiaikojen muuttaminen luokan K1103 käyttötuntien mukaisiksi. Suurten, yli kuusi kuutiometriä sekunnissa ilmaa vaihtavien ilmanvaihtokoneiden pitäminen käynnissä pelkästään yhden tietokonehuoneen takia ei kuitenkaan kuulostanut järkevältä. Toisaalta, viereisessä tilavassa Konealan aulassa sisäilma laatu pysyy iltaisinakin hyvänä, joten tässä kohteessa päätettiin kokeilla aulan hyvän sisäilman hyödyntämistä ATK-luokan käyttöön. Olosuhteita siis tasattaisiin tilojen välillä ja aulan hyvälaatuista ilmaa hyödynnettäisiin tietokonehuoneen tarpeisiin. Käytännössä aulan laadukkaan ilman hyödyntäminen vaatii ilmanvaihtuvuutta tilojen välille.

## 6.3

# Siirtoilmalaitteet ATK-luokan avuksi

*Tietokoneluokan K1103 iltaisin kohonneeseen hiilidioksidipitoisuuteen lähdettiin hakemaan ratkaisua seiiniin tehtyihin aukkoihin asennettavien pienten sähkökäyttöisten siirtoilmapuhaltimien ja niiden aikaansaaman ilmanvaihtuvuuden avulla. Viereisessä tilavassa aulassa on raikasta ilmaa tietokoneluokankin hyödynnettäväksi.*

Siirtoilmapuhaltimien käyttö voi ajatella tulevan kyseeseen etenkin silloin, kun vierekkäisten tilojen välille ei synny lämpötilaeroa. Lämpötilaeron kun huomattiin tämän tutkimuksen aiemmissa mittauksissa olevan ensiarvoisen tärkeää luonnostaan tapahtuvien ilmavirtausten aikaansaamiseksi. Toisaalta puhaltimien avulla seiiniin tehtävien aukkojen koot voivat olla pienemmät, koska samasta poikkipinta-alasta saadaan kulkemaan enemmän ilmaa. Puhaltimien avulla ideaa tilojen välisestä olosuhteiden tasaamisesta voitaisiin hyödyntää laajemmin erilaisissa tiloissa.

Luokan K1103 seiniin tehtiin siis aukot, jotka yhdistivät luokan ilman viereiseen Konetalon suureen aulaan. Tämä edelleen mahdollisti suuren aulan ilmanvaihtokapasiteetin hyödyntämisen tietokoneluokan käyttöön. Kaikkien luokkaan K1103 tehtyjen aukkojen leveys on 545 senttimetriä ja korkeus 210 senttimetriä. Valmistajan tietojen mukaan yksi siirtoilmalaite siirtää ilmaa 60 litraa sekunnissa, joten kaksi puhallinta siirtää yhteensä 120 litraa ilmaa sekunnissa. Ilmavirran mitattiin olevan myös käytännössä samaa suuruusluokkaa ilmoitetun kanssa. Puhaltimet toimivat 12 voltin tasavirtamoottoreilla ja niiden tehontarve on vain 4 wattia puhallinta kohden. Vaatimattomalla 8 watin sähköteholla pystytään siis siirtämään 120 litraa ilmaa sekunnissa. Virtansa siirtoilmalaitteen saavat normaalista pistorasiasta muuntajan kautta.



Kuva 6.5

Tutkimuksen kohteena ollut TTY:n Konetalon aulan ATK-luokka K1103 aulasta kuvattuna. Kaksi luokan seinään tehtyä aukkoa näkyvät ikkunoiden yläpuolella. Perusajatuksena oli selvittää, voitaisiinko kuormitetun tilan ilmanlaatua parantaa hyödyntämällä viereisen aulan suurta kapasiteettia. Näin voitaisiin edelleen pitää Konetalon suurten ilmanvaihtokoneiden käyntiajat tarkoituksenmukaisina.

Laitetoimittajaksi valittiin suomalainen Mobair. Luokan K1103 kevyisiin kipsiväliseiniin tehtiin neljä aukkoa, joista kahteen asennettiin Mobair 4101 siirtoilmasäleiköt ja kahteen Mobair 4100 siirtoilmapuhaltimet, joista yksi esiintyy läheltä kuvattuna kuvassa 6.5. Kuvassa 6.6 näkyvät siirtoilmapuhaltimet asennettiin puhaltamaan ilmaa luokasta K1103 pois päin kohti WC-käytävää, joka näkyy kuvassa 6.7. Puhaltimien puhaltaessa ilmaa ulos, tarvitaan luokkaan korvausilmaa. Korvausilmaa luokkaan tulee luokan vastakkaiselle aulan puoleiselle seinälle asennettujen siirtoilmasäleikköjen kautta. Korvausilmaa virtaa luokkaan jonkin verran myös muiden aukkojen kuten ovirakojen kautta.



Kuva 6.6

Mobair 4100 siirtoilmalaite asennettuna luokan K1103 ja Konetalon aulan WC-käytävän väliseen seinään. Yhden siirtoilmalaitteen mitattiin puhaltavan ilmaa noin 60 litraa sekunnissa.



Kuva 6.7  
ATK-luokan K1103 WC-käytävän puoleinen sivu, jonne siirtoilmapuhaltimet puhaltavat ilmaa ATK-luokasta käytävään. Puhaltimet sekä niiden säleiköt ovat siistit ja ovat nähtävissä kuvan yläreunassa ikkunoiden yläpuolella.

## 6.4

# Mittaustapahtumat puhaltimien tehokkuuden selvittämiseksi

*Luokan K1103 käyttöä seurattiin ja ilmanlaatua mitattiin siirtoilmapuhaltimien tehokkuuden arvioimiseksi. Tehokkuuden arviointi tehtiin vertaamalla puhaltimien käyttöä tilanteeseen, jossa siirtoilmapuhaltimet eivät ole käytössä. Luokan käyttöä ja ilmanlaatua seurattiin kuutena arki-iltana, joista neljän illan tulokset otettiin lähempään tarkasteluun.*

Tietokonehuoneessa K1103 tilaa kuormittavana tekijänä käytettiin ihmisten läsnäoloa tilassa normaalissa käyttötilanteessa. Mittauksia suoritettiin ja ihmisten lukumääriä huoneessa laskettiin kahtena viikkona tiistaista torstaihin eli yhteensä kuutena arki-iltana. Tarkasteltaviksi tuloksiksi valittiin tiistaiden ja keskiviikkojen illat. Näinä iltoina tilojen käyttäjämäärät olivat melko hyvin toisiaan vastaavat. Eroa käyttäjämäärissä oli kuitenkin sen verran, että määrät on hyvä ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa. Tilan käyttäjämäärät kirjattiin ylös viiden minuutin välein.



Luokkaan K1103 valmisteltiin kahta erilaista mittaustapahtumaa. Siirtoilma-aukkojen ja siirtoilmapuhaltimien toimivuutta testattiin normaaleissa käyttötilanteissa kahdella viikolla talvella 2013. Ensimmäisellä viikolla siirtoilmapuhaltimet ja siirtoilmasäleiköt olivat käytössä ja toiseksi viikoksi puhaltimet sammutettiin ja aukot peitettiin muovein kuvan 6.8 näyttämällä tavalla tilojen välisen olosuhteiden tasaantumisen vaikutuksen poistamiseksi. Näin päästiin vertailemaan sitä, onko tilojen välisellä ilmanlaadun tasaamisella vaikutusta tietokonehuoneen K1103 sisäilman laatuun.



Kuva 6.8  
Muovitettu siirtoilmasäleikkö luokan K1103 seinässä. Kun haluttiin tutkia luokan sisäilman laatua vailla aulan ja ATK-luokan välistä ilmanlaadun tasaamista aukkojen asennuksen jälkeen, muovitettiin aukot mittausten ajaksi.

Luokan K1103 tapauksessa huomio kiinnittyi erityisesti aikaan, jolloin normaali ilmanvaihto kytkeytyy pois päältä myöhään iltapäivällä klo 17.15. Toisin kuin luokkien K1242 ja K1243 tapauksessa luokka K1103 oli siis aivan normaalissa opiskelijoiden käytössä tutkimuksen aikana. Tilan käyttäjiä ei erikseen tiedotettu tutkimuksesta, vaan tilan käytön haluttiin olevan aivan normaalia. Koska tilassa olevien ihmisten lukumäärä on tärkeä tekijä tilan hiilidioksidipitoisuuden muodostumisessa, tilaa käyttävien ihmisten lukumäärä luokassa kirjattiin ylös paikan päällä laskemalla viiden minuutin välein. Näin menetellen saatiin selville luokkaan ihmisistä syntyvä kuormitus, joka on ilman hiilidioksidipitoisuuden ohella toinen tärkeä tämän luokan tuloksissa huomioon otettava muuttuja. Alla olevassa taulukossa 2 esitetään kaikkien neljän mittauspäivän käyttäjämäärät luokassa K1103 kymmenen minuutin välein aikavälillä 16:50 – 19:00.

Tulosten tulkitsemisen kannalta toivottavaa olisi ollut, että ihmisten lukumäärä olisi eri tapauksissa ollut lähes sama ja pysynyt muuttumattomana mittauksen ajan. Luokan ollessa normaalissa käytössä tämä ei aivan toteutunut, vaan ihmisiä tuli ja poistui luokasta jonkin verran ja lukumääräkin näin ollen vaihteli. Ihmisten vaihtuvuudesta huolimatta mittaus tuloksista pystyttiin toteamaan siirtoilmapuhaltimien tehokkuus.

	16:50	17:00	17:10	17:20	17:30	17:40	17:50
<b>Ti 26.2.</b>	12	16	11	12	12	9	9
<b>Ti 12.3.</b>	13	13	12	10	10	9	9
<b>Ke 27.2.</b>	12	17	16	18	16	16	15
<b>Ke 13.3.</b>	18	15	13	12	10	12	13

	18:00	18:10	18:20	18:30	18:40	18:50	19:00
<b>Ti 26.2.</b>	11	10	8	8	7	7	6
<b>Ti 12.3.</b>	7	10	9	8	7	6	6
<b>Ke 27.2.</b>	15	13	10	12	12	13	11
<b>Ke 13.3.</b>	13	12	12	9	8	8	7

Taulukko 2

Luokan K1103 käyttäjämäärät ajankohdilta, jolloin siirtoilmaidean toimivuutta tilassa tutkittiin. Käyttäjämäärät eri päivillä eivät ole täysin toisiaan vastaavat, mutta mahdollistavat kuitenkin tapausten vertailun.

## 6.5

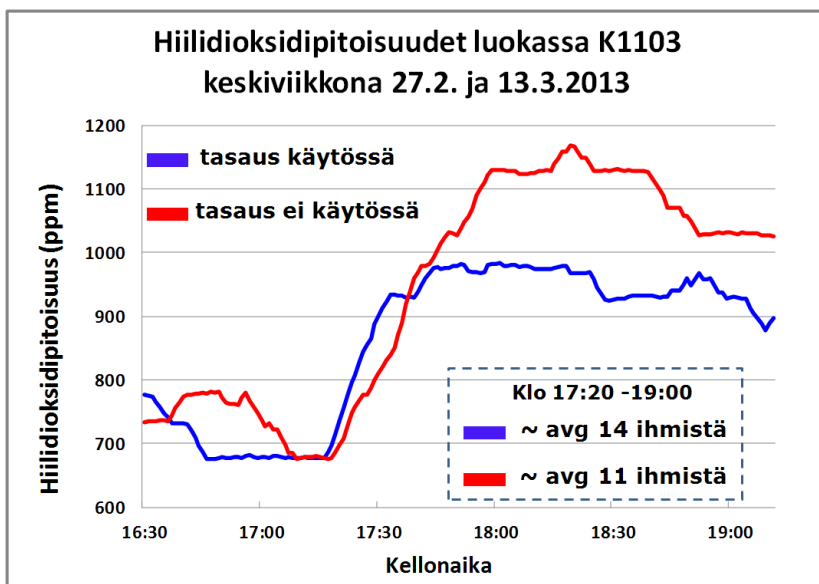
# Siirtoilmapuhaltimilla on kokoaan suurempi vaikutus

*Seurattuina iltoina luokan K1103 käyttö oli verrattain vilkasta. Pienillä siirtoilmapuhaltimilla saatiin suuria tuloksia. Luokan ilman hiilidioksidipitoisuus oli puhaltimen käytön aikaan noin 150 – 200 ppm alhaisempi, vaikka käyttöä oli enemmän!*

Luokassa K1103 tehtyjen mittausten tuloksia on nähtävissä kuvissa 6.9, 6.10 ja 6.11. Molemmissa kuvaajissa sininen käyrä kuvaa huoneilman hiilidioksidipitoisuutta silloin, kun aulan ja ATK-luokan välistä olosuhteiden tasaamista hyödynnettiin. Punainen käyrä taas piirtää hiilidioksidipitoisuuden silloin, kun tilojen välinen ilmanlaadun tasaaminen on otettu pois käytöstä aukot muovittamalla. Rakennuksen päiväaikaisen ilmanvaihdon kytketyminen pois päältä iltapäivällä kello 17:15 voidaan nähdä molemmissa kuvissa. Aivan selvästi erotettavissa on myös ero hiilidioksidipitoisuuden nousussa riippuen siitä, onko siirtoilma ollut käytössä vai ei. Keskiviikkojen mittauksissa tietokonehuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuus on pysynyt noin 150 ppm alemmalla tasolla kun olosuhteita tasattiin tuomalla ilmaa viereisestä aulasta. Tiistaiden mittauksissa ero on reilu 100 ppm.

Mittaustuloksia tarkasteltaessa on hiilidioksidipitoisuuksien lisäksi tarpeen huomioida ihmisten lukumäärän vaikutus. Mittausten ensimmäisellä viikolla keskiviikkona 27.2, jolloin olosuhteita aulan ja luokan K1103 välillä tasattiin, luokassa K1103 oli normaalin ilmanvaihdon sammuttua klo 17:20 – 19:00 välisenä aikana keskimäärin 14 ihmistä. Toisen viikon keskiviikkona 13.3. taas oli samalla aikavälillä keskimäärin 11 ihmistä. Huolimatta siitä, että ensimmäisellä viikolla tilassa oli 3 ihmistä enemmän, pystyttiin luokan hiilidioksidipitoisuus pitämään noin 150 ppm alempana!

Tiistaiden tapauksessa vastaava tarkastelu antaa samansuuntaiset tulokset - hiilidioksidipitoisuus pysyy noin 100 ppm alempana, vaikka tilassa oli keskimäärin yksi ihminen enemmän olosuhteiden tasaamista hyödynnettäessä. Pienillä käyttäjämäärillä puhaltimien tehokkuus ei tule yhtä hyvin näkyviin kuin suuremmilla käyttäjämäärillä. Toisaalta, juuri runsaasti kuormitettuna hetkinä siirtoilmapuhaltimien tuleekin



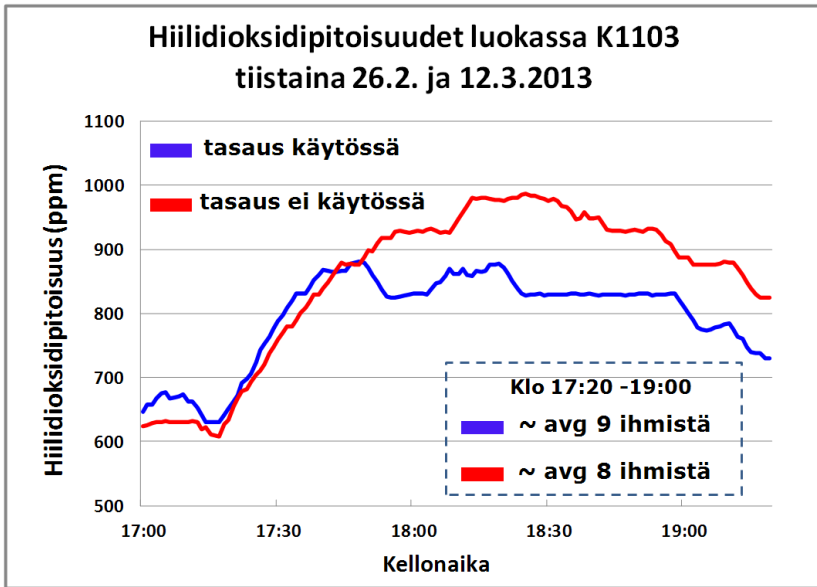
Kuva 6.9

Luokan K1103 hiilidioksidipitoisuudet tutkittuina keskiviikkoina. Ilman hiilidioksidipitoisuus pysyi olosuhteita tilojen välillä tasattaessa päiväkäyttöisen ilmanvaihdon sammuttua klo 17:15 alkaen noin 150 ppm alempana kuin ilman siirtoilmaa, vaikka tilassa oli siirtoilmapuhaltimia käytettäessä keskimäärin kolme ihmistä enemmän!

saada aikaan suurin vaikutus. Kuvissa 6.9 ja 6.10 esitetään luokan K1103 hiilidioksidipitoisuudet tutkittuina iltoina. Kuvaan 6.9 on otettu vertailuun keskiviikkojen pitoisuudet ja kuvaan 6.10 tiistaiden pitoisuudet.

Ilmaa aulasta luokkaan otetaan siis seinään tehtyjen aukkojen avulla Konetalon aulasta ja ilmaa poistetaan luokasta puhaltimin ATK-luokan vastakkaiselta seinältä saman aulan WC-käytävälle. Konetalon aulan sisäilman hiilidioksidipitoisuutta alla olevassa kuvassa esittää vaaleansininen käyrä ja WC-käytävän hiilidioksidipitoisuutta kellertävä käyrä. Kuvasta voidaan nähdä, ettei aulan WC-käytävän sisäilman laatu juurikaan kärsi luokan K1103 käytetyn ilman siirtämisestä sinne. Ero vaaleansinisen käyrän kuvaamaan aulan hiilidioksidipitoisuuteen on nähtävissä, mutta se on hyvin pieni. Tämä siitäkin huolimatta, että myös aulan koneellinen ilmanvaihto sammuu samaan aikaan kuin luokan K1103.

Aulan sisäilman laadun pysyminen hyvällä tasolla voidaan nähdä selittyvän kuormitusta vastaanottavan aulan suurella tilavuudella.

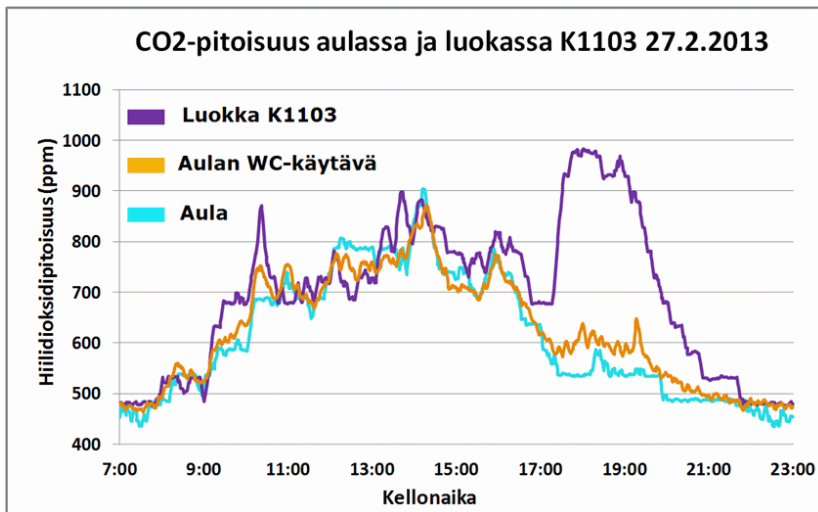


Kuva 6.10

Luokan K1103 hiilidioksidipitoisuudet tutkittuina tiistaina. Pitoisuus pysyi olosuhteita tasattaessa noin 100 ppm alempana kuin ilman, vaikka tilassa oli tuolloin keskimäärin yksi ihminen enemmän. Pienillä käyttäjämäärillä puhaltimien tehokkuus ei tule yhtä hyvin näkyviin kuin suuremmilla käyttäjämäärillä, mutta tulos on samansuuntainen.

Tietokonehuoneen hieman huonompilaatuinen ilma laimenee tehokkaasti suuremman tilan ilmaan eikä ongelmaa ilman laadussa synny. Kuormituksen tasaamisen idea huonontamatta minkään tilan ilman laatua merkittävästi toteutuu tässä tapauksessa hyvin.

Ilmanlaadun tilojen välinen tasaaminen vaikuttaa tietokonehuoneen K1103 tapauksessa toimivan sisäilman hiilidioksidipitoisuutta laskevana tekijänä. Luokan K1103 lämpötiloihin ei pystytty vaikuttamaan tämän tutkimuksen verrattain pienillä ilmamäärillä. Konetalon aulan ja tietokonehuoneen välisen seinän ilmajäälämmeneristävyyden ei heikentynyt merkittävästi siirtoilmalaitteiden asentamisesta. Kun tarkastellaan koko seinärakennetta, huomataan että luokasta aulaan johtaa kolme ovea, jotka eivät ole ääntä eristäviksi valmistettuja. Eristävyyden heikkenemisellä ei muutenkaan olisi ollut käytännön merkitystä tässä tilassa, jonka sisäiset äänilähteet ovat huomattavasti ulkoisia äänilähteitä suuremmat. Luokan 25 tietokonetta saavat aikaan huomattavasti korkeamman keskiäänitason kuin aulan normaali käyttö. Siirtoilmalaitteet ovat myös hyvin hiljaisia eivätkä aiheuta ilmajääntä tai runkoääntä.



Kuva 6.11

Normaalin arkipäivän hiilidioksidipitoisuudet Konetalon aulassa ja luokassa K1103, kun olosuhteita tilojen välillä tasattiin. Ilmaa olisi mahdollista siirtää tutkittua 120 L/s enemmänkin, sillä aulan ilmanlaatu ei merkittävästi huonone, vaikka luokan K1103 kuormitettua ilmaa puhalletaan siirtoilmalaitteiden avulla WC-käytävään.

## 6.6

# Siirtoilmapuhaltimien taloudellinen tarkastelu

*Siirtoilmapuhaltimet olivat niiden vaikuttavuuteen nähden pieni taloudellinen investointi. Investoinnin takaisinmaksuaika on vain muutamia kuukausia, jos verrataan tilanteeseen, jossa suurien ilmanvaihtokoneiden käyntiaikoja joudutaan venyttämään yhden pienen tilan takia.*

On selvää, että mikäli Konetalon suuria ilmanvaihtokoneita pidettäisiin arkipäivisin päällä kolme tuntia pidempään, pysyisi tietokonehuoneen K1103 sisäilman laatu hyvänä iltaisin. Lyhyt laskennallinen tarkastelu nostaa kuitenkin esille pienten siirtoilmalaitteiden käyttöä puoltavan taloudellisen seikan. Luokka K1103 sijaitsee alueella, jota palvelee 6100 L/s puhaltava tuloilmakone ja 5120 L/s poistava ilmanvaihtokone. Lisäksi on erillistä poistoilmanvaihtoa niin, että kokonaisuudessaan koneellisen poistoilman määrä on hieman tuloilmaa suurempi.

SFP-oppaan (LVI-talotekniikkateollisuus ry 2009, s. 6) mukaan ilmastovaihtojärjestelmän ominaissähköteho on rakennuksen koko ilmastovaihtojärjestelmän kaikkien puhaltimien, mahdollisten taajuusmuuttajien ja muiden tehonsäätölaitteiden yhteenlaskettu sähköverkosta ottama sähköteho jaettuna ilmastovaihtojärjestelmän koko mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla riippuen kumpi on suurempi. Konetalon tavanomaisen ilmastovaihtojärjestelmän ominaissähkötehoksi voidaan arvioida 2,5 kW/(m<sup>3</sup>/s). Tuloilman määrällä kerrottuna ilmastovaihtolaitteiden ottamaksi sähkötehoksi saadaan 15,25 kW. Käyttöaika ilmastovaihtokoneelle tulisi luokan K1103 vuoksi noin 60 tuntia lisää kuukaudessa. Tämä tarkoittaa 900 kWh:n sähkökulutusta kuukautta kohden. Sähkön maksaessa esimerkiksi 0,12 €/kWh aiheutuu ilmastovaihtokoneiden jatkoajasta joka kuukausi noin 110 euron lisä sähkölaskuun. Luokan K1103 siirtoilmavirta ottaen 8 watin ympäri vuorokautinen käyttö kuluttaa sähköä kuukaudessa hieman vajaa 6 kilowattituntia, eli normaaleihin ilmastovaihtokoneisiin nähden mitättömän vähän.

$$Q_{iv} = t_d \cdot t_v \cdot \rho_i \cdot c_{pi} \cdot q_{v,tilo} \cdot (T_{sp} - \Delta T_{puhallin} - T_{ho}) \cdot \Delta t / 1000 \quad (3.11)$$

jossa

$Q_{iv}$	ilmastovaihton lämmitysenergian nettotarve, kWh
$t_d$	ilmastovaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte, h/24h
$t_v$	ilmastovaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhte, vrk/7 vrk
$\rho_i$	ilman tiheys, 1,2 kg/m <sup>3</sup>
$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/(kg K)
$q_{v,tilo}$	tuloilmavirta, m <sup>3</sup> /s
$T_{sp}$	sisäänpuhalluslämpötila, °C
$\Delta T_{puhallin}$	lämpötilan nousu puhaltimessa, °C
$T_{ho}$	lämmöntalteenotolaitteen jälkeinen lämpötila, °C
$\Delta t$	ajanjakson pituus, h
1000	kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Kuva 6.12

Ilmastovaihton lämmitysenergian nettotarve lasketaan kuvassa esiintyvällä kaavalla. (Ympäristöministeriö 2012b, s. 21)



Puhaltimien sähkön lisäksi energiaa kuluu merkittävä määrä tuloilman lämmittämiseen. Konetalossa tuloilmaa lämmitetään kaukolämmöllä. Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema lämpömäärä riippuu ulkoilman lämpötilasta eli vuodenaikasta. Tarvittavan kaukolämmön määrän selvittämiseksi on laskettava ilmanvaihdon lämmitysenergian nettotarve. Nettotarve lasketaan Rakentamismääräyskokoelman osan D5 kaavan 3.11 (Ympäristöministeriö 2012b, s. 21) mukaan. Kaava esitetään kuvana 6.12.

Konetaloon liittyvistä arkistoista ja kojeluettelosta löytyi tieto, että kyseiset ilmanvaihtokoneet on varustettu lämmöntalteenotolla, jonka hyötysuhde on 37 prosenttia. Ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde on 10,5/24 ja viikoittainen 5/7. Tuloilman sisäänpuhalluslämpötilaksi arvioitiin tavanomainen 18 °C. Sää tiedot eli ulkolämpötilat laskentaan otettiin Rakentamismääräyskokoelman osan D3 taulukosta L2.2 (Ympäristöministeriö 2012a, s. 30). Näistä lähtötiedoista laskemalla saatiin tämän ilmanvaihtokoneen kaukolämmön tarpeeksi esimerkiksi neljän talvikuukauden joulukuusta maaliskuuhun noin 6000 kWh kilowattituntia kuukautta kohden ja vuoden kaikille kuukausille vuoden aikana keskimäärin 3200 kilowattituntia. Kaukolämmön maksaessa esimerkiksi noin 0,08 €/kWh tulee ilmanvaihtokoneiden lisätunneilta talvikuukausina noin 500 euroa lisäkustannusta. Vuoden ympäri laskettaessa lisähintaa yhdelle kuukaudelle tulee keskimäärin noin 260 euroa.

Otettaessa huomioon suurten ilmanvaihtokoneiden arkipäivien kolmen lisätunnin aiheuttama muutos kaukolämmön ja sähkön kulutuksessa, tulee kolmesta lisätunnista keskimäärin 370 euron lisäkustannukset kuukaudessa. Luokan K1103 siirtoilmalaitteet asennuksineen maksoivat yhteensä 1350 euroa, joten investoinnin takaisinmaksuajaksi saadaan vajaa neljä kuukautta. Takaisinmaksuajan jälkeen investointi on yhä kannattavampi, jos oletetaan energian hintojen nousevan totuttuun tahtiin.



**LASKEMINEN  
ON NOPEA TAPA  
TARKASTELLA SISÄILMAA  
JA ILMAVIRTOJA**

---

*Lukuisten erilaisten mittausasetelmien järjestäminen on työlästä ja runsaasti aikaa vievää. Näin on etenkin kohteissa, joissa mittauksia tehdään tilojen normaalin käytön lomassa. Niinpä mitattujen tulosten tueksi etsittiin laskennallisia tuloksia tilojen välillä esimerkiksi avonaisten ovien kautta vaihtuvista ilmamääristä erilaisissa tilanteissa. Kuten aiemmin raportissa huomattiin, lämpötilaerot voivat aiheuttaa ilman liikettä erilaisten aukkojen läpi. Lisäksi ilman liikettä voivat saada aikaan koneellisen ilmanvaihdon eri tilojen välille aikaansaamat paine-erot. Tässä luvussa keskitytään tarkemmin nimenomaan tilojen välisten lämpötilaerojen aikaansaamiin ilmavirtoihin.*

*Ensimmäisessä alaluvussa esitetään laskennassa käytetyt kaavat. Toisessa alaluvussa esitetään saadut tulokset, arvioidaan niiden vastaavuutta laskennallisiin tuloksiin sekä mietitään tuloksista tehtäviä johtopäätöksiä.*

## 7.1

# Laskennassa käytetyt kaavat ja menetelmät

*Tässä alaluvussa esitetään tämän luvun laskennallisissa tarkasteluissa käytettävät kaavat. Laskennallisesti tarkastellaan lämpötilaerojen aikaansaamia ilmavirtoja kahden vierekkäisen tilan välillä. Laskenta on tehokas ja nopea tarkastella tilojen välillä tapahtuvia ilmavirtauksia ja niiden mahdollisuuksia.*

Laskentaan otetaan mukaan sellaiset tapaukset, joissa yhteen tilojen väliseen seinään on tehty yksi tai kaksi ilma-aukkoa. Tarkasteltavissa aukoissa ei ole äänenvaimennusta tai muuta merkittävää painehäviötä aiheuttavaa rakennetta. Tällöin ilman lämpötilaerojen vaikutuksesta aiheutuvat niin sanotut luonnolliset paine-erot ovat riittävän suuria aiheuttamaan ilman liikettä aukkojen läpi.

**Ilmanvaihto yhden aukon läpi** voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$Q = \frac{C_d A}{3} \sqrt{\frac{g H \Delta T}{T_i}} \quad (1)$$

*jossa:*

- $C_d$  on aukon muotokerroin
- $A$  on aukon pinta-ala (m<sup>2</sup>)
- $g$  on putoamiskiikkyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $H$  on aukon korkeus (m)
- $\Delta T$  on tilojen välinen lämpötilaero (K)
- $T_i$  on sisälämpötila tai lämpötiloista korkeampi (K)

**Aukon muotokerroin** on dimensioton suure, joka **kuva**a aukon **tehokkuutta ilmavirtojen kulkureittinä**. Muotokerroin ottaa huomioon aukon muodon ja mitat sekä sijainnin seinällä, jossa aukko on. Aukon mitat ja sijainti vaikuttavat siihen, kuinka sujuvasti ilma virtaa aukon läpi. **Muotokertoimen arvo vaihtelee tyypillisesti välillä 0,5 – 0,7**. Putoamiskiikkyvyys sen sijaan on mukana kaavassa sen takia, että se vaikuttaa ilman erilaisista tiheyksistä aiheutuvien paine-erojen suuruuksiin. Aukon korkeus taas vaikuttaa ilmavirtaan aukon läpi.

Yhden aukon tapauksessa samassa aukossa tapahtuu ilmavirtaa kahteen suuntaan. Aukon alaosassa ilma virtaa toiseen suuntaan ja yläosassa toiseen suuntaan. Tämän vuoksi ilmavirta on integroitava aukon korkeuden yli. Tästä aiheutuu edelleen kaavan (1) nimittäjään kokonaisluku kolme, jota ei seuraavaksi esiteltävässä kahta aukkoa mallintavassa kaavassa ole.

Kun yhdellä seinällä on kaksi aukkoa eri korkeuksilla, tapahtuu molemmissa aukoissa ilmavirtausta pääsääntöisesti yhteen suuntaan. Tämä vähentää pyörteilyä aukolla ja tekee ilmavirtauksesta tehokkaampaa. **Kahden** samaa kokoluokkaa (toisen aukon pinta-ala on korkeintaan kolme kertaa toista suurempi) olevan **aukon yhteenlaskettu ilmanvaihto** voidaan laskea kaavalla:

$$Q = C_d A_{eff} \sqrt{\frac{gH\Delta T}{T_i}} \quad (2)$$

*jossa:*

- $C_d$  on aukkojen muotokerroin
- $g$  on putoamiskiihtyvyyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
- $H$  on aukkojen keskikohtien välinen etäisyys ( $m$ )
- $\Delta T$  on tilojen välinen lämpötilaero ( $K$ )
- $T_i$  on sisälämpötila eli lämpimämmän tilan lämpötila ( $K$ )
- $A_{eff}$  on aukkojen tehollinen pinta-ala, joka saadaan laskettua kaavalla:

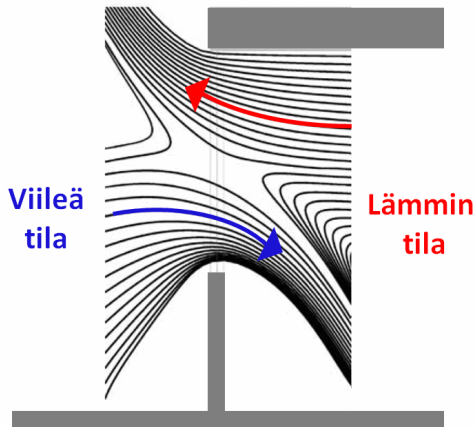
$$A_{eff} = A \left[ \frac{\epsilon \sqrt{2}}{(1+\epsilon) \sqrt{1+\epsilon^2}} \right] \quad (3)$$

*jossa:*

- $A$  on aukkojen yhteenlaskettu pinta-ala
- $\epsilon$  on aukkojen pinta-alojen suhde ( $A_1/A_2$ )

Kaavasta 3 ratkaisemalla voidaan todeta, että **aukkojen tehollinen pinta-ala on suurimmillaan silloin, kun aukkojen pinta-alat ovat yhtä suuret.**  $A_{\text{eff}}$  saa tällöin arvon  $A/2$ . Vertaamalla tätä yhden aukon kaavan 1 kertoimeen  $A/3$  voidaan todeta, että hyvin sijoitetun **kahden aukon pinta-ala on 50 % tehokkaampaa kuin yhden aukon pinta-ala.** Tämä toteutuu silloin, kun muut kaavojen muuttujat ovat arvoiltaan samat. Kaavassa 2 esiintyvä  $H$  on aukkojen keskikohtien välinen etäisyys ja kaavassa 1 esiintyvä  $H$  on yhden aukon korkeus. Yleensä kahden aukon keskikohtien välinen etäisyys muodostuu suuremmaksi kuin yhden aukon korkeus. Tämäkin on hyvä ottaa huomioon erilaisten tapauksien tehokkuuksia vertailtaessa. Lisäksi molemmissa kaavoissa esiintyvä aukon muotokerroin on useimmiten kahden aukon tapaukselle suurempi. Tämä edelleen kasvattaa kahden aukon tehokkuutta verrattuna yhteen aukkoon.

Kahden aukon tehokkuus selittyy sillä, että **kahden aukon tapauksessa ilma virtaa molemmissa aukoissa pääasiallisesti vain yhteen suuntaan.** Tällöin pyörteily on vähäisempää eikä aukkojen keskelle synny hiljaisten virtausten aluetta, joka on ilmanvaihdon kannalta turhaa aukon alaa. Kuva 7.1 visualisoi ilmavirtojen liikettä yhden aukon tilanteessa.



Kuva 7.1

Kun kahden tilan välillä on yksi aukko, tapahtuu ilmavirtausta samassa aukossa kahteen suuntaan. Lämmin ilma poistuu ylhäältä ja alhaalta tilalle virtaa viileämpää ilmaa. Aukon keskiosassa ilma seisoo tai korkeintaan pyörteilee vähän, joten se on tuulettamisen kannalta tehotonta aukon alaa.

## 7.2

# Laskennasta saadut tulokset – avoin ovi saa aikaan suuret ilmavirrat

*Tämän alaluvun alussa esitetään esimerkkitapauksia kaavojen 1, 2 ja 3 avulla lasketuista mielenkiintoisista tuloksista. Kuvissa esitetään niin laskentojen lähtötiedot kuin tuloksetkin. Kuvia toisiinsa vertaamalla voi saada kuvaa erilaisten aukkojen läpi virtaavista ilmamääristä.*

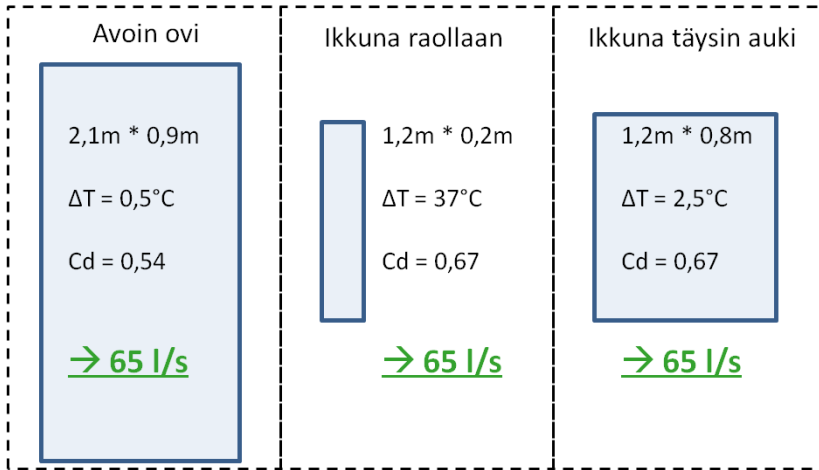
Usein ajatellaan, että ikkunan avaamisen ulos on tehokkain tapa tuulettaa esimerkiksi makuuhuonetta tai toimistohuonetta pitkän tilassa oleskelun jälkeen. Laskennallisesti, ja aiemmin myös mittauksin, saadut tulokset osoittavat kuitenkin toista. **Ovi osoittautuu lähes poikkeuksetta tehokkaimmaksi tavaksi tuulettaa.** Ovi esimerkiksi neuvotteluhuoneesta viereiseen käytävään tai makuuhuoneesta olohuoneeseen avattaessa saadaan aikaan ikkunan avaamista suurempi ilmavirta. **Oven avaaminen sisätilaan on siis parempi tapa tuulettaa ihmisten läsnäololla kuormitettu tila kuin ikkunan avaaminen ulos.** Tämä tietenkin edellyttää, että kuormitetun tilan viereisessä tilassa on verrattain raikasta ja puhdasta sisäilmaa. Useimmissa tapauksissa tämä toteutuu, sillä avaran, hyvin ilmastoidun tilan sisäilmaa voidaan pitää yhtä puhtaana kuin ulkoilmaa. Rakennuksen sijainti esimerkiksi vilkkaasti liikennöidyn



tien varrella tai siitepölyä tuottavien kasvien tai puiden vieressä tekee sisäilmaan tuulettamisesta entistä kannattavampaa.

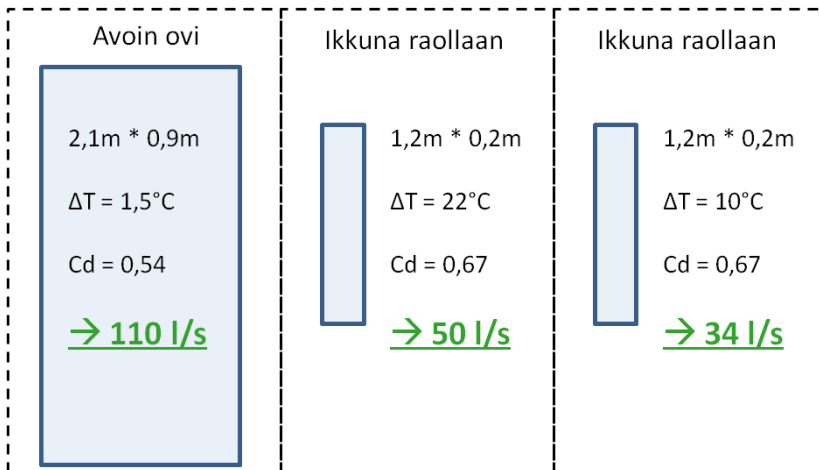
**Oven paremmuus selittyy** sen muodostaman virtausaukon huomattavasti normaalia ikkunaa **suuremmalla pinta-alalla**. Laskennassa on oletettu, että ovi avataan kokonaan ja ikkuna raolleen, kuten useimmiten tuulettaessa tapahtuu. Myös lämpötilaerolla on merkittävä vaikutus ilmavirtojen suuruuteen. Tämän vuoksi laskentaan otettiin mukaan myös erilaisia lämpötilaeroja, jotka esimerkiksi ulos avattavan ikkunan laskennassa mallintavat eri vuodenaikoja.

Tuuletettavan huoneen lämpötilaksi oletettiin 22°C. Ulkoilmalle annettiin eri arvoja -15°C:n ja +10°C:n väliltä. Tuuletettavan tilan oletettiin olevan puoli, yksi tai kaksi astetta tuulettavaa tilaa lämpimämpi. Lämpötilaerot siis vaihtelivat 0,5 asteesta 37 asteeseen. Aukon muotokertoimen (Cd) arvo määräytyi aukon muodon sekä korkeussuuntaisen sijainnin perusteella väliltä 0,54 ja 0,70. Kuvissa 8.1 ja 8.2 näytetään esimerkkitapauksia laskennassa käytetyistä lähtöarvoista ja saaduista tuloksista.



Kuva 7.2

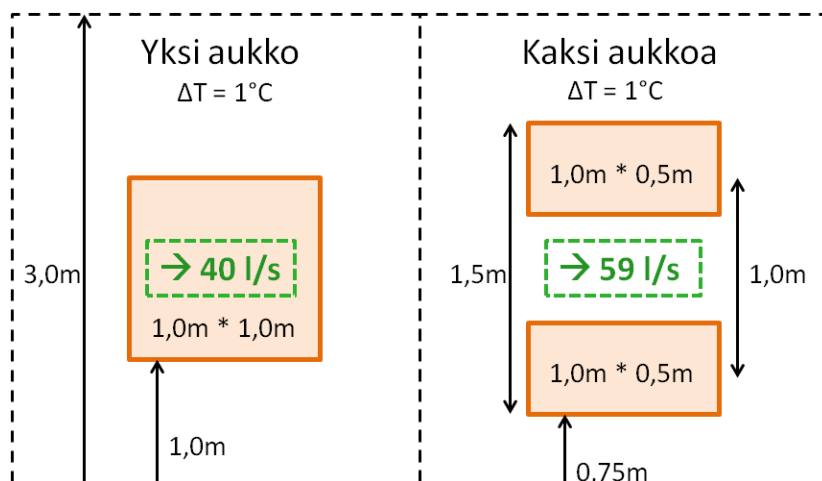
Lähtöarvoja ja laskennallisia tuloksia aukkojen läpi virtaavista ilmamääristä. Avoin ovi on erittäin tehokas. Kun ikkuna ulos avataan 15-asteen pakkasella, saadaan aikaan ilmanvaihtuvuutta noin 65 litraa sekunnissa. Sama ilmavirta saadaan aikaan avaamalla ovi vain puoli astetta lämpimämpään viereiseen sisätilaan! Mikäli ikkuna voidaan avata täysin auki, riittää 65 L/s ilmanvaihtoon 2,5 asteen lämpötilaero.



Kuva 7.3

Kun ulkolämpötila on nollan tienoilla ( $\Delta T=22^{\circ}\text{C}$ ) tai kymmenisen astetta plussan puolella ( $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ) erottuu ovi yhä selvemmin paremmaksi vaihtoehdoksi tuuletukseen. Tilojen välisellä puolentoista asteen lämpötilaerolla oven aiheuttamaksi ilmanvaihtuvuudeksi saatiin 110 litraa sekunnissa.

Kun samalla seinällä on kaksi aukkoa, käytetään laskennassa kaavoja 2 ja 3. Seuraavissa kuvissa esitetään laskentatulosten vertailu tapauksista, joista ilmenee kahden erillään olevan aukon tehokkuus verrattuna yhteen aukkoon. Tarkasteltavaksi valittiin tapaus, jossa kahden aukon yhteenlaskettu pinta-ala on yhtä suuri kuin yhden aukon pinta-ala. Tilojen välisenä lämpötilaerona käytettiin tässä laskennassa yhtä celsiusastetta.



Kuva 7.4

Kahden aukon laskennassa käytetyt mitat ja muut lähtöarvot. Laskennassa vertailtiin yhden ja kahden aukon pinta-alojen tehokkuuksia. Lämpötilaerojen ja aukkojen pinta-alojen ollessa samat, kahden aukon tehokkuus on noin 50 % tehokkaampaa kuin yhden aukon pinta-ala. Aukkojen sijoittuminen seinälle sekä muut kuvassa esitetyt mitat vaikuttavat kulkevien ilmavirtojen suuruuksiin.

## 7.3

# Tilatehokkuuden vaikutus olosuhteiden tasaamisen toimivuuteen

*Kuormitetun tilan sisäilman laadun parantaminen tasaamalla olosuhteita viereisten tilojen kesken vaatii toimiakseen tilaa, jonka hyvää ilmanlaatua voidaan hyödyntää tasaamisessa. On selvää, että olosuhteita voi parantaa vain tasaamalla olosuhteita hyvän ilmanlaadun omaavien tilojen kanssa. Tässä alaluvussa tarkastellaan laskennallisesti tilatehokkuuden sekä koneellisen ilmanvaihdon tehokkuuden vaikutusta ilmanlaadun tasaamisen toimivuuteen ilmanlaatua parantavana tekijänä.*

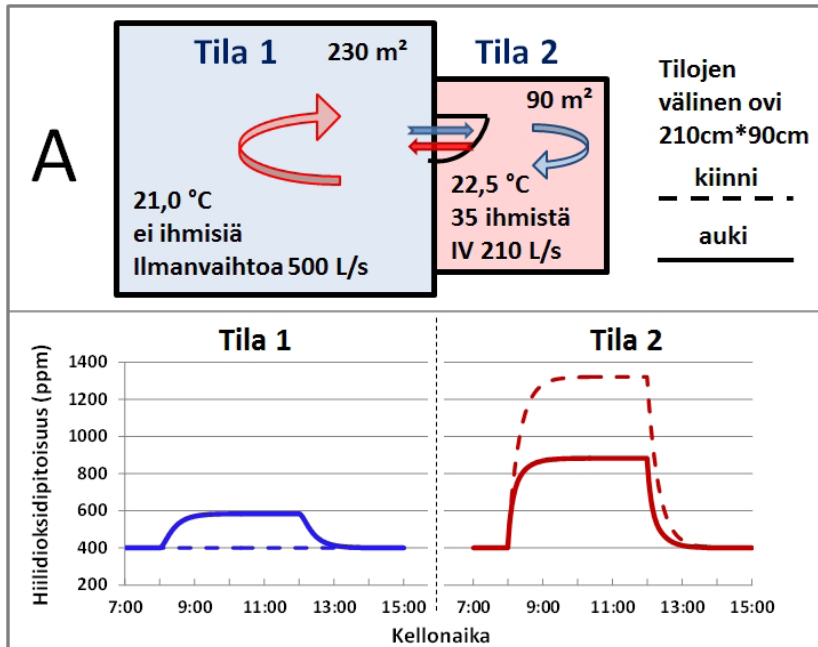
Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitetty ja tämän tutkimusraportin alaluvussa 3.4 esitelty huoneiden hiilidioksidipitoisuuden laskentamenetelmä (Kalema et al. 2013) osoittautui käytännölliseksi ja toimivaksi työkaluksi myös tässä käyttötarkoituksessa. Ajatuksena oli tarkastella olosuhteiden tasaamisen tehokkuutta ilmanlaatua parantavana tekijänä tilojen erilaisissa kuormitustilanteissa. Kuormitetun tilan ilmanlaadun parantumisen lisäksi saataisiin tietoa siitä, kuinka

negatiivisesti olosuhteiden tasaaminen vaikuttaa tilaan, jossa on lähtökohtaisesti parempi ilmanlaatu. Laskentojen lähtökohdaksi otettiin kaksi vierekkäistä tila joiden välillä on normaalikokoinen leveä ovi.

Ensimmäisessä laskennassa otettiin tarkasteluun Tila 1 ja Tila 2. Laskennassa vertailtiin Tilan 1 ilmanvaihdon sekä kuormituksen muutosten vaikutuksia sen kykyyn parantaa Tilan 2 ilmalaatua. Tila 1 oli tiloista suurempi, 230 lattianeliometriä. Tila 2 oli hieman pienempi, pinta-alaa 90 m<sup>2</sup>. Molempien tilojen korkeudeksi asetettiin 2,8 metriä. Tila 2 mallinnettiin kuormitetummaksi tilaksi, jonka ilmanlaatua pyrittiin parantamaan tasaamalla kuormitusta Tilaan 1. Tilojen välille mallinnettiin avoin ovi, korkeus 210 cm ja leveys 90 cm, jota auki pitämällä tilojen välistä ilmanvaihtoa ja edelleen olosuhteiden tasoittumista tapahtui. Tilojen välillä ajateltiin olevan 1,5 asteen lämpötilaero. Tällaisen lämpötilaeron on käytännön mittauksissa huomattu syntyvän tilojen välille, mikäli kuormituksessa, esimerkiksi juuri läsnä olevien ihmisten lukumäärissä, on eroja.

Esimerkkitapauksiksi otettiin kolme eri tilannetta eli tapausta, joissa Tiloissa 1 ja 2 oli ihmisiä kello 8:00 – 12:00 välisen ajan. Tapauksessa A Tilassa 1 ei ollut ihmisiä ja ilmanvaihdon määrä siellä oli 500 L/s. Tällaisen tai vastaavan tilanteen voidaan usein huomata toteutuvan esimerkiksi julkisissa rakennuksissa, joissa on suuria auloja ja käytäviä. Tapauksessa B Tilan 1 ilmanvaihdon määrä oli 240 L/s ja tilassa oli 10 henkilöä, eli ilmanvaihtoa oli nyt siellä 24 L/s henkilöä kohden. Tapauksessa C Tilan 1 ilmanvaihdon määrä oli myös 240 L/s. Tapauksessa C tilassa oli kuitenkin 20 henkilöä, eli ilmanvaihtoa oli 12 L/s henkilöä kohden. Tilan 2 ihmiskuormitus ja ilmanvaihto sen sijaan pidettiin kaikissa kolmessa tapauksessa samana. Tapauksissa A, B ja C 35 ihmistä ja ilmanvaihtoa 210 L/s eli 6 L/s henkilöä kohden. Tila 2 oli siis tiloista kuormitetumpi, sinne haettiin ilmanlaadun parantumista tasaamisen avulla. Jokaisesta tapauksesta mallinnettiin vertailuksi tapaus, jossa tilojen välinen ovi oli kiinni eikä ilmanlaadun tasaantumista tilojen välillä päässyt tapahtumaan.

Laskennasta saatiin mielenkiintoisia tuloksia, joita esitetään kuvissa 7.5, 7.6 ja 7.7, joista voidaan kootusti nähdä niin laskennan lähtötiedot kuin tuloksetkin. Omana yksittäisenä tilanaan, ovi tilojen välillä suljettuna, Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus nousee 35 ihmisen läsnä ollessa arvoon 1320 ppm, joka on yli tyydyttävänä pidetyn arvon 1200 ppm. Mikäli tilojen välistä ovea pidetään auki, saa se puolentoista asteen

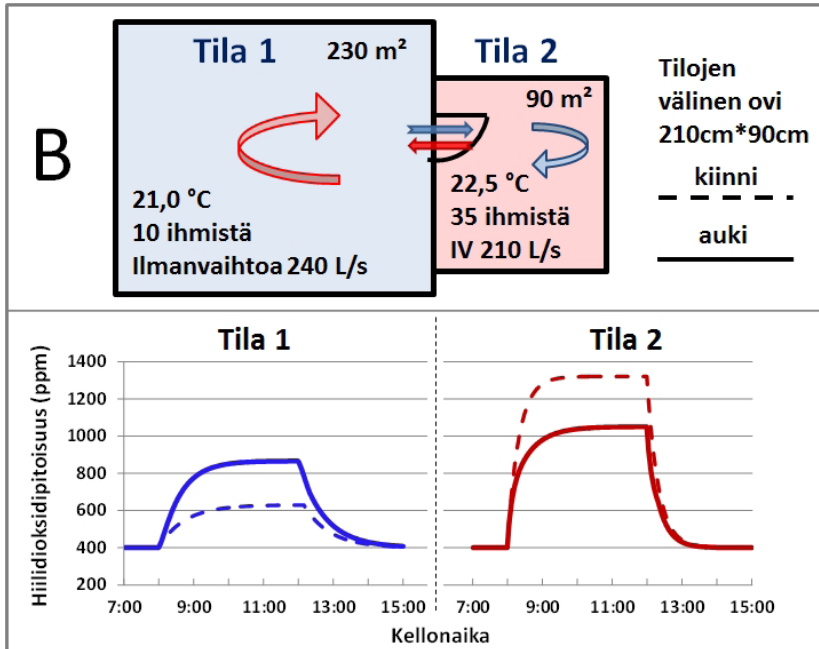


Kuva 7.5

Tilojen 1 ja 2 sisäilman hiilidioksidipitoisuudet tapauksessa A. Yhtenäinen viiva näyttää tuloksen tilanteessa, jossa tilojen välinen ovi on auki ja katkoviiva oven ollessa kiinni. Tilojen välistä ovea auki pitämällä saadaan aikaan merkittävää ilmanlaadun parantumista Tilassa 2. Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus pysyy 500 ppm alempana! Tilan 1 mitoituksen ollessa väljä, ei senkään ilmanlaatu juuri heikkene olosuhteiden tasaamisesta.

lämpötilaerolla aikaan tilojen välistä ilmanvaihtoa 300 litraa sekunnissa. Niinpä oven ollessa avoinna tilojen väliset olosuhte-erot tasoittuvat Tilan 1 ja Tilan 2 välillä. Tilan 2 ollessa kuormitetumpi sen olosuhteet paranivat merkittävästi avoimen oven ja Tilan 1 kapasiteetin ansiosta.

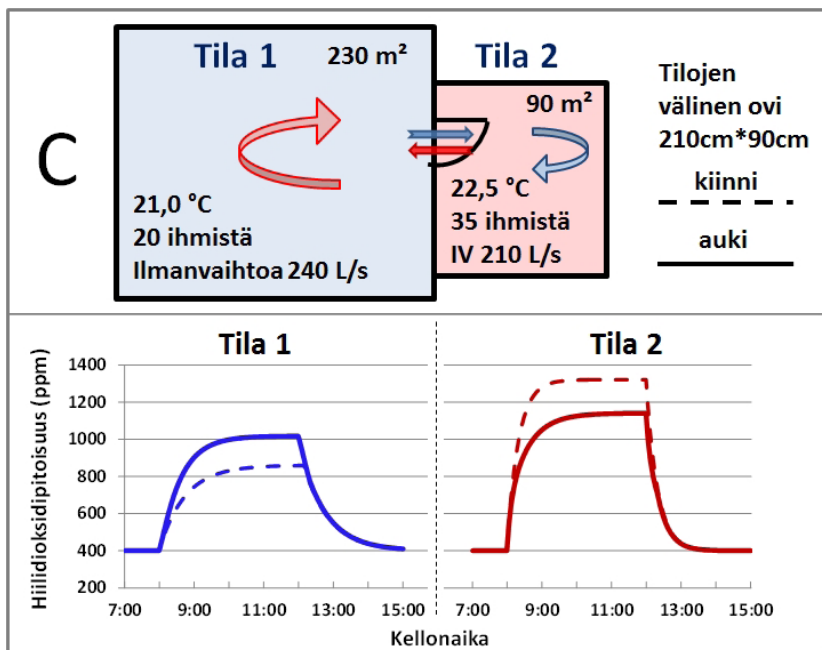
Tapauksessa A Tilasta 1 on merkittävin apu Tilan 2 ilmanlaatuun. Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus jääkin arvoon 820 ppm, eli 500 ppm matalammalle kuin tapauksessa, jossa ilmanlaadun tasaamista ei hyödynnetä! Tilan 1 ilmanlaatu ei juuri heikkenny olosuhteiden tasaamisesta, koska sillä on runsaasti kapasiteettia ottaa vastaan Tilan 2 kuormitettua ilmaa. Tapauksessa B myös Tilassa 1 on kuormitusta eikä tasaamalla päästä aivan yhtä hyvin lukemiin kuin tapauksessa A. Tapauksessa B Tilan 2 ilman



Kuva 7.6

Tapauksessa B myös Tilassa 1 on merkittävää kuormitusta eikä ilmanlaadun tasaaminen toimi aivan yhtä tehokkaasti kuin tapauksessa A. Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus jää arvoon 1050 ppm, joka on kuitenkin 270 ppm alempi pitoisuus kuin suljetulla ovelle. Tilan 1 ilmanlaatu heikentyy tasauksesta sen verran, ettei se ole enää erinomaista alle 700 ppm luokkaa.

hiilidioksidipitoisuus jää arvoon 1050 ppm, joka on kuitenkin 270 ppm alempi pitoisuus kuin suljetulla ovelle. Ilmanlaadun tasaamisen kannalta heikoimmassa tapauksessa C Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus nousee arvoon 1140 ppm, joka on kuitenkin sekin noin yhden sisäilmastoluokan verran parempi arvo kuin vailla oven tasaavaa vaikutusta. Tilan 1 kyky parantaa Tilan 2 ilmanlaatua ei kuitenkaan ole tapauksessa C paras mahdollinen, sillä tilan ilman hiilidioksidipitoisuus nousee yli 800 ppm:n jo ilman Tilasta 2 tulevan kuormituksen vaikutustakin.



Kuva 7.7

Tapaus C. Kun ilmanlaatua parantava tila on runsaammin kuormitettu sen ilmanvaihtokapasiteettiin nähden, heikentyy sen kyky parantaa kuormitetun tilan ilmanlaatua. Tässä tapauksessa C olosuhteiden tasaamisen teho ilmanlaatua parantavan tekijänä osoittautui vaatimattomimmaksi, mutta havaittavissa vaikutus on tässäkin tapauksessa. Tilan 2 ilman hiilidioksidipitoisuus jää 180 ppm alhaisemmaksi olosuhteiden tasaamista hyödynnettäessä.

Laskennallisissa tarkasteluissa havaittiin, että avoimen ilmayhteyden, esimerkiksi auki olevan oven, avulla voidaan tasata ja edelleen merkittävästi parantaa kuormitetuimpien tilojen ilmanlaatua tarpeen mukaan. Ilmanlaadun tasaamisen kannalta on kuitenkin tärkeää, että kuormitusta vastaanottavan tilan mitoitus on tilojen ja ilmanvaihdon kannalta melko väljä. Kuormitusta vastaanottavan tilan ilmanvaihdon tehokkuudella sekä kuormitustilanteella on merkittävä vaikutus tasausidean toimivuuteen. Mikäli kuormitusta vastaanottava tila on väljästi mitoitettu, tasaamisidea on tehokas tuuletettavan tilan kannalta eikä tuulettavan tilan ilmanlaadussa tapahdu merkittävää heikentymistä olosuhteiden tasaamisen vuoksi (tapaus A). Sen sijaan, mikäli kuormitusta vastaanottavan tilan on jo itsessään melko kuormitettu, ei olosuhteiden



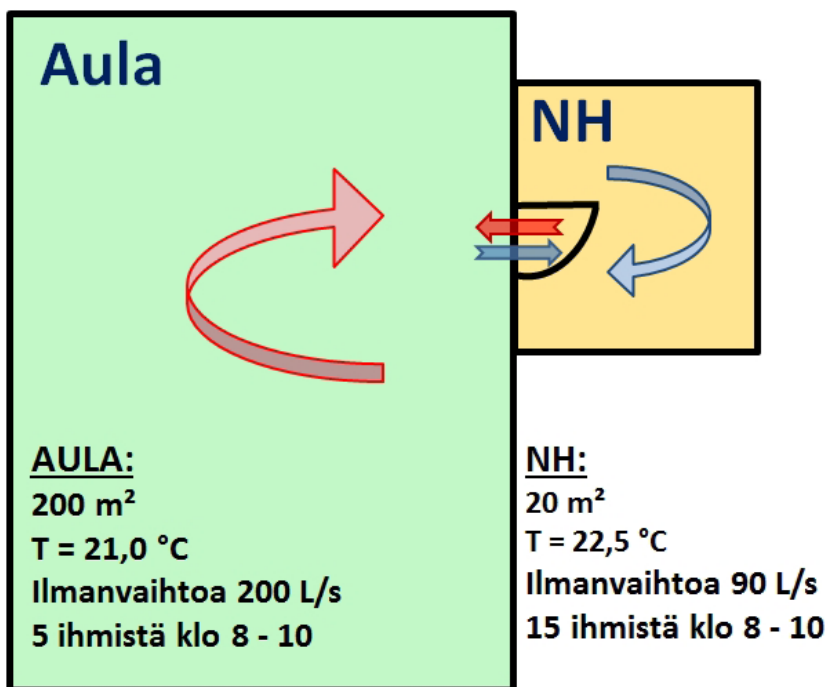
tasaaminen toimi niin tehokkaasti (tapaus C). Jokaisessa tapauksessa ilmanlaadun tasaamatta jättäminen, tässä tapauksessa oven pitäminen kiinni, on kuitenkin kuormitetun tilan ilmanlaadun kannalta selväsi huonoin vaihtoehto.

Toisessa laskentatapauksessa tarkasteltiin neuvotteluhuonetta suurehkon aulan vieressä. Tässä tapauksessa ajatuksena oli tutkia, kuinka paljon ilmanvaihdon puolesta määräysten mukaisen neuvotteluhuoneen ilmanlaatua voidaan parantaa avaamalla ovi viereiseen aulaan. Oven avaamisen tehokkuuden lisäksi haluttiin tietoa siitä, miten kuormaa vastaanottavan tilan tilavuus vaikuttaa ilmanlaadun tasaamisidean toimivuuteen.

Laskentatapaus rakennettiin hieman samankaltaisesti kuin edellä käsitelty tapaus. Suuren aulan vieressä on pienempi ja kuormitetumpi neuvotteluhuone, jonka ilmanlaatua on tarkoitus parantaa tasaamalla olosuhteita tilojen välillä. Aulan lattiapinta-alaksi asetettiin 200 m<sup>2</sup> ja neuvotteluhuoneen 20 m<sup>2</sup>. Aulassa ajateltiin oleskelevan viisi ihmistä ja neuvotteluhuoneessa 15 ihmistä, molemmissa klo 08:00 – 10:00 välisen ajan. Neuvotteluhuoneen ilmanvaihdon suuruus oli 90 L/s eli Rakentamismääräyskokoelman (RakMK D2 2012, s. 4) henkilöperusteisen neuvotteluhuoneen mitoituksen (6 L/s, hlö) suuruinen. Aulassa ilmanvaihtoa asetettiin olevan yhteensä 200 L/s. Neuvotteluhuoneen kokoon nähden suuresta henkilökuormasta johtuen neuvotteluhuoneen lämpötilan ajateltiin nousevan 22,5 °C:een, eli puolitoista astetta korkeammaksi kuin aulan 21,0 °C. Kuva 7.8 esittää toisen laskentatapauksen lähtötiedot.

Kuvaan 7.9 on koottu laskennan tulokset neljäksi käyräksi. Vihreillä käyrillä näytetään neuvotteluhuoneen pitoisuudet ja sinisillä aulan. Katkoviivat kuvaavat tapauksia, joissa tilojen välinen ovi on suljettuna ja yhtenäiset viivat tapauksia, joissa ovi on auki. Näin on helppo vertailla olosuhteiden tasaamisen vaikutusta hiilidioksidipitoisuuksiin.

Laskennan tuloksista voidaan nähdä, että määräysten mukaan mitoitettun neuvotteluhuoneen ilmanlaatua voidaan merkittävästi parantaa avaamalla neuvotteluhuoneen ovi viereiseen tilaan. Määräysten mukaisella ilmanvaihdolla varustettun neuvotteluhuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuus nousee ja tasaantuu melko nopeasti arvoon 1100 ppm. Oven ollessa avoinna neuvotteluhuoneen hiilidioksidipitoisuuden nousunopeus on huomattavasti hitaampaa. Oven ollessa kiinni pitoisuus nousee korkeimpaan arvoon noin 30 minuutissa. Aukinaisella ovella

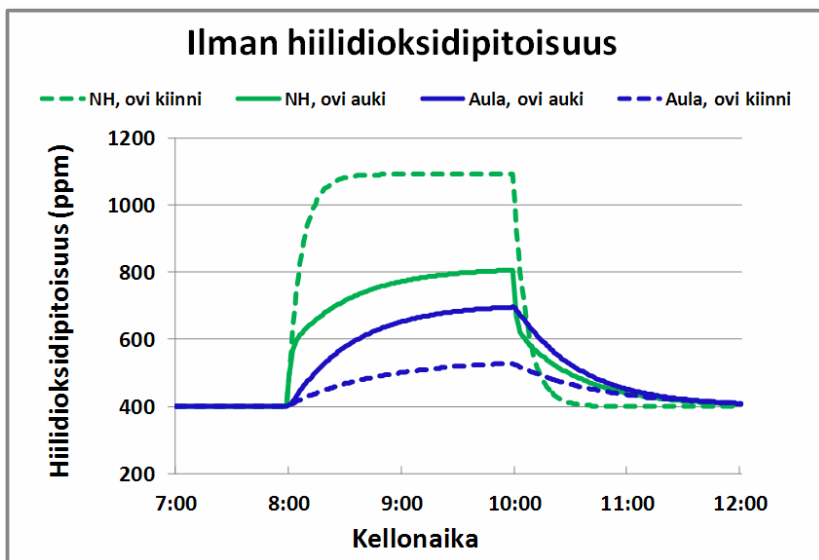


Kuva 7.8

Aulan ja neuvotteluhuoneen laskennan lähtötiedot. Lähtökohdaksi tähän laskentaan otettiin määräysten mukaan mitoitettu normaalissa käytössä oleva neuvotteluhuone sekä väljästi mitoitettu aula, jossa oleilee muutamia ihmisiä.

pitoisuuden nousuun menee noin kaksi tuntia. Lisäksi korkein pitoisuuden arvo jää 300 ppm alemmaksi kuin suljetun tilan tapauksessa! Olosuhteiden tasaaminen toimii tässä tapauksessa erinomaisesti neuvotteluhuoneen hyväksi. Aulan ilmanlaatu toki hieman heikkenee kun kuormitetun neuvotteluhuoneen ovi sinne avataan. Oven avaamisesta johtuva hiilidioksidipitoisuuden nousu on aulassa kuitenkin hyvin maltillinen 100 ppm. Aulan pitoisuus pysyykin oven avaamisesta huolimatta alle erinomaisena pidetyn 700 ppm:n.

Olosuhteiden tasaamiseen osallistuvien tilojen lähtökohtaisilla olosuhteilla on merkittävä vaikutus tasaamisidean toimivuuteen. On tärkeää, että idean toteuttamiskelpoisuus tarkastellaan aina tapauskohtaisesti. Ehtona ilmayhteyden, esimerkiksi oven, avaamisen toimivuudelle ilmanlaadun parantajana on, että parannettavassa tilassa on lämpökuormia, esimerkiksi ihmisiä ja tietokoneita, aiheuttamassa lämpötilaeroa tilojen välille. Toki myös tuulettavan tilan poikkeuksellisen matala lämpötila toimii. Ehtona on myös, että neuvotteluhuoneen oven takana on tarjolla raitista ilmaa sekä mieluiten runsaasti tilavuutta, johon kuormitus voi tasaantua. Olosuhteiden tasaamisessa kuormitusta vastaanottavan tilan suuresta tilavuudesta on hyötyä, sillä pitoisuuksien nousunopeus laskee tilavuuden kasvaessa.



Kuva 7.9

Aulan ja neuvotteluhuoneen laskentatapauksen tulokset. Tilojen välillä auki oleva ovi sekä hidastaa määräysten mukaisella ilmanvaihdolla varustetun neuvotteluhuoneen hiilidioksidipitoisuuden nousua että laskee sen korkeinta arvoa noin 300 ppm! Aulassa pitoisuus nousee avoimen oven takia noin 100 ppm, mutta tässä tapauksessa pysytään silti erinomaisessa ilmanlaadussa

## 7.4

# Tietokonelaskenta tekee ilmavirtaukset näkyviksi

*Tietokonetekniikan ja laskentatapojen kehittyessä virtausten mallintaminen tietokoneilla on yhä käyttökelpoisempi tapa tarkastella virtauksiin liittyviä ilmiöitä. Yhä useammissa tapauksissa tietokonelaskenta on havainnollinen vaihtoehto tarkastella myös tilojen välisten ilmavirtausten suuruuksia.*

Sveitsiläisen tutkimuksen (Favarolo ym, 2005) lähtökohtana oli tutkia luonnollisen ilmanvaihdon mahdollisuuksia toimistorakennusten yöjäähdytyksessä. Tutkimuksessa mallinnettiin tietokoneavusteisella CFD-laskennalla (Computational Fluid Dynamics) lämpötilaerojen aiheuttamia ilmavirtoja erilaisten yhdellä seinällä sijaitsevien aukkojen läpi. Saatujen ilmavirtojen avulla selvitettiin edelleen aiemmin tässä luvussa esitetystä kaavasta 1 muotokerroin tietyille aukkoasetelmille.

Sveitsiläisen tutkimuksen laskennallisista tuloksista huomattiin, että sivuseinän etäisyydellä aukosta ei tutkimuksen mukaan ole vaikutusta muotokertoimeen kunhan etäisyys on yli 20 cm. Kuva 7.10 on sveitsiläisestä tutkimuksesta ja se näyttää ilmavirtojen nopeuksia aukolla ja tuuletettavassa huoneessa kun tilojen välinen lämpötilaero on 0,6 celsiusastetta. Kuvasta voidaan nähdä, että ilmavirtojen nopeudet ovat melko alhaisia.

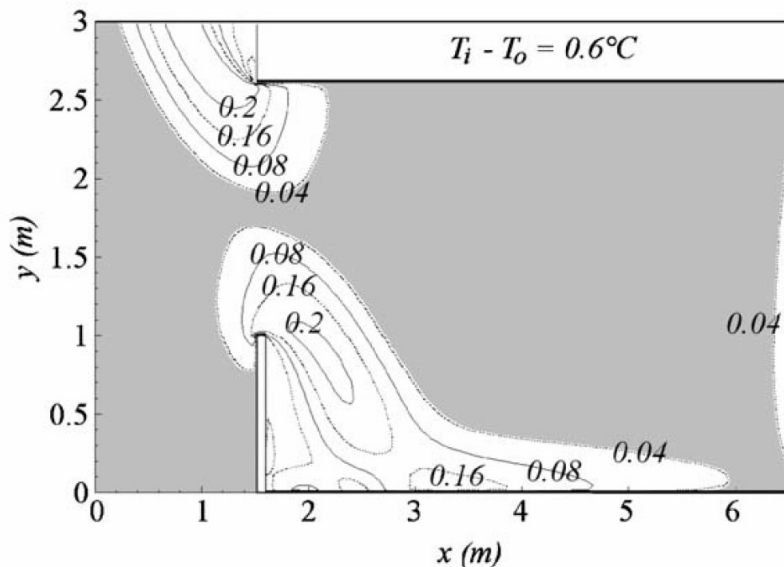
Kuva 7.11 on samaisesta sveitsiläisestä tutkimuksesta ja se näyttää aukon muotokertoimen aukon korkeussuuntaisen sijainnin, niin sanotun dimensiottoman korkeuden, funktiona. Dimensioton korkeus määritetään kaavalla:

$$H^* = \frac{d_l}{(H_{huone} - H)} \quad (4)$$

*jossa:*

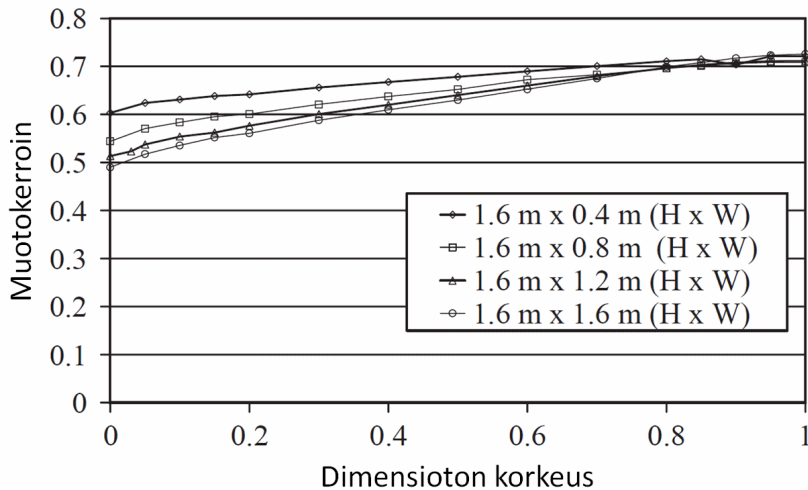
- $H^*$  on dimensioton korkeus
- $d_l$  on aukon alareunan etäisyys lattiasta
- $H_{huone}$  on huoneen korkeus
- $H$  on aukon korkeus

Kaavan määritelmästä seuraa, että kun  $H^*$  on nolla, aukko on aivan alhaalla lattian rajassa. Kun  $H^*$  on yksi, aukko on kiinni katossa. Korkeussuunnassa seinän keskivaiheilla oleva aukko antaa dimensiottoman korkeuden arvoksi jonkin arvon väliltä nolla ja yksi.



Kuva 7.10

Tietokoneella laskettuja ilmavirtojen nopeuksia, kun tilojen välillä on aukko ja tilojen välinen lämpötilaero on 0,6 celsiusastetta. Harmailla alueilla ilmavirtauksien nopeus on alle 0,04 m/s. (Favaro lo ym, 2005)



Kuva 7.11

Neljän samankorkuisen mutta erilevyisen ilma-aukon muotokerroin dimensiottoman korkeuden ( $H^*$ ) funktiona. Kaikkien aukkojen muotokerroin on noin arvossa 0,7 ja hieman yli kun aukko on aivan ylhäällä. Lähellä lattiaa olevien aukkojen muotokerroin taas jää arvotaan välille 0,5 – 0,6. Ylhäällä katon rajassa oleva aukko voi siis olla jopa 40 % tehokkaampi kuin alhaalla lähellä lattiaa oleva vastaava aukko! (Favaro lo ym, 2005)





**YHTEENVETO  
ja johtopäätökset**

---



*Tässä luvussa vedetään yhteen tärkeimmät tutkimuksessa saadut tulokset ja johtopäätökset. Luvussa esitetään tutkimuksessa tehdyt tärkeimmät havainnot tiloittain.*

# Olosuhteiden tasaaminen monitilatoimisto Syklingissä

- Kokoonmistila Loungen ilmanlaadun huomattiin pysyvän suurilla ihmismäärillä parempana kuin mihin sen koneellisen ilmanvaihdon määrän 215 L/s perusteella olisi pitänyt pystyä.
- Loungen hyvänä pysyneeseen ilmanlaatuun löytyi selitys siitä, että Loungeen kohdistuva kuormitus pääsee tasoittumaan toimiston muihin tiloihin tilat yhdistävän käytävän kautta.
- Käytävän avulla Loungen ilmanvaihdon määrä lähes kaksinkertaistuu 215 L/s → 410 L/s! Esimerkiksi 35 henkilön kokoontumisessa hiilidioksidipitoisuus pysyi näin ollen noin 1000 ppm:ssä, kun se vailla käytävän kautta kulkevan ilman vaikutusta olisi noussut 1300 ppm:ään.
- Käytävää pitkin kulkeutuvan ilman avulla koko toimiston ilmanvaihto osallistuu Loungen ilmanvaihtoon. Ilmiö toimii tarpeen mukaan myös toisinpäin, eli Loungen ollessa tyhjillään sen raikasta ilmaa kulkeutuu muualle toimistoon. Avoimet tilat toteuttavat ilmanvaihdon tarpeenmukaisuuden ideaa kuin itsestään.
- Kuormitetun tilan huonompilaatuinen ilma jakaantuu avoimessa monitilatoimisto Syklingissä niin suurelle alalle, kuormitettua ilmaa vastaanottavissa tiloissa mitattiin vain pientä hiilidioksidipitoisuuden nousua.
- Oven avaamisen huomattiin olevan tehokas tapa tuulettaa ihmisten läsnäolon kuormittamia neuvottelutiloja. Oven avaamisen tehokkuus todettiin myös mittauksin. Pienessä neuvotteluhuone Mekrissä oven avaaminen kolminkertaistaa tilan ilmanvaihdon. Esimerkiksi 5 henkilön tapaamisessa oven ollessa kiinni hiilidioksidipitoisuus nousi

noin 1200 ppm:ään, mutta kun ovi avattaessa hiilidioksidipitoisuus romahti 700 ppm:ään pysyen siellä palaverin loppuun asti.

- Jo raollaan oleva ovi parantaa pienen neuvotteluhuoneen sisäilman laatua! Neljällä ihmisellä ja ovi kiinni päädytään noin pitoisuuteen 1100 ppm. 3-4 senttimetriä avoinna oleva ovi saa pitoisuuden pysymään noin 900 ppm:ssä!
- Ihmiset kokivat ilman raikastuvan ja viilenevän neuvotteluhuoneen oven avaamisen jälkeen. Mittaukset kuitenkin osoittivat vakaata lämpötilan nousua koko tapaamisen ajan. Vaikuttaa siltä, että hiilidioksidipitoisuuden lasku koetaan ehkä lämpötilan laskuna. Tätä hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan yhteisvaikutusta ei ole vielä missään tutkittu kattavasti.
- Hiilidioksidipitoisuus ja suhteellinen kosteus reagoivat ihmisten läsnäoloon ja muuttuviin tilanteisiin, esimerkiksi oven avaamiseen, samankaltaisesti. Molemmissa suureissa muutokset ovat nopeita, mutta suhteellisessa kosteudessa muutokset ovat verrattain pienempiä kuin hiilidioksidipitoisuudessa.
- Aukon avaamisen tehokkuus perustuu kuormitetun ja kuormittamattoman tilan väliseen lämpötilaeroon ja lämpötilaerosta aiheutuviin ilmavirtauksiin. Oven avaamisen tehokkaampi vaikutus esimerkiksi ikkunaan verrattuna selittyy oviaukon suurella pinta-alalla.
- Pienen neuvotteluhuoneen oven avaaminen pienentää lämpötilaeroa tilojen väliltä, muttei poista sitä. Luonnostaan syntyviä konvektiivisia ilmavirtauksia siis tapahtuu, vaikka ovea viereiseen tilaan pidettäisiin pidempäänkin auki.

## Olosuhteiden tasaaminen tietokonehuoneiden välillä

- Tilojen välisellä lämpötilaerolla on merkittävä vaikutus vapaasti tilojen välillä kulkeutuvan ilman määrään. Vailla lämpötilaeroa pelkkä seinään tehty aukko ei toimi. Suurikaan aukko ei pystynyt nopeuttamaan hiilidioksidipitoisuuden laskua, jos tilat olivat täsmälleen samassa lämpötilassa.
- Mittausten perusteella korkeussuunnassa etäällä toisistaan olevat kaksi aukkoa laskevat hiilidioksidipitoisuutta tehokkaammin kuin lähempänä toisiaan olevat samankokoiset aukot.
- Synteettisen hiilidioksidin käyttö ihmisillä kuormitetun tilanteen mallintamiseen on mahdollista, kunhan huolehditaan synteettisen hiilidioksidin tasaisesta sekoittumisesta tarkasteltavaan tilaan. Synteettisellä hiilidioksidilla on taipumus kerääntyä lattianrajaan, kun taas ihmisten tuottama lämmin ilma nousee ylös kohti kattoa. Lisäksi ihmisten läsnäolon vaikutus tilan ilman liikkeisiin on otettava tapauskohtaisesti huomioon.

## **Puhallinvusteinen olosuhteiden tasaaminen aulan ja ATK-luokan välillä**

- Käyttöajoiltaan poikkeavien tilojen tapauksessa puhallinvusteinen olosuhteiden tasaaminen voi hyvinkin olla tehokas ja taloudellinen tapa ylläpitää hyvää sisäilman laatua.
- Hyvin pienitehoisillakin puhaltimilla saadaan aikaan merkittäviä parannuksia kuormitettujen tilojen ilmanlaatuun, mikäli tilan lähellä on käytössä raikasta sisäilmaa.
- Myös tässä raportissa tutkittuja noin 4 watin puhaltimia suurempien puhaltimien käyttö olisi kannattavaa. Suurempitehoisilla puhaltimilla saataisiin siirrettyä vielä suuremmat ilmavirrat, ja tuuletettavan tilan ilmanlaatu pysyisi entistä parempana.
- Siirtoilmalaitteiden tekniset vaatimukset (esim. ilmamäärät ja akustiset ominaisuudet) tulee ottaa huomioon tapauskohtaisesti.
- Siirtoilmapuhaltimet ovat vaihtoehto erilliselle tilakohtaiselle ilmanvaihtokoneelle tai suurten ilmanvaihtokoneiden käyttöajan pidentämiselle käyttöajoiltaan poikkeavien tilojen ilmanvaihdon toteuttamiseksi rakennuksen vilkkaimman käyttöajan ulkopuolella. Tuuletettavan tilan vieressä tulee olla avaraa sisätilaa, jonka kanssa olosuhteiden tasaaminen voidaan toteuttaa.
- Siirtoilmapuhaltimet ovat taloudellinen vaihtoehto. Niiden käyttökulut normaaleihin suuriin ilmanvaihtokoneisiin verrattuna ovat mitättömät. Takaisinmaksuajat ovat kuukausien luokkaa, tämän raportin esimerkissä vain vajaa 4 kuukautta.

## Laskennalliset ilmavirrat

- Laskennallisesti saatiin tuloksia, jotka poikkeavat siitä, minkä ajattelisi olevan tehokasta huoneen tuulettamisessa. Esimerkiksi kuormitetun tilan oven avaaminen sisäkäytävään tai vaikkapa olohuoneeseen on kaksi kertaa tehokkaampi tapa tuulettaa kuin ikkunan raottaminen kovaan talvipakkaseen!
- Normaalikokoisen, 210 cm korkean ja 90 cm leveän, avoimen oven kautta tapahtuu tilojen välisen yhden asteen lämpötilaeron seurauksena noin 170 L/s tilojen välistä ilmanvaihtoa.
- Ylhäällä lähellä kattoa oleva aukko on noin 40 % tehokkaampi kuin alhaalla oleva yhtä suuri aukko.
- Kahden aukon tapauksessa aukkojen tehollinen pinta-ala on suurimmillaan silloin, kun aukkojen pinta-alat ovat yhtä suuret.
- Kahden aukon pinta-ala voi olla 50 % tehokkaampaa kuin yhden aukon pinta-ala. Joissain tapauksissa, esimerkiksi silloin kun aukot ovat hyvin etäällä toisistaan, ero kahden aukon hyväksi voi olla vielä suurempi
- Olosuhteiden tasaamiseen osallistuvien tilojen lähtökohtaisilla olosuhteilla on merkittävä vaikutus tasaamisidean toimivuuteen. Yhden tiloista tulee olla tilojen ja ilmanvaihdon puolesta väljästi mitoitettu.

- Määräysten mukaan mitoitettun neuvotteluhuoneen ilmanlaatua voidaan merkittävästi parantaa tasaamalla sen olosuhteita esimerkiksi viereiseen aulaan avoimen oven avulla. Tarkastellussa tapauksessa neuvotteluhuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuutta saatiin laskettua 1100 ppm:stä 800 ppm:ään.
- Hiilidioksidipitoisuuden nousunopeus on huomattavasti hitaampaa, kun olosuhteita tasataan tilojen välillä. Tasaamiseen osallistuvien tilojen suurista tilavuuksista on hyötyä.

# 9

## LÄHTEET

---



*Asumisterveysopas, Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen asumisterveysohjeen soveltamisopas.* 2009. Pori. Ympäristö- ja terveystieteiden lehti.

*Aumala, O.* 1999. Mittaustekniikan perusteet. Otatieta Oy. Helsinki. 223 s.

*EngineerToolBox.* 2013. Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications. [WWW]. [viitattu 2.5.2013]. Saatavissa: [http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d\\_124.html](http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html)

*Heinonen, Sirkka.* 2008. Hidas asuminen ja hiilidioksidipitoisuus. Sitran Energiaohjelma ja Tulevaisuuden tutkimuskeskus. 40 s.

*Ilmatieteen laitos.* 2013. Hiilidioksidipitoisuus ylittänyt Pallaksella 400 ppm:n tason. [WWW]. [viitattu 20.5.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/658924>

*Kalema, Timo et al.* 2012. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen. Tampere. 133 s.

*Kalema, T., Viot, M.* 2013. Tampereen teknillinen yliopisto. Methods to reduce the CO2 concentration of educational buildings utilizing internal ventilation by transferred air. Indoor Air 2013, 10 s.

*Kojo, R., Lilja, R.* 2011. Talonrakentamisen materiaalitehokkuuden edistäminen. Helsinki. Ympäristöministeriö. 86 s.

*Kylläinen, M.* 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos. Tampere. 198 s.

*LVI-teknologiateollisuus ry.* 2009. SFP-opas, Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittaamiseen. 25 s.

*P.A. Favarolo, H. Manz.* Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening. Swiss Federal Laboratories for Testing and Research (EMPA), Laboratory for Applied Physics in Buildings, Duebendorf, Sveitsi. 11 s.

*Rahko, Pasi.* 2007. NDIR-tekniikka kaasujen monikomponenttianalyyysissä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Tampere. 91 s.

*Seppänen, Olli.* 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-kustannus Oy. Rauma. 347 s.

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

*Sisäilmayhdistys ry.* 2013a. Espoo. Viitattu 22.1.2013

Saatavissa:

[http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset\\_tilat/sisailmasto/perustietoa/](http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/sisailmasto/perustietoa/)

*Sisäilmayhdistys ry.* 2013b. Espoo. Viitattu 12.3.2013.

Saatavissa:

[http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/tietoa\\_yhdistyksesta/](http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/tietoa_yhdistyksesta/)

*Skanska CDF Oy ja KTI Kiinteistötieto Oy.* 2012. Tulevaisuuden työympäristö –barometri 2012. Helsinki. 39 s.

Saatavissa:

<http://www.kti.fi/kti/doc/ajankohtaista/>

TulevaisuudenTyöymparistoBarometri\_2012.pdf

*Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö.* 2003. Asumisterveysohje. Helsinki. 93 s.

Saatavissa:

[http://www.valvira.fi/files/tiedostot/a/s/asumisterveysohje\\_STM\\_2003.pdf](http://www.valvira.fi/files/tiedostot/a/s/asumisterveysohje_STM_2003.pdf)

*Suomen Standardisoimisliitto SFS.* 2007. Standardi SFS-EN 15251, Sisäympäristön lähtötiedot rakennusten energiatehokkuuden suunnitteluun ja arviointiin ottaen huomioon ilman laatu, lämpöolot, valaistus ja äänitekniset ominaisuudet. Helsinki. 82 s.

*Suomen Yliopistokiinteistöt Oy.* Kampuskysely 2013: Kuinka kampus kookuttaa? Tuloraportti. Tampere. 11 s.

*Systeemitekniiikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto.* 2013. MIT-1010 Mittaustekniikka, luento 5. Tampere. 40 s.

*Säteri, Jorma.* 2008. Sisäilmastoluokitus. Sisäilmayhdistys, Espoo. 22s.

*Tampereen teknillinen yliopisto.* 2006. Opinnäytetyön kirjoittaminen Tampereen teknillisessä yliopistossa. 31 s.

*Työterveyslaitos.* 2011. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet. OVA-ohje: Hiilidioksidi. 7 s. [WWW]. [viitattu 13.3.2013].  
Saatavissa:  
<http://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.pdf>

*Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.* 1998.  
Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1. Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa. Helsinki. 9 s.

*Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.* 2000.  
Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa A4. Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje. Helsinki. 7 s.

*Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.* 2007.  
Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki. 72 s.

*Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.* 2012a.  
Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Rakennusten energiatehokkuus. Helsinki. 35 s.

*Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.* 2012b.  
Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Helsinki. 74 s.

*Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.* 2012.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto. Helsinki. 23s.

*Vaisala Humidity Calculator 2.2.* 2013. [WWW]. [viitattu 27.4.2013].

Saatavissa:

[http://www.vaisala.com/humiditycalculator/vaisala\\_humidity\\_calculator.html](http://www.vaisala.com/humiditycalculator/vaisala_humidity_calculator.html)

*Ray Alex Web* 2013. [WWW]. [viitattu 16.10.2013].

Saatavissa: <http://reinep.wordpress.com/2013/05/10/carbon-dioxide-reaches-record-levels/>

*Viot, Maxime.* 2012. Predictive model for the carbon dioxide concentration of indoor spaces in school buildings. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 91 s.



**Ihmiset viettävät valtaosan, noin 90 prosenttia ajastaan sisätiloissa. Onkin ensiarvoisen tärkeää, että sisätilojen olosuhteet ovat turvalliset, terveelliset ja viihtyisät. Rakennuksen hyvien olosuhteiden takaamiseksi tarvitaan tekoja usealla tasolla. Niin suunnittelijoiden, rakentajien, rakennusta ylläpitävien kuin rakennusta käyttävienkin tulee olla tietoisia siitä, mikä on rakennukselle ja sen olosuhteille hyväksi.**

*Tässä kirjassa tarkastellaan sisäilman laadun parantamista aivan uudeltaisesta näkökulmasta. Esitetyt tulokset perustuvat laajaan tutkimustietoon. Kirjassa esitettävien ratkaisujen ja teorioiden oikeellisuus on todennettu lukuisilla kokeilla ja mittauksilla. Sisäilman parantamiseen löydetään tehokkaita, yksinkertaisia ja yllättäviäkin ratkaisuja! Oleellista on, että käyttäjät voivat itsekin ottaa vastuuta ja edelleen vaikuttaa sisäilman laatuun tilanteen ja tarpeen mukaan. Aina ei tarvita raskaita toimenpiteitä; joskus pieni puhallin on ratkaisevan tehokas, joskus pelkkä oven avaaminen riittää. Ilmanlaatu paranee, ja käyttäjät hallitsevat tilannetta. Lue, millaisilla ratkaisuilla voit itse helposti vaikuttaa ihmisten ja tilojen hyvinvointiin!*