

Jorma Heikkinen, Jarkko Heinonen, Mika Vuolle,
Tuomas Laine & Kimmo Liljeström

Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto

Toimistorakennusten hybridi- ilmanvaihto

Jorma Heikkinen

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Jarkko Heinonen & Mika Vuolle

TKK LVI-laboratorio

Tuomas Laine & Kimmo Liljeström

Insinööritoimisto Granlund Oy



ISBN 951-38-6109-0 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6110-4 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Inkeri Heikkilä

Otamedia Oy, Espoo 2002

Heikkinen, Jorma, Heinonen, Jarkko, Vuolle, Mika, Laine, Tuomas & Liljeström, Kimmo. Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto [Hybrid ventilation of office buildings]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2179. 113 s.

Avainsanat ventilation, hybrid ventilation, office buildings, simulation, indoor air, air quality, energy consumption, school buildings, indoor climate, costs, economic analyses

Tiivistelmä

Tutkimuksessa kehitettiin toimisto- ja koulurakennusten hybridi-ilmanvaihtojärjestelmiä, jotka toteuttavat korkeat suomalaiset sisäilmasto- ja energiavaatimukset. Raportti antaa ensin yleiskuvan hybridi-ilmanvaihdosta, esittelee kehitetyt ilmanvaihtokonseptit sekä niiden toimintalaskelmien tulokset. Järjestelmien toimivuus käytännössä selviää myöhemmin koerakennusten myötä.

Hybridi-ilmanvaihdossa koneellisen ja painovoimaisen ilmanvaihdon tekniikka yhdistyvät eri tavoin. Tyypillinen esimerkki on apupuhaltimen käyttö painovoimaisessa ilmanvaihdossa lämpimänä vuodenaikana. Nimitys hybridi-ilmanvaihto on otettu käyttöön kansainvälisessä projektissa, johon myös tämä tutkimus kuuluu. Haastatellut rakentamisen asiantuntijat pitivät hybridi-ilmanvaihtoa tervetulleena vaihtoehtona vaikiintuneelle koneelliselle ilmanvaihdolle. Hybridi-ilmanvaihtoon liitettiin käyttäjän kannalta positiivisia tekijöitä kuten mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihtoon sekä luonnonmukaiseksi koettava meluton ympäristö.

Hybridi-ilmanvaihdon malliratkaisuja kehitettiin mukana olevien yritysten ja suunnittelijoiden kanssa. Syntyneet kolme ilmanvaihtokonseptia perustuvat matalapaineiseen koneelliseen ilmanvaihtoon ja tarpeen mukaan muuttuviin ilmavirtoihin ja pääosin koneelliseen jäähdytykseen.

Poistoilmanvaihtoon perustuva hybridijärjestelmä on simulointien mukaan energiakustannuksiltaan vertailujärjestelmää edullisempi pienen puhallinenergian kulutuksen ansiosta. Vertailujärjestelmänä oli poistoilman lämmön talteenotolla varustettu tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Hybridijärjestelmään tarvitaan lämmittävä huonekohtainen tuloilmalaite, joka säätää ilmavirtaa hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Poistoilman lämmön talteenoton sisältävä toinen hybridijärjestelmä on energiakustannuksiltaan vieläkin edullisempi, mutta vaatii suuremmat investoinnit. Kanaviston elinkaaritarkastelun mukaan matalapaineinen kanavisto on normaalipaineista edullisempi, ja siten nykyään valitaan liian pieniä ilmanvaihtokoneita ja ilmanvaihtokanavia. Koulurakennuksen matalapaineinen ilmamääräsäätöinen ilmanvaihto takaa laskelmien mukaan hyvän sisäilmaston ja on energiatehokas. Ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus oli alle 60 % puhallinenergian kulutus oli alle 45 % vertailujärjestelmän kulutuksesta.

Heikkinen, Jorma, Heinonen, Jarkko, Vuolle, Mika, Laine, Tuomas & Liljeström, Kimmo. Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto [Hybrid ventilation of office buildings]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2179. 113 p.

Keywords ventilation, hybrid ventilation, office buildings, simulation, indoor air, air quality, energy consumption, school buildings, indoor climate, costs, economic analyses

Abstract

The report summarises the Finnish hybrid ventilation development performed in the international project “IEA Annex 35, Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings”. An overview of hybrid ventilation in office and school buildings in Nordic countries is given in the first part of the report. An interview survey carried out among Finnish designers and decision-makers shows that an increase of using natural forces in ventilation is expected. Three ventilation concepts for office buildings have been created to provide an alternative for the mechanical ventilation system with air-to-air heat recovery. The concepts are based on a low-pressure mechanical system and demand control of ventilation airflows. These concepts are relatively conservative because the role of the natural driving forces is small and the mechanical cooling is mostly used. This is a conscious choice, which is based on the Finnish climate and the strict requirements for indoor climate and energy use. The simulation results for the office and for the school building indicate that the ventilation rate can be controlled and energy costs reduced with the hybrid ventilation concepts. The life cycle cost comparison shows that lower pressure losses should be taken into use in the mechanical ventilation design practise.

Alkusanat

Tämä raportti antaa yleiskuvan hybridi-ilmanvaihdosta, esittelee kehitetyt ilmanvaihtokonseptit sekä niiden toimintalaskelmien tuloksia. Nimitys hybridi-ilmanvaihto on kansainvälisen projektin “IEA Annex 35, Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings” käyttöön ottama ja sitä on käytetty tässä raportissa, koska vastaavaa suomenkielistä ilmaisua ei ole. Suuri osa raportin kansainvälisestä aineistosta on saatu edellä mainitun IEA-projektin kautta.

Raportissa olevista ilmanvaihdon simuloinneista IDA-ohjelmalla ovat vastanneet Mika Vuolle ja Jarkko Heinonen Teknillisen korkeakoulun LVI-laboratoriosta. Kimmo Liljeström ja Tuomas Laine Insinööritoimisto Granlund Oy:stä ovat tehneet raportin elinkaarivertailut. Jorma Heikkinen VTT:ltä on kirjoittanut muut raportin osat.

Projektia “Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto” on rahoittanut Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Fläkt Woods Oy, Halton Oy, Insinööritoimisto Olof Granlund Oy, Rettig Lämpö Oy, Helsingin kaupungin rakennusvirasto sekä Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Johtoryhmään ovat kuuluneet projektin kuluessa:

Jukka Forsman, Helsingin kaupungin rakennusvirasto, puheenjohtaja,

Kim Hagström, Halton Oy (2001–2002),

Jarmo Heinonen, Insinööritoimisto Granlund Oy (1999–2000),

Ismo Heimonen, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka,

Jari Hokkanen, Fläkt Woods Oy (1999–2000),

Mikko Iivonen, Rettig Lämpö Oy,

Kaisa Kauko, ympäristöministeriö (2000–2002),

Risto Kosonen, Halton Oy (1999–2001),

Heli Kärmeniemi, Fläkt Woods Oy (2000–2002),

Tuomas Laine, Insinööritoimisto Granlund Oy (2000–2002),

Esko Virtanen, Tekes ja

Mika Vuolle, TKK LVI-laboratorio (1999–2000).

Syyskuussa 2002,

Jorma Heikkinen
projektipäällikkö

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Kansainvälinen hybridi-ilmanvaihdon projekti IEA Annex 35	10
1.2 Suomalainen hybridi-ilmanvaihto	12
2. Esimerkkejä hybridi-ilmanvaihdon toteutuksesta.....	13
2.1 Koulurakennukset Pohjoismaissa.....	13
2.2 Toimistorakennuksia	20
2.3 Yhteenveto kansainvälisen projektin rakennuksista.....	23
3. Hybridi-ilmanvaihdon potentiaali.....	25
3.1 Asiantuntijoiden haastattelut	26
3.2 Haastattelun tulokset	27
3.2.1 Suunnittelu	27
3.2.2 Ilmanvaihdon toimivuus.....	29
3.2.3 Ilmanvaihdon ohjaus	30
3.2.4 Kustannukset.....	31
3.3 Ennuste yleistymisestä, määräyksistä ja komponenttien kehitystarpeista.....	32
3.4 Johtopäätökset haastattelusta.....	32
4. Teknologian soveltamismahdollisuudet.....	33
4.1 Ilmavirrat	33
4.2 Lämmitys- ja jäähdytysenergia.....	33
4.3 Puhallinsähkö	34
4.4 Palotekniikka.....	36
4.5 Akustiikka	37
4.6 Suodatus	38
4.7 Ilmanjako ja vedottomuus	38
5. Valitut hybridi-ilmanvaihdon konseptit.....	39
6. Konseptien 1 ja 2 simulointi	42
6.1 Simuloinnin suoritustapa ja lähtötiedot.....	42
6.2 Laskentatapaukset.....	44
6.2.1 Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä vakioilmavirralla.....	44

6.2.2	Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä tarpeenmukaisella ilmanvaihdoilla.....	45
6.2.3	Hybridi 1 -konsepti	45
6.2.4	Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla	46
6.2.5	Hybridi 2 -konsepti	47
6.3	Sisäilmasto ja säädön toiminta	48
6.3.1	Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä vakioilmavirralla.....	48
6.3.2	Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä tarpeenmukaisella ilmanvaihdoilla.....	49
6.3.3	Hybridi 1 -konsepti ilman säätyviä tuloilmaventtiilejä.....	49
6.3.4	Hybridi 1 -konsepti	51
6.3.5	Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla	54
6.3.6	Hybridi 2 -konsepti	56
6.3.7	Yhteenveto sisäilmastosta	56
6.4	Järjestelmien energiankulutukset.....	57
7.	Konseptien 1 ja 2 herkkyystarkastelu	60
1.1	Herkkyystarkastelun suoritustapa.....	60
7.2	Konsepti 1 perustilanteessa	61
7.3	Konsepti 1, rakennuksen tiiviyyden ja paine-erojen merkitys	64
7.4	Konsepti 1, rakennuspaikan tuulisuuden merkitys.....	67
7.5	Konsepti 1, rakennuksen korkeuden merkitys.....	68
7.6	Konsepti 1, toiminta minimi-ilmavirralla.....	69
7.7	Konsepti 1, toiminta painovoimaisena	70
7.8	Konsepti 2, lähtökohtatilanne.....	71
7.9	Konsepti 2, rakennuksen tiiviyyden merkitys	72
7.10	Konsepti 2, rakennuspaikan tuulisuuden merkitys.....	72
7.11	Konsepti 2, rakennuksen korkeuden merkitys.....	73
7.12	Konsepti 2, ulkoilmareitin painehäviön merkitys	74
7.13	Konsepti 2, toiminta minimi-ilmavirralla.....	75
7.14	Konsepti 2, toiminta painovoimaisena	76
8.	Yhteenveto konseptien 1 ja 2 laskentatuloksista	78
8.1	Konsepti 1.....	78
8.2	Konsepti 2.....	79
9.	Koulun matalapainejärjestelmän simulointi (konsepti 3)	80
9.1	Lähtötiedot.....	80
9.1.1	Poikkilaakson korttelitalo.....	80
9.1.2	Kuormitus.....	80
9.2	Tulokset.....	82
9.2.1	Päiväkotihuoneen 103 sisäolosuhteet.....	82

9.2.2	Päiväkotihuoneen 108 sisäolosuhteet.....	86
9.3	Luokkahuoneiden sisäolosuhteet.....	88
9.3.1	Piazzan sisäolosuhteet.....	90
9.3.2	Energiatalous.....	91
9.4	Erikoistapaukset	92
9.4.1	Luokkahuoneen ikkunatuuletus	92
9.4.2	Luokkahuoneen ilmamäärän säätö lämpötilan mukaan	93
9.4.3	Koulun päättäjäiset.....	93
9.5	Luokkahuoneen virtauskenttä.....	95
9.6	Yhteenveto.....	99
10.	Konseptin 3 elinkaarivertailu	100
10.1	Tarkasteltava kohde.....	101
10.2	Ilmanvaihtojärjestelmä	103
10.3	Elinkaarilaskelma	104
10.4	Tulokset	105
10.5	Johtopäätökset	109
11.	Yhteenveto	110
	Lähdeluettelo	112

1. Johdanto

Tiukentuneet vaatimukset sisäilmaston ja energiatalouden suhteen ovat johtaneet viime vuosikymmeninä siihen, että toimistojen ilmanvaihtolaitteet ja -järjestelmät ovat kehittyneet monimutkaisiksi, tilaa vieviksi ja kalliiksi asentaa sekä huoltaa. Vastareaktionä on joissakin Euroopan maissa lähdetty kehittämään unohduksissa ollutta painovoimaista ilmanvaihtoa. Perinteisen painovoimaisen ilmanvaihdon puutteet ovat kuitenkin ilmeiset:

- ilmavirtoja ei voida tyydyttävästi hallita,
- sisäilmaston taso ei vastaa nykyisiä vaatimuksia ja
- energiankulutus on suuri, koska poistoilman lämpöä ei saada talteen.

Tietokoneiden ja rakennusautomaation kehitys voivat kuitenkin parantaa painovoimaisen ilmanvaihdon mahdollisuuksia kahdella tavalla. Ensinnäkin järjestelmä voidaan suunnitteluvaiheessa simuloida ja optimoida erilaisissa sääoloissa ja erilaisilla sisäilmaston kuormitusprofiileilla. Toiseksi itse järjestelmän toimintaa voidaan ohjata keskitetysti ja tarpeen mukaisesti mitattavien suureiden perusteella. Tällöin järjestelmään voidaan yhdistää hallitummin myös koneellisen ilmanvaihdon laitteita.

Viime vuosina on Keski-Euroopassa otettu käyttöön uusia toimistorakennuksia, joissa puhaltimilla avustetaan luonnollisen ilmanvaihdon toimintaa. Järjestelmiä on tutkittu 1998 päättyneessä EU:n NatVent-projektissa [1], joka tähtäsi energian kulutuksen pienentämiseen energiatehokkaan jäähdytyksen sekä älykkäästi säätyvän painovoimaisen ilmanvaihdon avulla. Tällainen hybridijärjestelmä pystyy täyttämään kohtalaisen tiukat sisäilmastovaatimukset suurimman osan ajasta, mutta suomalaisen sisäilmastoluokituksen [2] parhaille tasoille on vaikea päästä. Kehittämisen tarvetta on seuraavilta osin:

- sisälämpötila nousee liian korkeaksi kuumina kesäpäivinä,
- ulkoilman suodatus ja ulkoisen melun vaimennus on vaikea toteuttaa ja
- lämmön talteenotto on vaikea järjestää.

Etuna on pieni ilmanvaihdon sähköenergian kulutus. Norjalaisessa koulurakennuksessa arvioitiin, että puhaltimien keskimääräinen sähköteho on alle 1 W oppilasta kohti ja pienempi kuin 10 % koneellisen ilmanvaihdon sähköenergian tarpeesta.

Painovoimaisessa ilmanvaihdossa on edullista käyttää itse rakennusta hyväksi ilman kulkureittinä, koska virtausreittien painehäviöt on saatava pieniksi. Tämä johtaa tavanomaisten ilmanvaihtokomponenttien ja kanavien vähentymiseen. Muutenkin investoinnit siirtyvät laitetekniikasta itse rakennukseen seuraavista syistä:

- usein tarvitaan entistä suurempi huonetilavuus henkilöä kohti,
- rakennuksen muoto on suunniteltava ilman virtauksia ajatellen ja
- tarvitaan rakennukseen sovitettuja ilman sisäänotto- ja poistoratkaisuja.

Siten luonnollisen tai hybridi-ilmanvaihdon suunnittelu vaatii aikaisempaa tiiviimpää yhteistyötä arkkitehdin, rakennesuunnittelijan ja LVI-suunnittelijan kesken. Usein aloite hybridi-ilmanvaihdon käyttöön tulee arkkitehdiltä ja se liittyy myös pyrkimykseen hyödyntää luonnonvaloa sekä aurinkoenergiaa.

Edellä mainitussa EU:n NatVent-projektissa mitattiin ilmanvaihdon toimintaa näillä periaatteilla suunnitellussa toimistorakennuksissa seitsemässä maassa ja lisäksi kehitettiin uusia luonnolliseen ilmanvaihtoon sopivia komponentteja. Komponenteista kiinnostavimpia on Norjassa kehitetty pienen painehäviön lämmöntalteenottolaite.

Eurooppalaisista luonnollisen ilmanvaihdon toteutusratkaisuista on tämän tutkimuksen yhteydessä tehty erillinen selvitys [3]. Siinä yleisimmät painovoimaisen ilmanvaihdon toteutukset on kiteytetty kolmeen periaatteeseen:

- suurten toimistorakennusten kaksoisjulkisivua hyödyntävä julkisivuilmanvaihto
- koulujen maalämpöä hyödyntävä läpivirtausilmanvaihto ja
- pienten toimistorakennusten tuuletusilmanvaihto.

1.1 Kansainvälinen hybridi-ilmanvaihdon projekti IEA Annex 35

Suomi osallistuu vuonna 2002 päättyvään kansainväliseen projektiin “IEA Annex 35, Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings” [4], jonka painopiste on toimisto- ja oppilaitosrakennuksissa. Hybridijärjestelmän odotukset liittyvät paljolti kehittyneen säätöjärjestelmän käyttöönottoon, jolloin eri sää- ja käyttötilanteita voidaan hallita automaattisesti.

Taulukossa 1 on esitetty projektin kohderakennusten ilmanvaihtojärjestelmät.

Taulukko 1. Ilmanvaihtojärjestelmien luokittelu IEA Annex35 -projektin rakennuksille [5].

IEA Annex-35 Hybridi- ilmanvaihdon luokittelu		Wilkinson Office (AUS)	IVEG Office (B)	PROBE Office (B)	B&O HQ Office (DK)	Ruusutorppa School (FIN)	Poikkilaakso School (FIN)	B. Brecht School (D)	I. Guzzini Office (IT)	Liberty Univ. Tower (JP)	Tokyo Gas Office (JP)	Fujita Lab. Office (JP)	Grong School (N)	Jaer School (N)	T'anga School (S)	Waterland School (NL)
Yhdistetty luonnollinen ja koneellinen ilmanvaihto		X	X	X				X	X	X	X	X				
Puhallinvusteinen painovoimainen ilmanvaihto					X	X								X	X	X
Painovoiman ja tuulen avustama koneellinen ilmanvaihto							X						X			

Taulukon 1 jaottelu perustuu seuraaviin hybridi-ilmanvaihdon määritelmiin [5]:

Yhdistetty luonnollinen ja koneellinen ilmanvaihto. Tämä periaate pohjautuu erillisiin koneelliseen ja luonnolliseen ilmanvaihtojärjestelmään. Säätöjärjestelmä joko vuorottelee kahden järjestelmän välillä tai käyttää järjestelmiä eri tarkoituksiin. Esimerkkinä on koneellinen ilmanvaihto kesällä sekä talvella ja painovoimainen ilmanvaihto välikausina (Liberty Tower Japanissa). Toinen esimerkki on koneellisen ilmanvaihdon käyttö toimistoaikana ja luonnollisen ilmanvaihdon käyttö yöjäähdytykseen (IVEC toimistotalo Belgiassa). Tähän kategoriaan kuuluu myös järjestelmä, jossa käyttäjä saa valita joko ikkunatuuletuksen tai koneellisen jäähdytyksen (Wilkinson Australiassa).

Puhallinvusteinen painovoimainen ilmanvaihto. Tämä periaate perustuu luonnolliseen ilmanvaihtoon, jota avustaa tulo- tai poistoilmavaihtohallin. Puhallin käynnistyy, kun luonnollisen ilmanvaihdon käyttövoima on pieni tai kun ilmanvaihdon tarve on tavallista suurempi.

Painovoiman ja tuulen avustama koneellinen ilmanvaihto. Periaate pohjautuu koneelliseen ilmanvaihtojärjestelmään, joka käyttää hyödyksi painovoimaa ja tuulta käyttövoimana. Tähän kuuluu koneelliset ilmanvaihtojärjestelmät, joissa painehäviöt ovat niin pienet, että luonnollisen käyttövoiman osuus on merkittävä.

1.2 Suomalainen hybridi-ilmanvaihto

Suomessa ei ole vielä käyttökokemuksia toimistojen tai koulujen hybridi-ilmanvaihdosta. Kesällä 2001 valmistunut Poikkilaakson koulu Helsingissä sisältää joitakin hybridi-ilmanvaihdon elementtejä. Vuonna 2002 valmistunut Ruusutorpan koulu Espoossa [6] käyttää luonnollista ilmanvaihtoa osan vuodesta ja on siten edellä mainitun määritelmän mukainen hybridi-ilmanvaihdon rakennus. Lisäksi on olemassa suunnitelmat toimistotalo Delfiiniin Helsingin Vuosaareen. Nämä rakennukset esitellään luvussa 2.

Tässä projektissa on kehitetty hybridi-ilmanvaihdon malliratkaisuja mukana olevien yritysten kanssa. Järjestelmien on sopeuduttava Suomen ilmastoon, sisäilmaston tavoitearvoihin ja mitoitus-lämpökuormiin. Toimistojen korkeiden lämpökuormien ja sisäilmavaatimusten takia kehitettäviin toimistojen ilmanvaihtokonsepteihin kuuluu koneellinen jäähdytys. Suomalainen hybridi-ilmanvaihtokonsepti pyrkii hyödyntämään luonnollisen ilmanvaihdon parhaat ominaisuudet. Samoja piirteitä voidaan ottaa käyttöön myös pelkässä koneellisessa ilmanvaihdossa.

2. Esimerkkejä hybridi-ilmanvaihdon toteutuksesta

Tässä raportissa on keskitytty ennen kaikkea hybridi-ilmanvaihdon rakennuksiin, jotka on suunniteltu toimimaan kylmässä ilmastossa ja suhteellisen tiukkojen sisäilmasto- ja energiatavoitteiden mukaan. Tällöin lähimpänä ovat pohjoismaiset rakennukset, joista on seuraavassa esitelty kiinnostavimmat ajatellen järjestelmien kehittämistä Suomen oloihin.

2.1 Koulurakennukset Pohjoismaissa

Pohjoismaissa hybridi-ilmanvaihto on tullut ensiksi koekäyttöön koulurakennuksissa ehkä siksi, että vaatimukset ilmajärjestelmien, suodatuksen, jäähdytyksen ja lämmön talteenoton suhteen ovat hieman lievemmat kuin toimisto- ja liikerakennuksissa. Taulukkoon 2 on kerätty perustietoja tulevista tai valmistuneista kouluista, joissa ilmanvaihdon toimintaa tullaan seuraamaan mittauksin.

Taulukko 2. Pohjoismaisia koulurakennuksia, joissa on hybridi-ilmanvaihto. Kaikissa tullaan tekemään laajat ilmanvaihdon toimivuusmittaukset. Ulkomaiset tiedot kerätty IEA Annex35:n [4] sisäisistä raporteista. Kouluissa on hiilidioksidipitoisuuden mukaan ohjattu tarpeenmukainen ilmanvaihto.

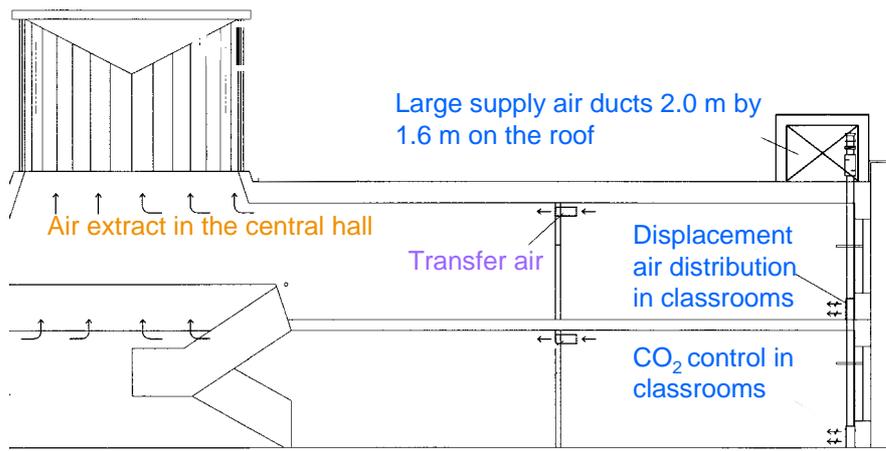
	Poikki-laakso, Helsinki	Ruusutorppa, Espoo	Tånga, Ruotsi	Grong, Norja	Jaer, Norja
Rakennusvuosi	2001	2002	1999/1968	1998	1999
Kerroksia	2	2	2	1	2
Mitoitusulkolämpötila, °C	-26	-26	-16	-23	-20
Ulkoilman sisäänottotapa	keskitetty	keskitetty	hajautettu	keskitetty	keskitetty
Puhaltimien sijoitus	tulo+poisto	tulo	poisto	tulo+poisto	tulo
Suodatus	EU7	ionisoiva	ei	EU7 ¹⁾	tunneli ¹⁾
Lämmön talteenottolaite	pyörivä	ei	ei	nestekiert.	ei ²⁾
Mitoitusilmavirta, l/s/hlö	7,5	4 ³⁾	4,5 ⁴⁾	6 ⁵⁾	8
Mitoituspainehäviö, Pa	1050	15	5 ⁶⁾	30	11
Painovoim. toimintaraja, °C	ei koskaan	+1...+4 ⁷⁾	+7...+9 ⁸⁾	ei koskaan ¹²⁾	-2
Poiston ja tulon korkeusero, m	ei merkitystä	11,5	9 tai 12 ⁹⁾	10	11
Ilmavirran ohjausperuste	CO ₂ +läsnäolo	CO ₂ +lämpötila	CO ₂	CO ₂	CO ₂ +lämpötila
CO₂ – säädön asetusarvo, ppm	1000	1000	1000-1500 ¹⁰⁾	800	1000-1500 ¹¹⁾
Ilmanjakotapa	syrjäytys	sekoitus	sekoitus	syrjäytys	syrjäytys

1) Ulkoilma otetaan siivottavan tunnelin kautta, jonne suuret hiukkaset laskeutuvat.

2) Varaus poistoilmalämpöpumpun käyttöön. Kustannussyistä ei toteutettu.

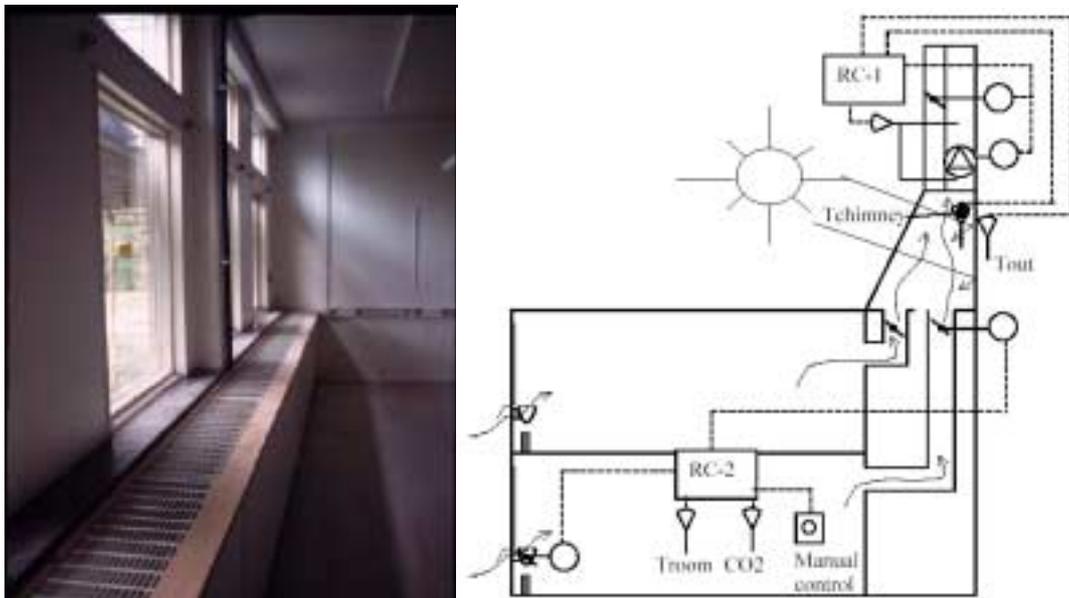
- 3) Perustuu alle 1 000 ppm:n CO₂ -pitoisuuteen ja tuuletukseen välitunneilla.
- 4) Puhaltimen käsiohjauksella saadaan tarvittaessa 7 l/s/hlö.
- 5) Tavallinen ilmavirta talvella. Tarvittaessa saadaan puhaltimilla 12 l/s/hlö.
- 6) Painehäviö on arvioitu taulukkoon ilmoitetun painovoimaisen ilmanvaihdon toimintarajan perusteella.
- 7) Pienillä tuulen nopeuksilla lasketut rajat.
- 8) Pilvisellä ja aurinkoisella säällä lasketut arvot. Poistoilmapiippu lämpenee auringonsäteilyllä.
- 9) Ensimmäinen ja toinen kerros. Korkeusero on kompensoitu ahtaammalla kanavalla 1. kerroksessa.
- 10) 1 000 ppm sytyttää varoitusvalon, 1 500 ppm avaa tuloilma-aukot 100 %.
- 11) Asetusarvo nousee lineaarisesti lämpötilan mukaan välillä -15°C ...+10°C.
- 12) Painovoimainen ilmanvaihto riittää, kun ilmanvaihdon tarve on vähäinen, mm. käyttöajan ulkopuolella.

Helsingin koekoulu Poikkilaakso (kuva 1) poikkeaa muista taulukon kouluista siinä, että luonnonvoimia, lämpötilaeroja ja tuulta ei käytetä hyväksi ilmanvaihdon aikaansaamiseen. Sen sijaan rakennuksen sisälle on pyritty aikaansaamaan luonnollista ilmanvaihtoa muistuttavat olosuhteet. Pieni äänitaso, kanavointien välttäminen ja siirtoilman käyttö aulatilojen ilmanvaihtoon ovat tyypillisiä hybridi-ilmanvaihdon ratkaisuja Poikkilaakson koulussa. Luvussa 9 esitetään ennen rakentamista tehtyjä sisäilmaston, energiankulutuksen ja huonevirtauskentän laskelmia.



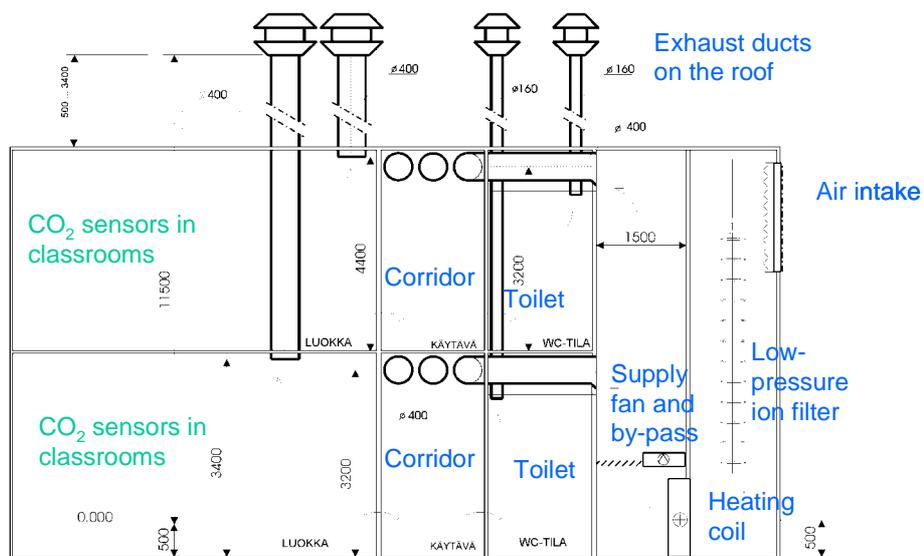
Kuva 1. Helsingin Poikkilaakson koulun rakennus toimii osaltaan ilmanvaihtokanavana, jolloin näkyviä ilmanvaihtokanavia tarvitaan vain vähän. Rakennuksessa on pienipaineinen koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, jota ohjataan hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Keskimmäisissä kuvissa näkyy tuloilman runkokanavat katolla sekä luokkahuone rakennusvaiheessa. Ikkunan alapuolella näkyy syrjäyttävän ilmanjaon tuloilmalaitteen runko. Ikkunan molemmin puolin näkyy tuloilmakanavat, joihin ilma tulee katolla olevista suurista runkokanavista. Siirtoilmalaitteesta on kuva sivulla 37.

Göteborgista 100 kilometriä etelään sijaitseva Tångan koulu on ainoana taulukossa 2 olevista toteutettu hajautetulla ulkoilman sisäänotolla. Kyseessä on peruskorjaus, jossa luokkahuoneita sisältävässä siivessä siirryttiin vanhasta tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmästä hybridi-ilmanvaihtoon. Muihin tiloihin (juhlasali, ruokala, työtilat, toimitot) asennettiin uusi koneellinen ilmanvaihto, johon sisältyy poistoilman lämmön talteenotto. Ilmanvaihdon periaate käy ilmi kuvasta 2. Käyttäjät ovat arvostaneet mahdollisuutta säätää ilmanvaihtoa itse. Mittausten mukaan CO₂ -pitoisuudet ovat yli 1 000 ppm vain 10–20 minuutin jaksoina ja 1 500 ppm:n ylitykset ovat harvinaisia. Ulkoilma-aukoista tuleva melu ja veto on ollut ajoittain ongelma. Parannuskeinoiksi ehdotetaan ulkoilma-aukkojen äänenvaimennusta ja ikkunan alla olevien konvektorien tehon säätöä myös tuloilman lämpötilan perusteella. Puhaltimen sähköenergian kulutus on vähentynyt peruskorjauksessa 95 %.



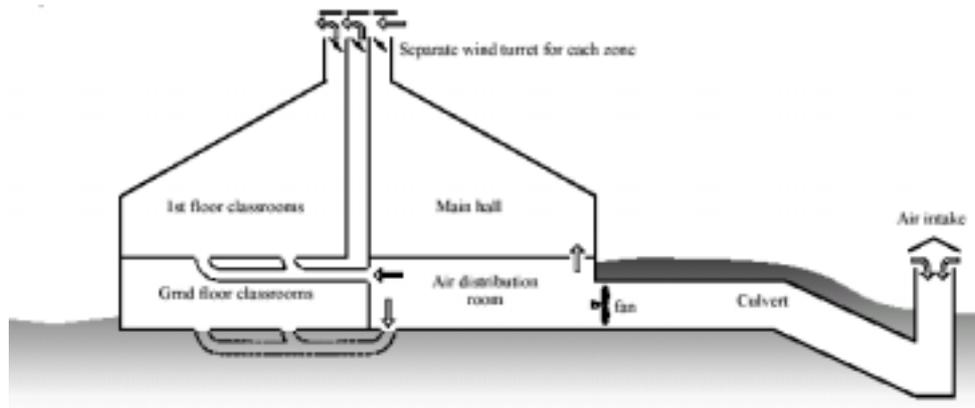
Kuva 2. Tångan koulun ilmanvaihdon periaate ja ikkunoiden alla olevat konvektorit. Ilma tulee sisään ikkunaseinältä koko huoneen levyiseen konvektorilaatikkoon, jossa se lämpenee ja sekoittuu huoneilmaan. Luokassa oleva ilmanvaihdon ohjausjärjestelmä (RC-2) säätää ulkoilma- ja poistoilma-aukkoja hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Opettaja voi myös ohjata ilmanvaihtoa käsin. Puhallin käy vain tarvittaessa. Poistoilmapiippu lämpenee aurinkoenergialla [4].

Espoon Leppävaarassa sijaitseva Ruusutorpan koulu (kuva 3) ja norjalainen Jaerin koulu (kuva 4) käyttävät samanlaista tekniikkaa, jossa puhallin on tulopuolella. Tuloilma johdetaan kanavoituna luokkiin ja ilma poistuu kustakin luokasta poistohormiin, jonka ilmavirtaa tuuli avustaa. Ruusutorpan koulussa tuloilmapuolella on ionisaatiotekniikkaa käyttävä suodatin, jonka painehäviö on hyvin pieni. Ruusutorpan koulun ilmanvaihtojärjestelmän kehittämisestä on kirjoitettu erillinen raportti [6] ja tutkimustietoa ilmanvaihdon toiminnasta saadaan vuosina 2003 ja 2004.



Kuva 3. Espoon Ruusutorpan koulu ja ilmanvaihdon periaate. Painovoimaista ilmanvaihtoa avustaa tarvittaessa tuloilmapuhallin ja oppituntien välillä ikkunatuuletus. Järjestelmään kuuluu tuloilmasuodatin sekä tuloilman lämmityspatterit. Ilmanvaihtoa ohjataan hiilidioksidipitoisuuden perusteella.

Jaerin koulussa ulkoilma tulee rakennukseen 60 metriä pitkän ja virtausaltaan 2 neliömetrin tunnelin eli kulvertin kautta, jonka odotetaan vähentävän rakennuksen jäähdystarvetta sekä keräävän ilmastovirrasta suuret partikkelit. Mittauksissa siitepölyn kokoiset eli yli 10 mikrometrin hiukkaset ovatkin suodattuneet kulvertissa lähes täysin ja myös pienemmät hiukkaset ovat suodattuneet yllättävän hyvin [21]. Jaerin koulun opettajat ja oppilaat ovat olleet tyytyväisiä sisäilmaan. Hiilidioksidipitoisuudet ovat olleet matalia.



Kuva 4. Norjalainen Jaerin koulu ja sen ilmanvaihdon periaate. Ulkoilman sisääntulotorni yläkuvassa etualalla on 2 metriä korkea. Siitä jatkuva tunneli on viemäroity siltä varalta, että vettä pääsee tuloilmatorniin. Lumen ja veden sisääntulo jäteilmapiipuista on ollut ajoittain ongelmana [21].

Norjalainen Grongin koulu poikkeaa muista painovoimaa käyttävistä taulukon 2 kouluista kahdella oleellisella tavalla: siinä on sekä tehokas kuitusuodatin (EU7) sekä lämmön talteenotto (hyötysuhde noin 50 %). Taulukosta 3 nähdään, että nämä komponentit muodostavat pääosan järjestelmän painehäviöstä. Kanavistolle sekä tulo- ja poistoilmaelimille on sen sijaan mitoitettu hyvin pienet painehäviöt, eli ne ovat väljiä kuten kuvasta 5 näkyy.



Kuva 5. Norjalainen Grongin koulu. Oikealla näkyy luokkahuoneen seinän vieressä syrjäyttävän ilmanvaihdon tuloilmalaitteet. Ilma poistuu seinän yläosassa näkyvien ikkunoiden kautta päivänvalovalokäytävään (toinen kuva vasemmalta alhaalla). [16].

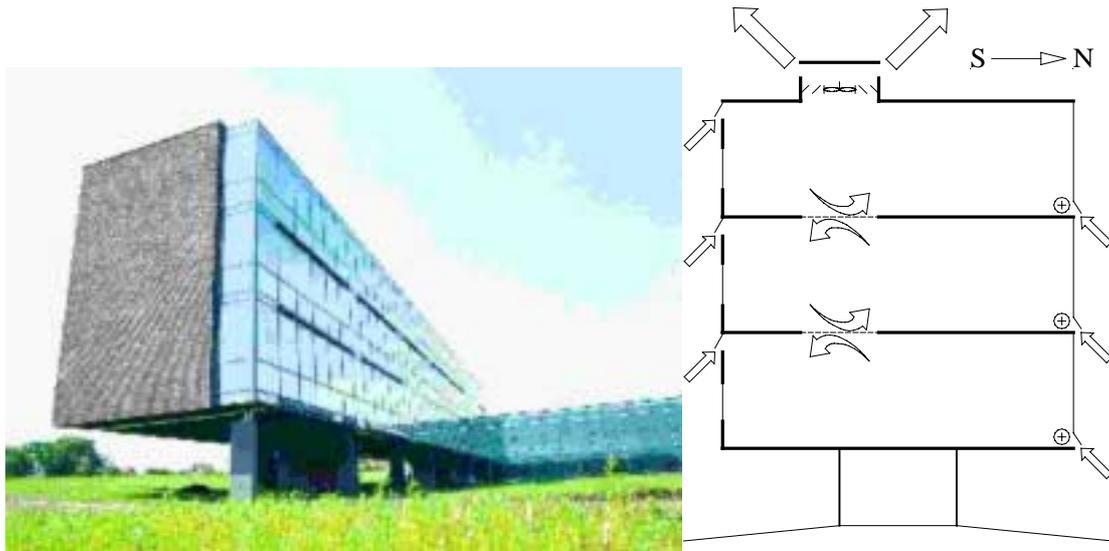
Taulukko 3. Tyypillinen laskettu painejakautuma Grongin koulun ilmanvaihtojärjestelmässä -20°C ulkolämpötilalla. Ilmavirta on 6 l/s/henkilö. Ilmavirralla $1,4\text{ m}^3/\text{s}$ on puhallintehon tarpeeksi laskettu 40 W (hyötysuhde-arvio 50 %). [7].

Ilmanvaihtojärjestelmän komponentti	Paine-ero, Pa	Paine-ero ulos komponentin jälkeen, Pa
Ulkoilmatorni	-0,5	-0,5
Ulkoilmapuhallin	12,5	12
Ulkoilmatunneli	-1	11
Kuitusuodatin, EU7	-8	3
Lämmöntalteenottopatteri	-5	-2
Jälkilämmityspatteri	-5	-7
Ilmanjakotunneli	-0,5	-7,5
Tuloilmakanava ja tuloilmasäleikkö	-1	-8,5
Poistiventtiili	-2	-10,5
Poistokanava (päivänvalokäytävä)	-0,5	-11
Poistopuhallin	0	-11
Terminen paine-ero ($h=10\text{ m}$, $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	+18	7
Lämmöntalteenottopatteri	-5	2
Jäteilma-aukko	-2	0
Tuulen imuvaikutus jäteilma-aukossa	0 (ei tuulta)	0

2.2 Toimistorakennuksia

Tanskassa on rakennettu kahteen toimistorakennukseen kuvan 6 mukainen ilmanvaihtojärjestelmä, joka toimii painovoimaisesti tai poistopuhaltimen avustamana. Rakennukset ovat laatutasoltaan korkealuokkaisia ja niissä on pyritty mahdollisimman hyvin piilottamaan tekniset laitteet. Koneellisen jäähdtyksen sijaan käytetään yöjäähdytystä ulkoilmalla. Alakattoja ja akustointilevyjä ei käytetä, joten raskaat betonipinnat varas-toivat viileyttä yöjäähdytyksen aikana tehokkaasti.

Rakennuksen keskitetty automaatiojärjestelmä mittaa ilmanvaihtojärjestelmän ohjaamiseksi huonetilojen CO_2 -pitoisuutta (2 anturia/kerros), huonelämpötilaa, ilman lämpötilaa jokaisesta ulkoilmapatterista, ulkolämpötilaa, tuulen nopeutta ja suuntaa, sademäärää, poistoilman nopeutta ja myös tuulen painetta eri paikoissa pohjoisjulkisivulla. CO_2 -ohjauksen ollessa käytössä säätö tapahtuu ensi sijassa ko. kerroksen ulkoilma-aukoista. Kerroksen kunkin ulkoilma-aukon ilmavirrat pidetään samoina lämpötila-antureiden ja säätöpeltien avulla. Ilmanjakoperiaate on syrjäyttävä. Tarvittaessa käyttäjät voivat tuulettaa ikkunoiden kautta.

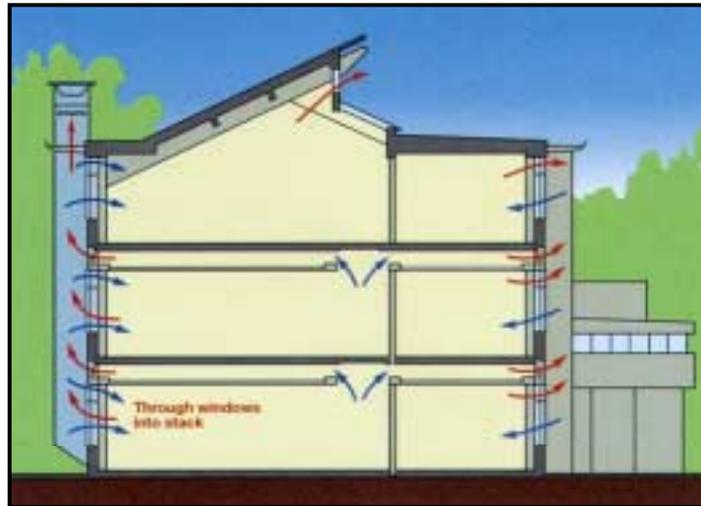


Kuva 6. Tanskalainen B&O -yhtiö halusi pääkonttorikseen korkealaatuisen rakennuksen, jossa on yksinkertainen ja näkymätön tekniikka. Kuvassa näkyy luonnonvaloa antava pohjoiseen suunnattu lasijulkisivu ja hybridi-ilmanvaihdon periaate. Ilmanvaihtoa ohjataan CO₂-pitoisuuden perusteella tai vaihtoehtoisesti käytetään vakioilmavirtaa. Ilma tulee pohjoisjulkisivulta ripaputkipattereiden läpi sekä myös vuotoina rakenteiden kautta. Etelän puolen ikkunat ovat pienet ja niitä käytetään yöjäähdytykseen sekä tarvittaessa manuaalisesti. Kuvan toimistosiivessä koko kerros on yhtä avokonttoria. Ilma poistuu toimistoista kahteen porraskäytävään ja niiden yläosasta ulos luonnollisesti tai puhaltimien avustamana. Rakennusvuosi 1998 [16].

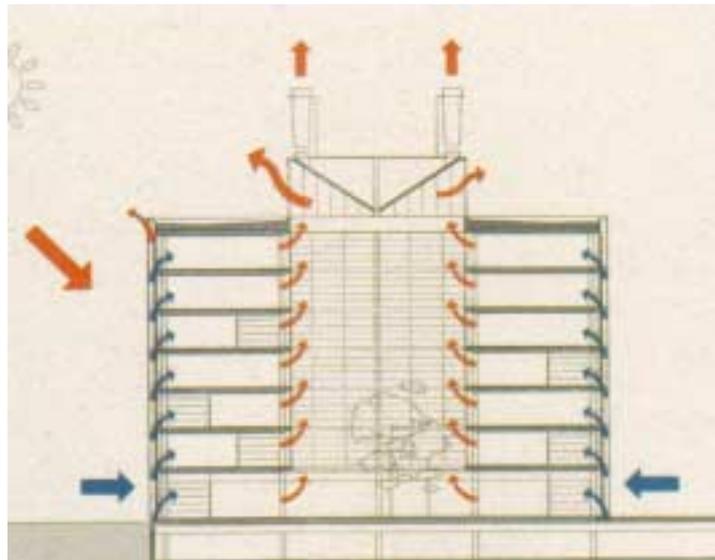
Säätöjärjestelmä estää poistopuhaltimen ja ulkoilma-aukkojen käytön alle 0 °C lämpötiloissa pattereiden jäätyksen estämiseksi, kovalla tuulella ja sateella. Ilma kuitenkin vaihtuu rakennuksessa myös ulkoilma-aukkojen ollessa suljettuna, joten joko sulkupellit tai rakennuksen vaippa vuotavat. Suuri vuotoilmanvaihto on lisännyt rakennuksen lämmitysenergian kulutusta.

Vielä enemmän hallitsemattomaan ilmanvaihtoon perustuu brittiläisen rakennustutkimuslaitoksen käytössä oleva tulevaisuuden toimistorakennus (kuva 7).

Atriumia ja lasijulkisivua hyödyntävää ilmanvaihtosuunnittelua edustaa Helsingin Vuosaaren suunniteltava Delfiini-toimistorakennuskompleksi, jonka alustava ilmanvaihtokaavio on kuvassa 8.

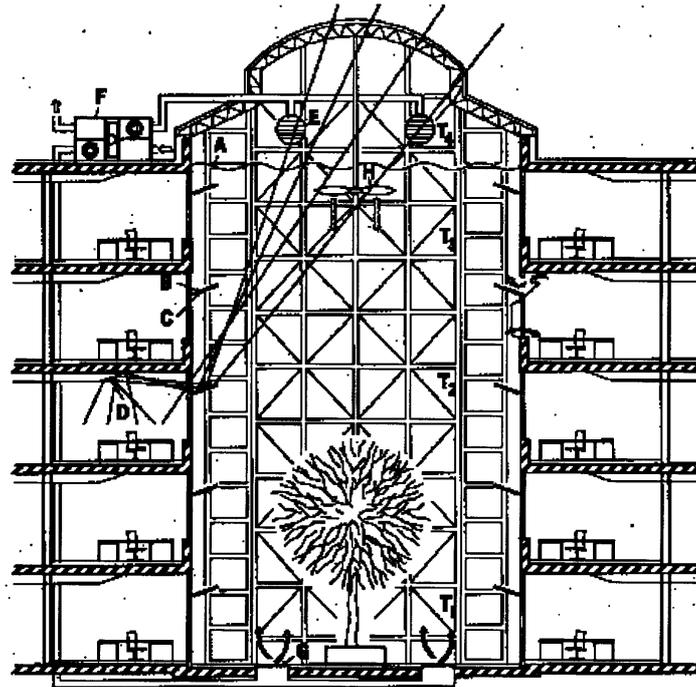


Kuva 7. Lontoon lähetyvillä sijaitsevan BRE Energy Efficient Officen ilmanvaihtoperiaate. Ilmanvaihto perustuu ikkunoiden avaukseen, läpituuletukseen, poistoilmapiippuihin ja tarvittaessa poistopuhalttimeen. Rakennusvuosi 1997 [16].



Kuva 8. Helsingin Vuosaaren suunnitellun Delfiini-toimistorakennuksen ilmanvaihtoperiaate. Keskeistä rakennuksessa on luonnonvalon hyväksikäyttö suurilla valoaukoilla, kapealla rakennusrungolla sekä kaksoislasijulkisivulla. Ulkoilma otetaan sisään kaksoisjulkisivun kautta ja poistetaan atriumin yläosasta tarvittaessa apupuhaltimen avustamana [8].

Kokonaan toisenlaista, hieman pragmaattista lähestymistapaa hybridi-ilmanvaihtoon edustaa kuvan 9 suuri sveitsiläinen toimistorakennuskompleksi. Atriumin ympärillä olevat toimistohuoneet saavat ilmanvaihdon avattavien ikkunoiden kautta atriumista, joka on koneellisesti ilmastoitu. Atrium on siten tavallaan keinotekoisesti luotu hyvin hallittu ulkotila. Järjestelyllä saadaan kanavoiteja vähennettyä. Käyttäjät ovat olleet tyytyväisiä työympäristöönsä ja siihen, että he saavat avata atriumin puoleista ikkunaa tarpeen mukaan.



- | | | | |
|---|---|---|-----------------------------|
| A | Atrium inner shading (fabric) | F | Air conditioning unit |
| B | Light shelves | G | Atrium air supply |
| C | Noise absorber | H | Atrium fan unit |
| D | Light reflecting ceiling in office zone | T | Temperature measuring point |
| E | Air inlet | | |

Kuva 9. Zürichissä sijaitsevan EWZ-toimistorakennuksen poikkileikkaus ja ilmanvaihdon periaate. Atriumissa on koneellinen ilmanvaihto ja lämmön talteenotto. Toimistohuoneiden ilma vaihtuu avoimien ikkunoiden kautta atriumiin. Rakennuksen ympäristössä on vilkas liikenne. Rakennusvuosi 1994 [1].

2.3 Yhteenveto kansainvälisen projektin rakennuksista

Kansainvälisessä IEA Annex35 -projektin alussa [16] on kartoitettu osallistujamaissa olemassa olevat hybridi-ilmanvaihdon rakennukset, joita löytyi kaikkiaan 19. Näistä 12 oli toimistorakennuksia ja 6 oppilaitosrakennuksia. Yksi on lämmön talteenoton koera-

kennus Norjassa. Suomen kannalta kiinnostavimmat näistä on jo esitelty edellä. Yhteenvetona rakennuksista voidaan tehdä seuraavanlaiset havainnot.

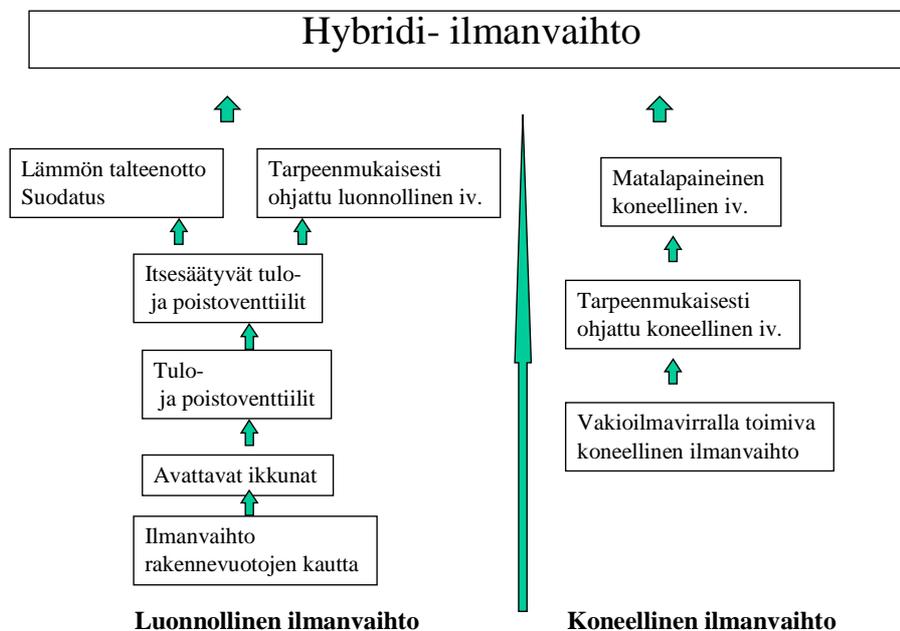
- Kaikki rakennukset on rakennettu tai peruskorjattu vuoden 1993 jälkeen.
- Viisi rakennuksista on peruskorjauksia. Ne osoittavat hybridi-ilmanvaihdon soveltumisen peruskorjaukseen, mikä onkin monissa maissa tärkein rakentamisen muoto.
- Yhdestätoista rakennuksesta on käytettävissä toimivuustietoja. Tulokset ovat yleisesti ottaen tyydyttäviä. Viidessä rakennuksessa on saavutettu energiansäästöä, seitsemässä on viihtyisyys parantunut ja kahdessa ilman laatu on ollut erittäin hyvä. Joissakin rakennuksissa tarvitaan ohjausjärjestelmän viritystä. Tanskassa on ollut jonkin verran melu- ja veto-ongelmia.
- Monissa rakennuksissa hyödynnetään päiväsaikaan painovoimaista ilmanvaihtoa ja yöllä käytetään puhaltimia.
- Sääto perustuu lämpötilan sekä hiilidioksidin mittaukseen neljässä oppilaitosrakennuksessa ja yhdessä toimistorakennuksessa. 12 toimistossa sääto perustuu pelkkään lämpötilaan. Yhdessä toimistossa on käytössä läsnäolotunnistimet infrapunaantureilla.
- Käyttäjillä on mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihtoon tai lämpötilaan 10 rakennuksessa. Se tapahtuu ikkunoita avaamalla, puhaltimen kytkimellä tai lämpötilan asetusarvoa muuttamalla.
- Järjestelmän peruskomponentteja ovat tulo- tai poistoilmapuhaltimet, moottoreilla tai käsin avattavat ikkunat sekä ulkoilma-aukot.
- Rakennuksissa on myös tuulitorneja ja aurinkoenergialla lämpiäviä poistohormeja.
- Kuudessa rakennuksessa on tuloilman sisäänjohtamiseen tarkoitettuja kammioita tai maanalaisia tunneleita.
- Erikoiskomponentteja on vähän käytössä. Hollannin rakennuksessa käytetään virtaussuunnan tunnistavia antureita itseohjautuvien tuloilma-aukkojen kauko-ohjaukseen.

3. Hybridi-ilmanvaihdon potentiaali

Hybridi-ilmanvaihdon kaupallista potentiaalia on vaikea arvioida. Norjassa luottamus hybridi-ilmanvaihtoon on kokemusten kertyessä kasvanut ja yhä suurempia rakennushankkeita on aloitettu tai suunnitteilla [21]. Viime vuosien kehityksessä on kuitenkin mukana myös tietynlaista erikoisuuden tavoittelua, joten tulevaisuudesta viimeaikainen kehitys ei välttämättä kerro. Huipputason hybridi-ilmanvaihdon rakennuksista muualla mainittakoon:

- Commerzbank Frankfurtissa (Euroopan korkein rakennus),
- Inland Revenue Building Nottinghamissa (1 800 toimistotyöntekijää),
- uusi parlamenttirakennus Lontoossa,
- Millenium Dome Lontoossa (halkaisija 320 m, korkeus 50 m) ja ehkä myös edellä esitelty
- Bang & Olufsen-yhtiön pääkonttori Tanskassa (ulkoisesta imagostaan tarkka yritys).

Hybridi-ilmanvaihdon yleistymisestä eräs optimistinen näkemys on kuvassa 10. Luonnollisen ja koneellisen ilmanvaihdon parhaat puolet lopulta yhdistyisivät hybridi-ilmanvaihdoksi, jolloin kaikki ilmanvaihtolaitokset olisivat hybridejä.



Kuva 10. Belgialainen näkemys hybridi-ilmanvaihdon tulevaisuudesta: siinä yhdistyy luonnollisen ja koneellisen ilmanvaihdon parhaat puolet [10].

Avainkysymys kuitenkin on, tuleeko matalapaineisten koneellisten järjestelmien painetaso koskaan laskemaan lähellekään painovoimaisissa järjestelmissä käytettävää muuttaman kymmenen pascalin paine-eroa. Tällä hetkellä ns. matalapaineiset koneelliset ilmanvaihtojärjestelmät ovat Suomessa painetasoltaan tästä hyvin kaukana. Ilmanvaihtokomponenttien valmistajien kannalta matalapaineisten järjestelmien yleistymiseen kannattanee kuitenkin varautua senkin takia, että tarpeenmukainen muuttuva ilmanvaihto johtaa ajoittain pieniin painetasoihin.

Kuvan 10 historiallinen kehitys on tapahtunut myös Suomessa. Luonnollinen ilmanvaihto oli toteutettu käsin säädettävien venttiilein tai ikkunoiden avulla, joten se vaati käyttäjän aktiivisuutta. Koneellisen ilmanvaihdon käyttöönotto vakioilmavirralla vaivautti käyttäjän ilmanvaihdon säätelystä ja se huolehti periaatteessa riittävästä ilmanvaihdosta sääoloista huolimatta. Energian säästön takia mielenkiinto tarpeenmukaisesti ohjattavaan koneelliseen ilmanvaihtoon ja matalapaineisiin järjestelmiin on lisääntynyt.

Eräs tapa tarkastella kaupallista potentiaalia on, että esimerkiksi Etelä-Euroopan ilmatossa hybridi-ilmanvaihto merkitsee yleensä siirtymistä koneellisen ilmanvaihdon suuntaan nykyisestä luonnollisesta ilmanvaihdosta ja siten järjestelmän tason nousua. Samalla kustannukset ja ilmanvaihdon liiketoiminnan volyyymi nousevat. Pohjoisessa hybridi-ilmanvaihto merkitsee osittaista paluuta luonnolliseen ilmanvaihtoon ja mahdollisesti tinkimistä joko sisäilmasto- tai energiankulutustavoitteista joidenkin muiden tavoitteiden kuten luonnonmukaisuuden kustannuksella. Ilmanvaihtojärjestelmän kustannukset ja siihen liittyvä liiketoiminnan volyyymi voi joko nousta tai laskea riippuen järjestelmän toteutuksesta. Usein hybridi-ilmanvaihtoon liittyy investointien siirtyminen laitetekniikasta rakennustekniikkaan.

3.1 Asiantuntijoiden haastattelut

Projektin ensimmäisessä vaiheessa 1999 haastateltiin kotimaisia rakentamisen ja ilmanvaihdon asiantuntijoita, jotta järjestelmien ideointia ja kehitystä osataan jatkossa suunnata markkinoiden haluamaan suuntaan.

Haastattelussa käytettiin eurooppalaisen NatVent-projektin [1] lomaketta, jonka kysymykset koskevat painovoimaista ja koneellista ilmanvaihtojärjestelmää. Siksi lomaketta täydennettiin hybridi-ilmanvaihtoa koskevilla lisäkysymyksillä.

Haastateltavia oli kymmenen. Arkkitehtejä oli kolme, joista kaksi toimii suunnittelutoimistossa ja yksi valtionhallinnossa. Suunnittelijoista toinen oli tehnyt hybridi-ilmanvaihtoa käyttävän suuren toimistorakennuksen suunnitelman ja uusia vastaavia hankkeita oli meneillään. Myös toisella arkkitehdillä oli työn alla luonnollista ilmanvaihtoa hyväksi käyttävä toimistorakennus. Valtionhallinnon arkkitehdillä oli koke-

musta rakennushistoriallisesti arvokkaiden toimistorakennusten painovoimaisesta ilmanvaihdosta.

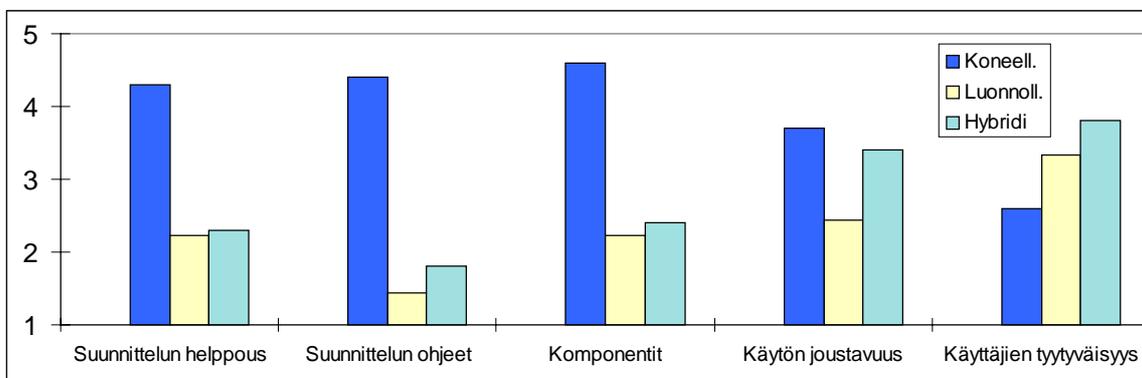
Ilmanvaihtosuunnittelijoita oli kolme. Yksi näistä oli suunnitellut hybridi-ilmanvaihtojärjestelmän toimistorakennukseen, toinen oli tehnyt vastaavan esisuunnitelman ja kolmannella oli vahva kokemus asuntojen painovoimisesta ilmanvaihdosta. Kiinteistöalan johtajia oli kaksi. Toisella heistä oli valmiit suunnitelmat hybridi-ilmanvaihdolla toteutettavasta suuresta toimistotalokokonaisuudesta. Toinen oli kiinnostunut toteuttamaan hybridi-ilmanvaihtoa aluksi jossakin pienessä kohteessa.

Lisäksi haastateltiin ilmanvaihdon määräyksistä vastaavaa ympäristöministeriön virkamiestä sekä Helsingin kaupungin rakennusvalvonnan edustajaa, joka oli käsitellyt myös hybridi-ilmanvaihdon toimistorakennusten suunnitelmia.

3.2 Haastattelun tulokset

3.2.1 Suunnittelu

Koneellisen ilmanvaihdon suunnittelua pidettiin helppona verrattuna painovoimaiseen tai hybridi-ilmanvaihtoon, kuva 11.



Kuva 11. Haastateltujen mielipiteet ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelusta. Arvosana 5= erittäin hyvä, 1= heikko.

Suunnitteluohjeiden, neuvojen ja komponenttien hyvä saatavuus tukevat suunnittelua. Myös rakennuksen käyttö on joustavinta koneellisella ilmanvaihdolla. Haastattelussa todettiin myös seuraavaa:

- *Koneellisenkin ilmanvaihdon suunnittelu on vaikeaa korjauskohteissa, LVI-suunnittelijat tarjoavat ongelmiin lisää tarpeettomia laitteita ajattelematta kokonaisuutta (arkkitehti).*

- *Määräykset keskittyvät koneelliseen järjestelmään (arkkitehti).*
- *Kaupalliset aspektit painostavat koneellisen ilmanvaihdon ja lämmön talteenoton pakollisuutta (viranomainen).*

Hybridi-ilmanvaihdon suunnittelu arvioidaan helpommaksi kuin perinteisen painovoimaisen ilmanvaihdon suunnittelu (kuva 11). Hybridi-ilmanvaihdon rakennuksen käyttö on vastaajien mielestä lähes yhtä joustavaa kuin koneellisella ilmanvaihdolla. Haastattelussa todettiin myös seuraavaa:

- *Hybridi-ilmanvaihdon suunnittelu on helppoa, kunhan löytyy osaava suunnittelija (kiinteistöjohtaja).*
- *On parempi, että hybridi-ilmanvaihdon komponentteja ei vielä ole vaan ne suunnitellaan. Silloin suunnittelija on henkeen ja vereen hankkeessa mukana. Itse rakennuskin voi olla ilmanvaihtokomponentti (ilmanvaihtosuunnittelija).*
- *Rakennusvalvonta ei hyväksy enää painovoimaisen ilmanvaihdon suunnittelussa 1950-luvun normaaliohjeiden käyttöä. Nyt tarvitaan laskelmat toimivuudesta 10 °C:n lämpötilassa, ja suunnittelijat joutuvat tekemään ne miten osaavat (ilmanvaihtosuunnittelija).*

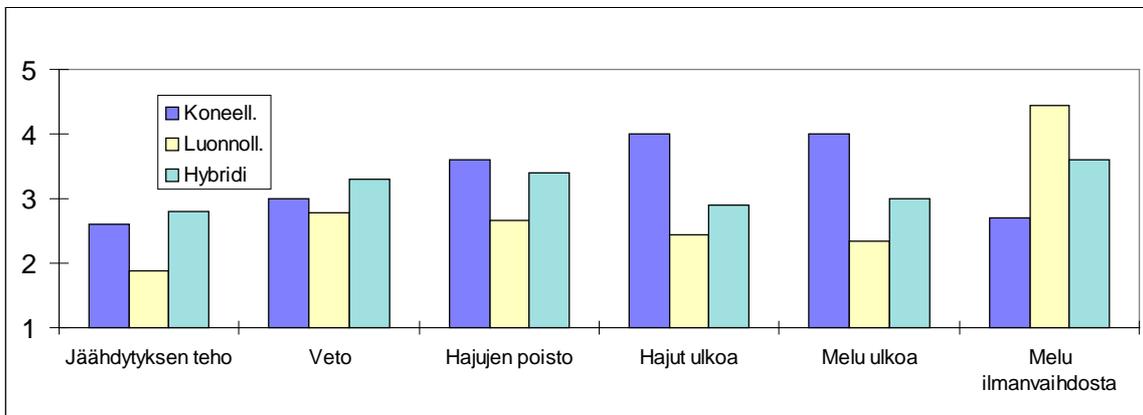
Odotukset käyttäjien tyytyväisyydestä (kuva 11) ovat yllättäen korkeimmalla hybridi-ilmanvaihdossa. Haastattelussa todettiin myös seuraavaa:

- *Hybridi-ilmanvaihtoon liittyy käyttäjän kannalta positiivisia tekijöitä kuten luonnonvalo, ikkunoiden avaamisen mahdollisuus ja luonnonmukaiseksi koettu ympäristö*
- *Vaikutusmahdollisuus ympäristöön on käyttäjälle henkisesti merkittävää.*
- *Rakentamispalautteen mukaan koneelliseen ja painovoimaiseen ilmanvaihtoon ollaan yhtä tyytyväisiä. Hybridi-ilmanvaihdossa ainakin odotukset ovat korkeammalla (kiinteistöjohtaja).*
- *Rakentamisen laatu ratkaisee suurelta osin käyttäjien tyytyväisyyden. Koneellisen ilmanvaihdon käyttäjät ovat usein tyytymättömiä (arkkitehti).*
- *Painovoimaisen ja hybridijärjestelmän käyttäjät kuvittelevat, että tilanne on parempi. Ovat siis tyytyväisempiä (ilmanvaihtosuunnittelija).*
- *Koneellisessa järjestelmässä on hyviä ja huonoja toteutuksia. Tyytyväisyys riippuu toteutuksesta, käytöstä ja huollosta. Painovoimaisen ilmanvaihdon toimistot ovat yleensä korkeita suuria huoneita, joissa ollaan tyytyväisiä.*

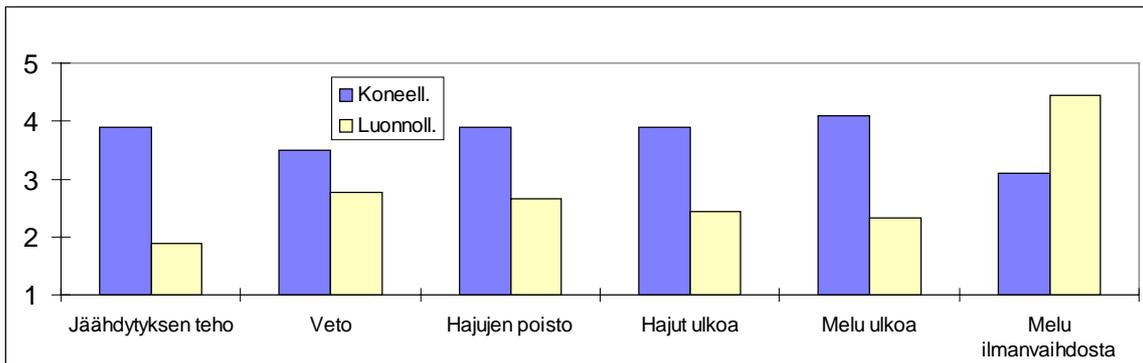
Eurooppalaisessa NatVent-haastattelututkimuksessa [9] luonnollinen ilmanvaihto sai paremmat arviot käyttäjien tyytyväisyydestä erityisesti Alankomaissa mutta myös Tanskassa, Sveitsissä ja Britanniassa. Sen sijaan Norjassa ja Ruotsissa koneellinen ilmanvaihto arvioitiin luonnollista paremmaksi.

3.2.2 Ilmanvaihdon toimivuus

Ilmanvaihdon toimivuutta arvioitiin mm. jäähdytyksen, vedottomuuden, sisäilman laadun ja melun kannalta. Suomalaisen haastattelun tuloksia on kuvassa 12 ja vastaavan eurooppalaisen haastattelun kuvassa 13.



Kuva 12. Haastateltujen mielipiteet ilmanvaihtojärjestelmien toimivuudesta. Arvosana 5= erittäin hyvä, 1= heikko.



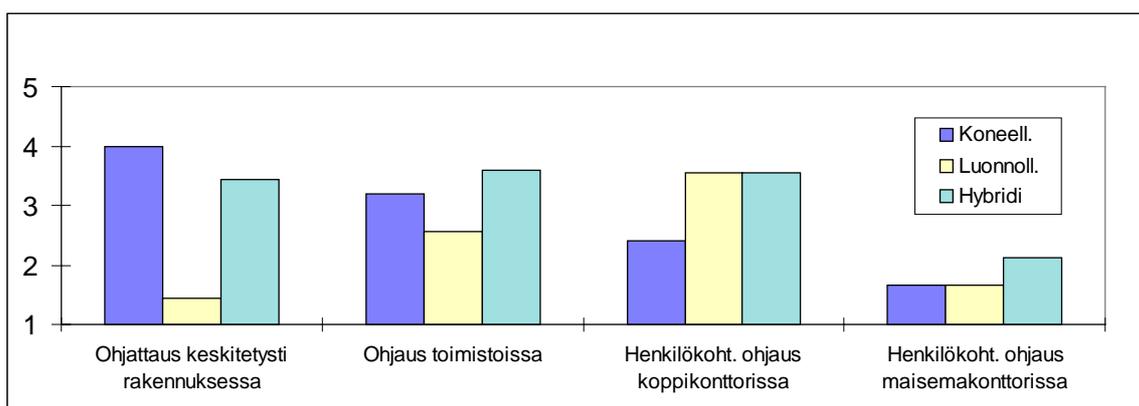
Kuva 13. Haastateltujen mielipiteet ilmanvaihtojärjestelmien toimivuudesta eurooppalaisessa NatVent-tutkimuksessa. Arvosana 5= erittäin hyvä, 1= heikko.

Jäähdytys pelkällä ilmanvaihdolla arvioitiin heikoksi, huonoimmaksi painovoimaisella järjestelmällä. Hybridijärjestelmä arvioitiin jäähdytyksen kannalta niukasti parhaimmaksi samoin kuin vetoisuuden suhteen. Koneellinen järjestelmä arvioitiin parhaaksi poistamaan huoneilman epäpuhtauksia ja estämään niiden tulo ulkoa. Hybridijärjestelmä arvioitiin tässä suhteessa selvästi heikommaksi, koska ulkoilman suodatus on ongelmallista toteuttaa. Äänieristys ulkopuoliselle melulle liittyy myös ulkoilmaaukkoihin, ja siksi tulokset ovat lähes samoja kuin ulkopuolisen melun suhteen. Ilmanvaihtojärjestelmän oma melu on vastausten mukaan vähäisintä painovoimaisessa ja hybridijärjestelmissä. Asiaan liittyviä kommentteja:

- *Kaksoiskuorijulkisivun avulla toteutettu hybridijärjestelmä voi olla paras jäähdytykseen.*
- *Vetoa ei voi aina välttää koneellisessakaan, koska jokaista venttiiliä ja käyttötilanetta ei suunnittelija ehdi tarkistaa. Ilmanvaihdon käyttötapaakaan ei voi aina tietää suunnitteluvaiheessa (ilmanvaihtosuunnittelija).*
- *Vedon välttämiseen hybridijärjestelmä tarvitsee esilämmityksen. Hyvin toteutettuna veto ei ole ongelma (viranomainen).*
- *Koneellinen järjestelmä huonosti huollettuna voi tuottaa itse hajuja (suunnittelija).*

3.2.3 Ilmanvaihdon ohjaus

Ilmanvaihdon ohjausmahdollisuuksia kysyttiin koko rakennuksen tasolla, pienemmällä alueella paikallisesti ja henkilökohtaisella tasolla. Tuloksia on kuvassa 14.



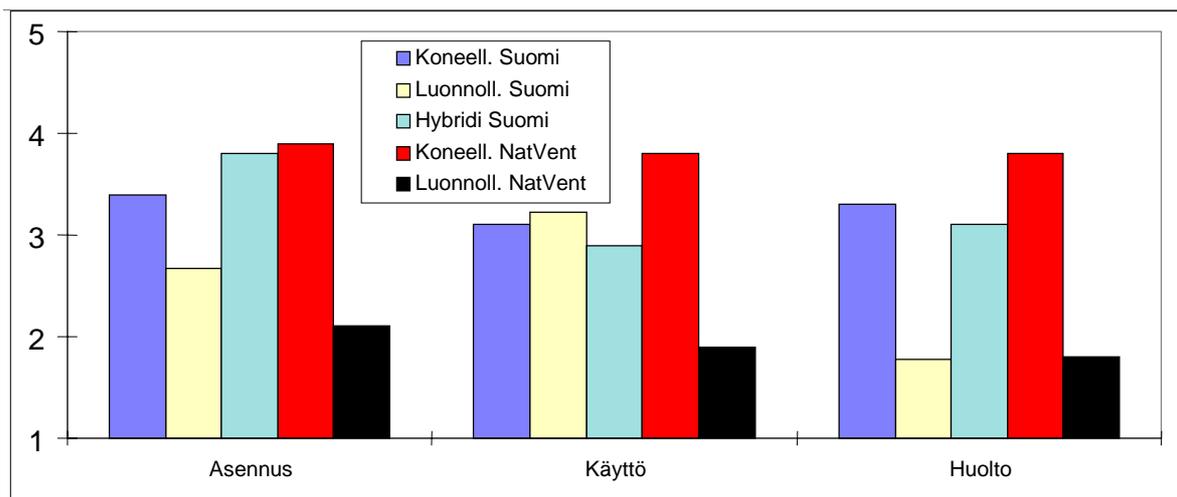
Kuva 14. Mielipiteet eri ilmanvaihtojärjestelmien ohjausmahdollisuuksista. Arvosana 5= erittäin hyvä, 1= heikko.

Painovoimaisen ilmanvaihdon ohjausmahdollisuudet arvioitiin heikoiksi rakennustasolla mutta parhaiksi henkilökohtaisella tasolla ikkunatuuletuksen ansiosta. Hybridijärjestelmä arvioitiin painovoimaisen kanssa yhtä hyväksi tässä suhteessa. Asiaan liittyviä kommentteja:

- *Koneellinen ilmanvaihto on massailmanvaihto, jossa ei ole yksilöllistä säätöä.*
- *Koneellisessa yksilöllinen säätö olisi mahdollista, mutta se on harvinainen.*

3.2.4 Kustannukset

Järjestelmien kustannuseroja arvioitiin asennuksen, huollon ja käytön näkökulmasta, kuva 15. Hybridi-ilmanvaihto arvioitiin asennuskustannuksiltaan hieman koneellista ilmanvaihtoa kalliimmaksi, mutta käyttö- ja huoltokustannuksiltaan hieman koneellista halvemmaksi.



Kuva 15. Haastateltujen mielipiteet ilmanvaihtojärjestelmien kustannuksista sekä eurooppalaisen NatVent-tutkimuksen tulokset. 5= korkeat, 1= matalat kustannukset.

Haastattelussa todettiin kustannuksista myös seuraavaa:

- *Asennus- käyttö- ja huoltokustannukset ovat koneellista pienemmät atriumtyyppisessä toimistotalossa suorat ja välilliset kustannukset huomioonottaen (kiinteistöjohtaja).*
- *Hybridijärjestelmässä tulee sekundäärikustannuksia, minkä takia asennuskustannukset koneellista suuremmat (iv-suunnittelija).*
- *Hybridijärjestelmässä on paljon automatiikkaa, joka on virhealtista ja kallista huoltaa.*

- *Jos toimintatavoitteet ovat samoja, on hybridi tuplajärjestelmänä kallein.*
- *Painovoimaista ei voi kunnolla toteuttaa, joten se on väkisin halpa (arkkitehti).*

Kuvassa 15 on myös eurooppalaisen NatVent-haastattelun tulokset. Niiden mukaan koneellinen ilmanvaihto on selvästi kalliimpi asentaa, käyttää sekä huoltaa kuin luonnollinen ilmanvaihto. Kustannusten arviointiin on voinut vaikuttaa se, että monissa maissa koneelliseen ilmanvaihtoon yhdistetään automaattisesti koneellinen jäähdytys.

3.3 Ennuste yleistymisestä, määräyksistä ja komponenttien kehitystarpeista

Useimpien haastateltavien mielestä hybridi-ilmanvaihto tulee yleistymään. Ympäristösyöt, luonnonvalon maksimointi ja käyttäjien vaatimus paremmasta vievät kehitystä eteenpäin. Esteenä kehitykselle mainittiin ennakkoluulot ja vielä ratkaisemattomat tekniset kysymykset. Rakentamismääräykset ja ohjeet eivät ole este, jos sisäilman laatu ja kokonaisenergiankulutus pystytään suunnitteluvaiheessa selvittämään rakennusvalvonnalle. Suunnittelussa tarvitaan hyvin koulutettuja ihmisiä, jotka ymmärtävät riittävän syvällisesti fysikaaliset ilmiöt. Lisäksi tarvitaan koerakennuksia, suunnitteluohjeita ja yksinkertaisia mallinnusohjelmia.

Tarvittavista komponenteista useimmin mainittiin ilman sisäänottoon liittyvät komponentit kuten tuloilman lämmityslaitteet sekä suodattimet. Näiden pitäisi toimia riittävän pienellä paine-erolla. Myös säätöjärjestelmissä arvioitiin olevan kehittämisen tarvetta. Kehitettävänä komponenttina mainittiin myös pienen painehäviön lämmöntalteenotto-laite.

3.4 Johtopäätökset haastattelusta

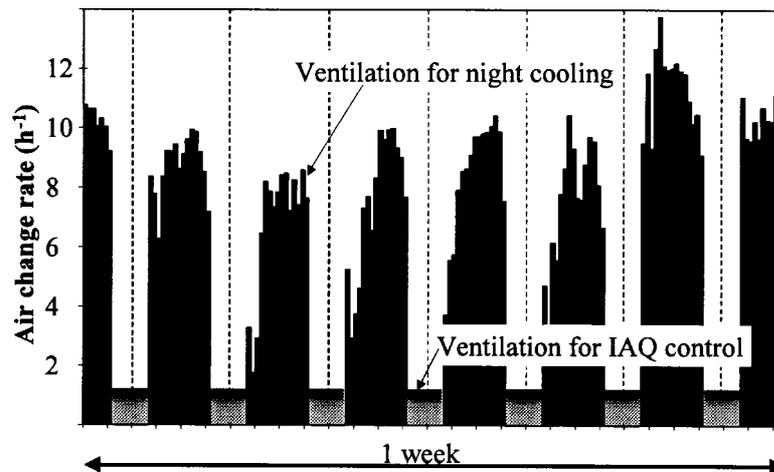
Monet haastatelluista pitivät hybridi-ilmanvaihtoa tervetulleena vaihtoehtona vakiintuneelle koneelliselle ilmanvaihdolle. Odotukset ovat yllättävänkin korkealla. Hybridi-ilmanvaihtoon liitettiin käyttäjän kannalta positiivisia tekijöitä kuten luonnonvalon hyödyntäminen, mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihtoon sekä luonnonmukaiseksi koettava meluton ympäristö. Haastattelun mukaan järjestelmän laajaan käyttöön ottoon tarvitaan toimivia demonstraatorakennuksia sekä avainkomponenttien kuten ilman sisäänoton laitteiden tuotekehitystä.

Haastattelu on tukenut tutkimuksen teknistä osaa, jossa on ideoitu hybridi-ilmanvaihdon malliratkaisuja mukana olevien yritysten kanssa.

4. Teknologian soveltamismahdollisuudet

4.1 Ilmavirrat

Useimmiten hybridi-ilmanvaihdon rakennukset suunnitellaan muuttuvalle ilmavirralle, joko automaattisesti tai manuaalisesti ohjattuna. Ilmavirtojen vaihteluväli on erityisen suuri yöjäähdytystä käytettäessä, kuva 16. Yöjäähdytys kuuluu oleellisena osana moniin painovoimaisen ja hybridi-ilmanvaihdon rakennuksiin, jolloin koneellinen jäähdytys voidaan jättää pois tai sen tehoa vähentää.



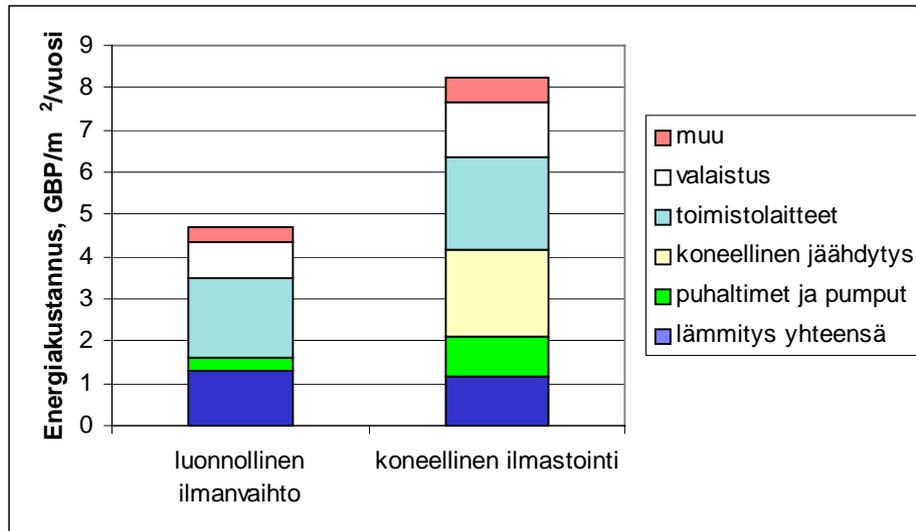
Kuva 16. Belgialaisessa toimistorakennuksessa ilmanvaihtokerroin on kymmenkertainen yöjäähdytyksen (night cooling) aikana verrattuna päiväkäyttöön (IAQ control). Viikon jakso on laskettu ESP-r-ohjelmalla [10].

Myös päiväkäytössä ilmavirtojen vaihtelu voi olla huomattava tuulen ja lämpötilaerojen takia. Hybridijärjestelmään kuuluukin usein ilmavirran rajoitus äärimmäisissä sääoloissa kuten B&O:n pääkonttorin (kuva 6) yhteydessä oli esillä. Tilakohtaiset ulkoilmavirran vaihtelut ovat erityisen suuria, jos ulkoilma otetaan hajautetusti ulkovaipan kautta. Hajautettu ulkoilman sisäänotto sopiikin varmemmin käytettäväksi avoimien tilaratkaisujen yhteydessä, jolloin ulkoilmaa tulee sisään useasta ulkoilma-aukosta.

4.2 Lämmitys- ja jäähdytysenergia

Hybridi-ilmanvaihtoa tai luonnollista ilmanvaihtoa markkinoidaan Keski-Euroopassa ja Britanniassa toimistorakennuksiin energiatehokkaana järjestelmänä. Energian säästö perustuu paljolti koneellisen jäähdytyksen vähentämiseen tai pois jättämiseen. Jäähdytys hoidetaan esimerkiksi yöjäähdytyksellä, raskaalla rakennusrungolla sekä tehokkaalla aurinkosuojauksella. Kokonaisuuteen liittyy yleensä myös tehokas luonnonvalon hy-

väksikäyttö. Kuvassa 17 on CIBSE-käsikirjassa esitetty vertailu energian kulutuksen rahallisesta arvosta luonnollisella ilmanvaihdolla sekä koneellisella ilmastoinnilla, joka sisältää koneellisen jäähdytyksen. Painovoimaisessa järjestelmässä jäädytysenergiaa ei kulu ja pumppujen ja puhaltimien energian kulutus pienenee huomattavasti.



Kuva 17. Tyypillinen energiakustannus ilmastoidussa sekä hyvin suunnitellussa painovoimaisen ilmanvaihdon toimistorakennuksessa CIBSE-käsikirjan mukaan [10]. Koskee Britannian ilmastoa. Energian hinta on vuodelta 1991.

Suomen ilmastossa lämmitysenergian tarve on suuri, joten lämmön talteenotolla varustettu koneellinen ilmanvaihto on jo energiatehokas järjestelmä. Lisäksi jäähdytyksen pois jättämisellä saavutettava energiansäästö on pienempi.

4.3 Puhallinsähkö

Koneellisen ilmanvaihdon puhallintehon luokittelusta on esimerkki taulukossa 4, jossa parhaimpaan yksikköteholuokkaan vaaditaan 1 000 W tehon alitusta 1 m³/s ilmavirtaa kohti. Tämä voidaan saada aikaan esimerkiksi 500 Pa järjestelmäpaineella ja 50 % puhallinhyötysuhteella, koska yksikkötehon lukuarvo on sama kuin järjestelmän kokonaispaine (tulo- ja poistupuolen painehäviö yhteensä) jaettuna puhaltimien hyötysuhteella. Puhallintehoon ja puhaltimien kuluttamaan sähköenergiaan voidaan siten vaikuttaa ensi sijassa järjestelmäpaineen valinnalla ja toissijaisesti varmistumalla siitä, että hyötysuhde pysyy hyvänä eri käyttötilanteissa.

Taulukko 4. Puhallintehon luokittelu standardiehdotuksen prEN 13779, November 1999, mukaan. Tulo- ja poistopuhaltimien tehot lasketaan yhteen ja ilmavirtana käytetään tulo- ja poistoilmavirtojen keskiarvoa.

Puhallintehon luokitustaso	Puhaltimien yksikköteho SFP, W/(m ³ /s) = Pa
SFP 1	< 1000
SFP 2	1000–1500
SFP 3	1500–2500
SFP 4	2500–4000
SFP 5	> 4000

Luokitustasorajat ovat ymmärrettäviä koneelliselle ilmanvaihdolle, jossa järjestelmäpaineet ovat matalimman paineen luokassakin jo yli 500 Pa, taulukko 5. Sen sijaan hybridi-ilmanvaihdon painetasot ovat huomattavasti tätä pienempiä. Ääriesimerkkinä taulukkoon 5 on otettu lähteen [13] laskelmien painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, joka on suunniteltu hyvin pienelle 20 Pa painetasolle.

Taulukko 5. Painovoimaiseksi suunnitellun toimistotalon ilmanvaihtojärjestelmän painehäviöt verrattuna koneellisen ilmanvaihdon tyypillisiin painehäviöihin, kun koneellinen järjestelmä on mitoitettu matalalle, normaalille ja korkealle painetasolle. Koneellisten järjestelmien painehäviöt on otettu standardiehdotuksesta prEN 13779, November 1999.

Komponentti	Painehäviö, Pa			
	Painovoimainen	Matala paine	Normaali	Korkea paine
Tuloilmapuoli:				
Kanavisto	3	100	200	300
Lämmitys/jäähdytyspatteri	4	40	80	120
Lämmön talteenotto	4	100	150	200
Suodatin	–	50	150	250
Äänenvaimennin	–	30	50	80
Tuloilmalaite	1	30	50	100
Ilman sisäänotto	1	20	50	70
Poistoilmapuoli:				
Kanavisto ja poistoilmaelin	2	100	200	300
Lämmön talteenotto	4	100	200	300
Suodatin	–	50	100	150
Jäteilma-aukko	1	20	40	60
Yhteensä	20	640	1270	1930

Hybridi-ilmanvaihdon järjestelmäpaineet ovat siten parhaimmillaan vain muutamia prosentteja koneellisen järjestelmän järjestelmäpaineista. Puhallinenergian kulutus voi olla hybridi-ilmanvaihdossa vielä tätäkin prosenttiosuutta pienempi, koska hybridijärjestelmä toimii osan aikaa lämpötila-erojen ja tuulen voimalla.

Taulukossa 2 esiintyvän Poikkilaakson koulun järjestelmäpaine on 1 050 Pa, eli järjestelmä on mitoitettu taulukon 5 määritelmien mukaan hieman normaalia matalapaineisemmaksi. Puhaltimien yksikköteho on ilmanvaihtosuunnittelijan sähkötehoarvion perusteella $SFP = 2\,400\text{ Pa}$, mikä vastaa hyötysuhdetta 44 % ($= 1\,050\text{ Pa}/2\,400\text{ Pa}$). Loppullinen sähkötehon tarve voi olla pienempi, etenkin käytön aikana, kun ilmavirtaa ohjataan taajuusmuuttajalla tarpeen mukaan.

4.4 Palotekniikka

Suomalaiset vaatimukset ilmanvaihtojärjestelmien paloturvallisuudelle on määritelty yleisellä tasolla rakentamismääräyskokoelman osassa E1 ”Rakennusten paloturvallisuus” ja hyväksyttävien ratkaisujen osalta osassa E7, ”Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus”. Viimemainittu käsittelee pelkästään koneellista ilmanvaihtoa, joten hybridi-ilmanvaihtolaitoksen paloturvallisuus on selvitettävä kussakin tilanteessa erikseen. Ilmanvaihdon osalta E1 toteaa seuraavaa:

- Ilmanvaihtolaitteet on tehtävä niin, etteivät ne lisää palon tai savukaasujen leviämistä.
- Ilmanvaihtokanavien seinämät on yleensä tehtävä palamattomista rakennustarvikkeista.
- Kanavat tulee voida puhdistaa helposti.

Paloturvallisuuden kannalta joudutaan tarkastelemaan seuraavia seikkoja:

- Pinta-ala yhdessä palo-osastossa voi olla enintään $2\,400\text{ m}^2$.
- Läpiviennit osastoivan rakennusosan läpi, esimerkiksi ilmastointikanavat eivät saa heikentää olennaisesti osastoitavuutta.
- Hätätilanteessa käytettävät uloskäytävät muodostetaan yleensä omaksi palo-osastokseen.
- Rakennukseen tulee rakentaa sen eri tiloihin sopiva mahdollisuus savunpoistoon.

Hybridi-ilmanvaihdon kannalta useat palomääräykset ja ohjeet ovat todennäköisesti järjestelmän suunnittelun esteitä, koska hybridi-ilmanvaihto perustuu paljolti ilman vapaaseen kulkuun rakenteiden ja aukkojen kautta. Osastojen rajoitettu koko tai muut osastoille asetetut vaatimukset johtavat siihen, että osastoille tarvitaan erilliset ilmanvaihtojärjestelmät. Läpivientien ja aukkojen rajoitukset saattavat pienentää virtausauk-

kojen, kuten ikkunoiden, ovien ja ulkoilma-aukkojen kokoa ja vaatia automaattisesti sulkeutuvia ovia, ikkunoita ja kanavia.

Palotekniset seikat saattavat siten nostaa hybridi-ilmanvaihdon kustannuksia ainakin ennen kuin hybridi-ilmanvaihtojärjestelmät vakiintuvat ja kokemusta kertyy paloturvallisuuden asettamista vaatimuksista.

4.5 Akustiikka

Hybridi-ilmanvaihto tuo mukanaan ilmavirtausreittejä, jotka kuljettavat myös ääntä rakennuksen ulkopuolelta sekä rakennuksen sisällä tilasta toiseen.

Suomen rakentamismääräyskokoelman C1 ”Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa” mukaan toimistohuoneiden ja luokkahuoneiden ääneneristys on toteutettava niin, että toimintaa vastaavat riittävän hyvät ääniolosuhteet on mahdollista saavuttaa. Luokkahuoneen ja käytävän välillä annetaan ohjeellinen ilmaääneneristysluku. Kuvassa 18 on esitetty eräs toteutus.



Kuva 18. Äänenvaimennettu siirtoilmalaite Poikkilaakson koulun luokkahuoneen ja käytävän välillä.

Ilmanvaihtomelun osalta hybridijärjestelmä voi johtaa parempaan tulokseen kuin tavanomainen koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä, koska järjestelmän virtausnopeudet ja paine-erot ovat oleellisesti pienempiä.

4.6 Suodatus

Tuloilman kuitusuodattimien painehäviö on yleensä hyvin suuri verrattuna painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän käytettävissä olevaan paine-eroon. Suodatin voidaan mitoittaa niin suureksi, että painehäviö jää riittävän pieneksi kuten norjalaisessa Grongin koulussa on tehty: taulukon 3 mukaan EU7-suodattimen painehäviö 8 Pa on runsas neljännes koko ilmanvaihtojärjestelmän painehäviöstä.

Kuitusuodattimen vaihtoehtona on sähkösuodatus tai ionisoiva suodatus, joilla on pienet painehäviöt. Käyttökokemuksia hybridi-ilmanvaihdon yhteydessä ei vielä ole mutta Ruusutorpan kouluun Espooseen (kuva 3) on tulossa ionisoiva suodatin. Järjestelmän olennaisimmat osat ovat keräilykammio ja siihen sijoitettu korkeajännitetanko [6]. Keräilykammion pintaan tarttunut pöly poistetaan vesisuihkuilla tai mekaanisella tärytyksellä.

Suomen rakentamismääräykset asettavat tuloilman puhtausvaatimuksen sisäilman puhtaudelle annettujen vaatimusten perusteella. Tarvittaessa tuloilma on puhdistettava. Suodatus voidaan siten jättää pois tai sitä ei tarvitse käyttää, jos ulkoilma on riittävän puhdasta. Näin on usein keskusta-alueiden ulkopuolella ja muulloin kuin kevätkausina, jolloin ilmassa on runsaasti katupölyä tai siitepölyä. Norjalaisten kokemusten mukaan tuloilmatunneli eli kulvert toimii varsin hyvin siitepölyn suodattimena [21]. Eräs mahdollisuus on ohjata hybridi-ilmanvaihdon toimintaa siten, että ulkoilman ollessa puhdasta voidaan ilma ottaa sisään suodattamattomana.

4.7 Ilmanjako ja vedottomuus

Kokemukset asuntojen ulkoilmaventtiileistä [11] viittaavat siihen, että koulujen ja toimistojen ilmavirroilla vedottomuutta on hyvin vaikea saada aikaan lämmittämättä tuloilmaa. Tätä tukee se, että tuloilman esilämmitys kuuluu kaikkien taulukon 2 koulujen järjestelmään; lämmityspatteri on joko kanavistossa tai päätelaitteessa. Keski-Ruotsista löytyy varoittava esimerkki epäonnistuneesta kokeilusta, jossa tuloilman esilämmitys on jätetty pois [12]. Kyseisessä rakennuksessa on peruskorjauksen yhteydessä asennettu koneellinen poistoilmajärjestelmä, jossa tuloilma jaetaan luokkiin lämmittämättömänä katossa olevien kangaskanavien kautta.

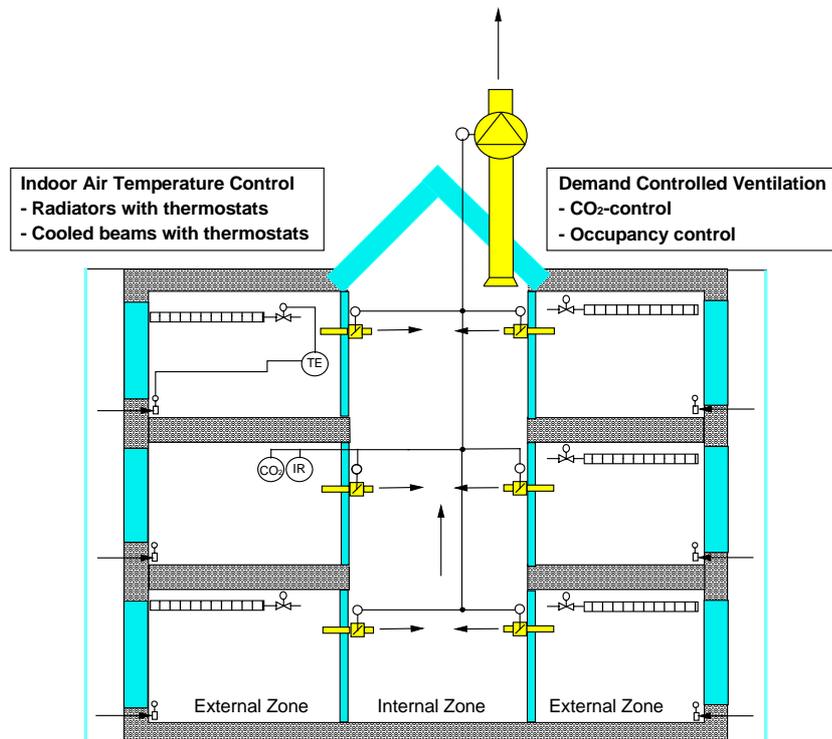
Kun tuloilma esilämmitetään, voidaan käyttää joko sekoitettavaa tai syrjäyttävää ilmanjakoa. Syrjäyttävää ilmanjakoa puoltaa se, että hybridi-ilmanvaihdossa tärkeä päätelaitteen painehäviö voidaan pitää pienempänä kuin sekoittavassa ilmanjaossa.

5. Valitut hybridi-ilmanvaihdon konseptit

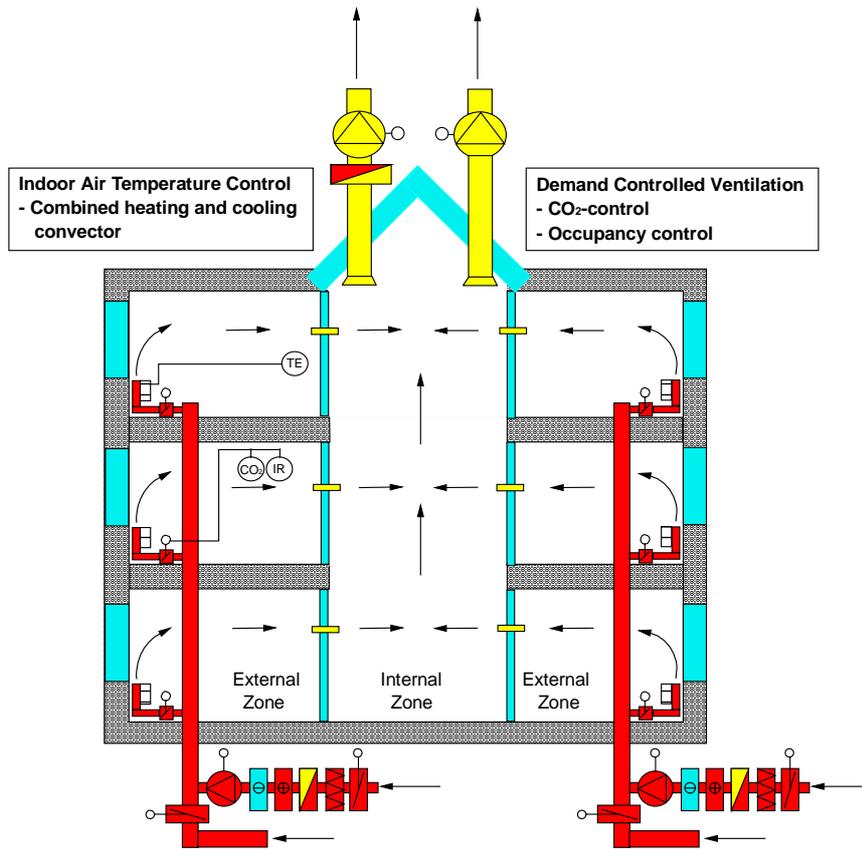
Lähtökohtana projektissa oli, että hybridi-ilmanvaihtojärjestelmien on sopeuduttava Suomen ilmastoon, sisäilmastoluokituksen [2] tavoitearvoihin ja mitoituslämpökuoriin. Järjestelmävaihtoehdoissa päädyttiin kolmeen päätyyppiin:

- I. Koneellinen poistoilmanvaihto, joka voi toimia myös painovoimaisella alueella (kuva 19),
- II. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka voi toimia myös painovoimaisena (kuva 20) ja
- III. Matalapaineinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä (kuva 21).

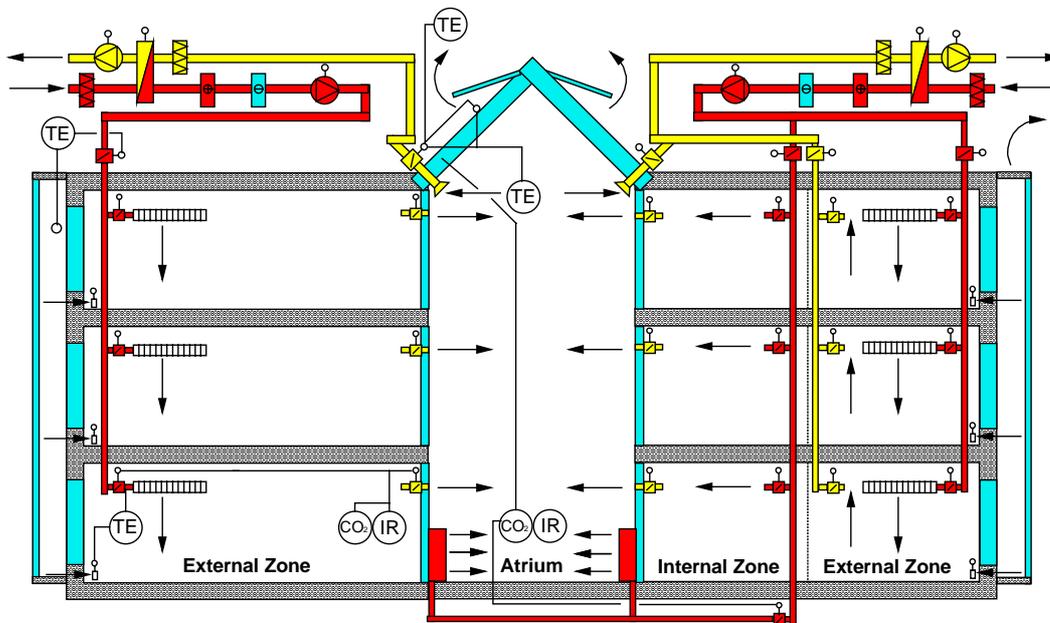
Järjestelmät sisältävät luonnollisen ilmanvaihdon elementtejä kuten ulkoilma-aukkoja, avattavia ikkunoita, kattoluukkuja, kaksoiskuorijulkisivuja ja niihin liittyviä ohjaus- ja säätölaitteita. Konsepteissa II ja III on poistoilman lämmön talteenotto. Järjestelmien toimiessa painovoimaisena ulkoilman suodatusvaatimus on lievempi. Syynä on vähäisempi suodatustarve keskusta-alueiden ulkopuolella ja muulloin kuin kevätkausina.



Kuva 19. Ilmanvaihtokonsepti I: koneellinen poistoilmanvaihto, joka voi toimia myös painovoimaisella alueella [15].



Kuva 20. Ilmanvaihkokonsepti II: koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka voi toimia myös painovoimaisena [15].



Kuva 21. Ilmanvaihtokonsepti III: matalapaineinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä [15].

Kolmen ilmanvaihtokonseptin ominaisuuksia suunnittelun kannalta on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Valittujen ilmanvaihtokonseptien suunnittelun näkökohtia [15].

Ominaisuus	Konsepti I	Konsepti II	Konsepti III
Rakennusmuoto	Runkoleveys rajoitettu	Ei rajoituksia	Ei rajoituksia
Kerrosten määrä	Ei tarkkaa rajaa, koneellinen poisto	Ei tarkkaa rajaa, koneellinen poisto	Ei rajoituksia
Kaksikerros-julkisivu	Tarvitaan tuloilman esilämmitykseen	Vaihtoehtoinen	Vaihtoehtoinen, tuloilman esilämmitykseen
Pohjaratkaisu	Ei varsinainen rajoitus avokonttori parempi	Ei varsinainen rajoitus avokonttori parempi	Ei rajoitusta
Ilmanvaihto	Konsepti I	Konsepti II	Konsepti III
Painehäviö	<100 Pa, kon. poisto	<100 Pa, kon. poisto <500 Pa muuten	< 500 Pa
Komponenttikoko	Suuret pääte- ja säätölaitteet	Suuret kanavat, muut komponentit hieman normaalia suuremmat	Hieman normaalia suuremmat
Komponenttien saatavuus	Päätelaitteita ja säätölaitteita rajoitetusti	Päätelaitteita rajoitetusti, keskusyksikkö normaali	Saatavissa normaalisti
Tekninen toteutettavuus	Lähes normaali	Lähes normaali	Lähes normaali
Suunnittelu	Säätölaitteiden mitoitus tarkkaa	Älykäs säätöjärjestelmä, keskuskoneen mitoitus	Älykäs säätöjärjestelmä, keskuskoneen mitoitus
Tilavaatimus	Normaalia pienempi, kanavien määrä minimi	Normaalia pienempi	Normaalia hieman suurempi
Suodatus	Kuitusuodatin mahdollinen painovoimaisena suodatus rajoitettua	Kuitusuodatin mahdollinen painovoimaisena ei suodatusta	Kuitusuodatin mahdollinen painovoimaisena suodatus rajoitettua
Energiatehokkuus	Puhaltimien osalta normaalia parempi, lämmitys normaalia heikompi, ei lämmön talteenottoa	Puhaltimien osalta normaalia parempi, lämmitys lähes normaali, vesikiertoinen lämmön talteenotto	Puhaltimien osalta normaalia parempi, lämmitys normaalia parempi
Ikkunoiden avaus	Vaihtoehto välikausina	Vaihtoehto välikausina	Vaihtoehto välikausina
Sisäilmasto	Hyvä, kosteutta kesällä	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä
Mahdollisuus vaikuttaa sisäilmastoon	Yksilöllinen ohjaus mahdollista Kosteutta kesällä	Keskitetty ja yksilöllinen ohjaus mahdollista	Keskitetty ja yksilöllinen ohjaus mahdollista
Investointikustannus	Normaalia pienempi	Normaali	Normaalia suurempi
Joustavuus	Hyvä	Hyvä	Hyvä

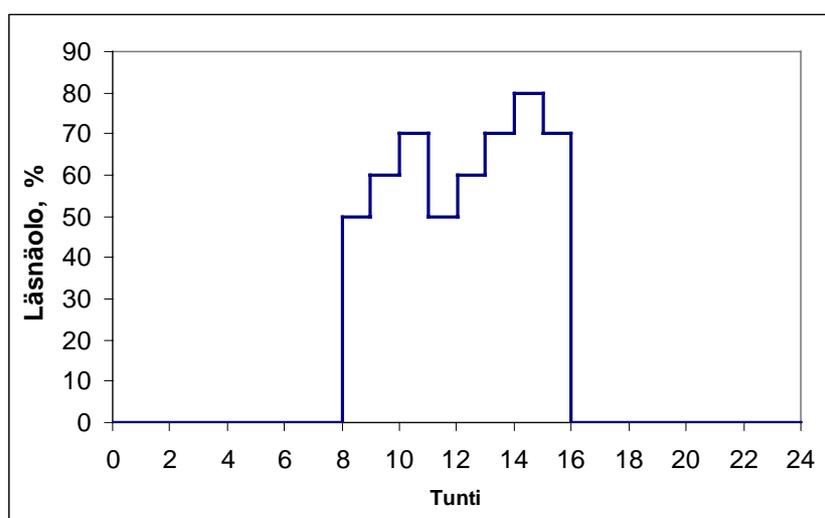
6. Konseptien 1 ja 2 simulointi

6.1 Simuloinnin suoritustapa ja lähtötiedot

Tässä luvussa on simuloitu edellä esitettyjen ilmanvaihtokonseptien 1 ja 2 toimivuutta käyttäen IDA-ICE-laskentaohjelmistoa. Konsepteja ja erityisesti ilmavirran säätöä on samalla edelleen kehitetty. Sama rakennus laskettiin vertailun vuoksi myös tavallisella tulo- ja poistoilmajärjestelmällä, erikseen vakioilmavirralla ja tarpeen mukaan muuttuvalla ilmavirralla.

Rakennuksen määrittelyssä on käytetty lähtökohtana LVIS-2000-projektissa määriteltyä toimistorakennusta [20] ja sen rakenteita. Simuloidussa rakennuksessa on 5 tilaratkaisuiltaan samanlaista kerrosta. Rakennuksen pituus on 54 m, leveys 19,2 m, kokonaispinta-ala 4 300 m² ja tilavuus 15 070 m³. Alkuperäiseen LVIS-2000-rakennukseen on lisätty koko rakennuksen halkaiseva atrium, jonka leveys on 4 m ja pinta-ala 215 m². Atriumtilan katossa on 50 m² ikkuna. Yhden avokonttorin pinta-ala on 408,5 m² ja huonekorkeus 2,9 m. Avokonttoritilan ikkunoiden yhteispinta-ala on 57 m². Samankokoisia avokonttoreita on rakennuksessa 10 kappaletta. Rakennus on tiivis; ns. ilmavuotoluku eli ilmanvaihto 50 Pa testipaineella on 0,55 vaihtoa tunnissa. Ilmavuodot on oletettu tasaisesti jakautuneeksi eri rakennuksen osiin.

Konttorien valaistuskuorma oli simuloinneissa 12 W/m² ja laitekuorma 21 W/m². Henkilökuorma oli 60 henkilöä kussakin avokonttorissa ja se noudatti kuvan 22 mukaista läsnäoloprofiilia. Kuormat olivat päällä arkisin kello 8–16. Ilmanvaihto oli kuitenkin toiminnassa arkipäivisin kello 6–18. Atriumtilan valaistuskuorma oli 12 W/m², laitekuorma 1 kW ja henkilökuorma 20 henkilöä.



Kuva 22. Työntekijöiden läsnäoloprofiili.

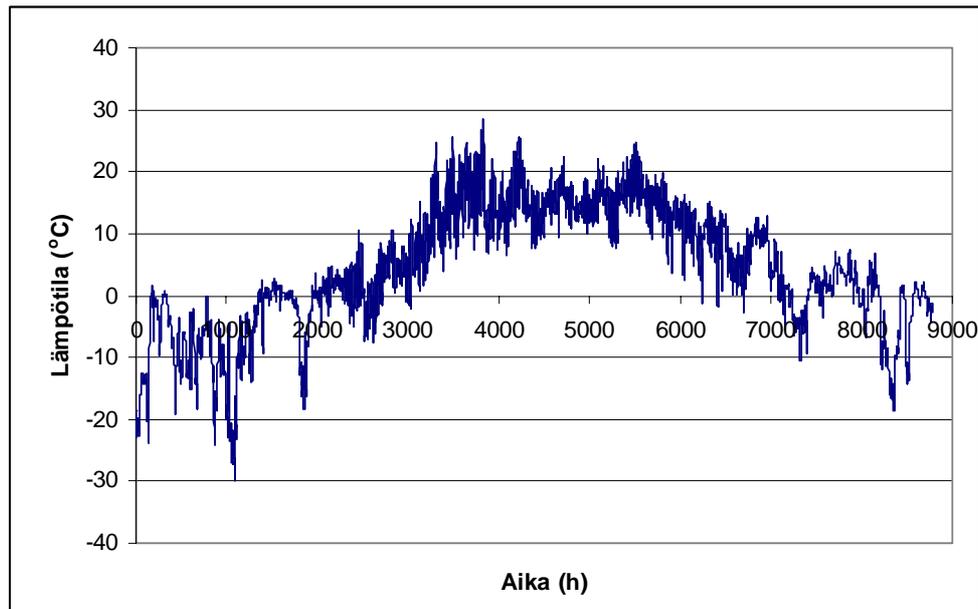
Rakennuksessa on vesikiertoinen patterilämmitys ja koneellinen jäähdytys jäähdytys-palkeilla. Sisälämpötilan tavoitetaso lämmityksessä on 21 °C ja jäähdytyksessä 22 °C. Jäähdytysjärjestelmässä hyödynnetään vapaajäähdytystä siten, että alle 8 °C ulkolämpötilalla tarvittava jäähdytysteho saadaan ulkoilmasta eikä jäähdytyskonetta tällöin käytetä. Atriumtilan vertikaalinen lämpötilagradientti asetettiin simuloinneissa vakioarvoon 0,2 °C/m.

Simuloinneissa käytettiin testivuoden 1979 Helsingin säätä. Taulukossa 7 on esitetty tarkemmin seuraavassa käytettävien kesä- ja talvipäivien säätä. Kuvasta 23 näkyy ulkolämpötilat koko vuoden aikana.

Taulukko 7. Esimerkkinä käytettävien kesä- ja talvipäivien sää.

1. kesäkuuta						3. tammikuuta					
Aika h	Lämpötila °C	Kosteus %	Tuulen suunta °	Tuulen nopeus m/s	Auringon säteily W/m ²	Aika h	Lämpötila °C	Kosteus %	Tuulen suunta °	Tuulen nopeus m/s	Auringon säteily W/m ²
1	16,8	58	320	3	0	1	-15,9	76	30	8	0
2	15,7	56	340	3	0	2	-15,9	81	30	7	0
3	15,6	54	350	3	0	3	-15,6	83	30	7	0
4	15,5	52	360	3	0	4	-15,3	85	30	7	0
5	15,4	51	10	3	164	5	-15,0	86	30	8	0
6	16,3	50	30	4	425	6	-14,8	84	30	8	0
7	17,2	49	40	5	285	7	-14,6	82	30	8	0
8	18,0	49	60	5	737	8	-14,3	79	30	8	0
9	19,3	45	60	4	401	9	-14,1	79	30	8	0
10	20,6	41	60	3	660	10	-13,9	79	30	8	0
11	21,8	36	60	3	832	11	-13,8	80	30	8	32
12	22,0	38	90	4	699	12	-13,7	80	30	8	25
13	22,2	40	130	5	837	13	-13,6	80	30	8	0
14	22,4	41	160	5	826	14	-13,5	80	30	7	35
15	22,1	40	160	5	804	15	-13,3	80	30	7	2
16	21,8	39	170	5	768	16	-13,1	80	40	7	0
17	21,5	39	170	5	711	17	-13,0	81	40	6	0
18	20,8	38	170	4	618	18	-12,9	81	40	6	0
19	20,1	37	160	3	467	19	-12,8	81	50	6	0
20	19,4	36	160	3	217	20	-12,7	81	50	7	0
21	17,5	44	130	2	0	21	-12,7	81	50	7	0
22	15,6	52	60	1	0	22	-12,7	81	50	7	0
23	13,8	60	30	1	0	23	-12,7	81	50	7	0
24	12,8	62	30	1	0	24	-12,8	82	50	7	0

Energian hintalaskelmissa sähkön hinta oli 70,3 €/MWh ja kaukolämmön hinta 29,4 €/MWh. Nämä vastaavat Espoon hintatasoa kesällä 2002 veroineen. Jäähdytyksen kylmäkerroin (COP) oli 2,0.



Kuva 23. Helsingin mallivuoden 1979 ulkolämpötilat tunti tunnilta.

6.2 Laskentatapaukset

6.2.1 Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä vakioilmavirralla

Vertailun vuoksi rakennus laskettiin myös tavallisella vakioilmavirtajärjestelmällä, jonka ilmavirta oli 2 l/sm^2 ($2,5 \text{ l/h}$). Lämmön talteenoton hyötysuhde oli 70 % ja tuloilman lämpötila 18 °C kuten muissakin laskentatapauksissa, joissa on keskitetty tuloilmapatteri. Puhaltimien paine-erot ja puhallinteho ilmavirtaa kohti (SFP-luku) ovat taulukossa 8, jossa on myös muiden laskentatapausten arvot.

Taulukko 8. Puhallinpaine ja puhallinteho ilmavirtaa kohti ($SFP = \text{Specific Fan Power}$) eri tapauksissa. SFP on laskettu kaavalla (tulopuhaltimen paine+ poistopuhaltimen paine)/puhallinhyötysuhde. Puhallinhyötysuhde oli 0,65.

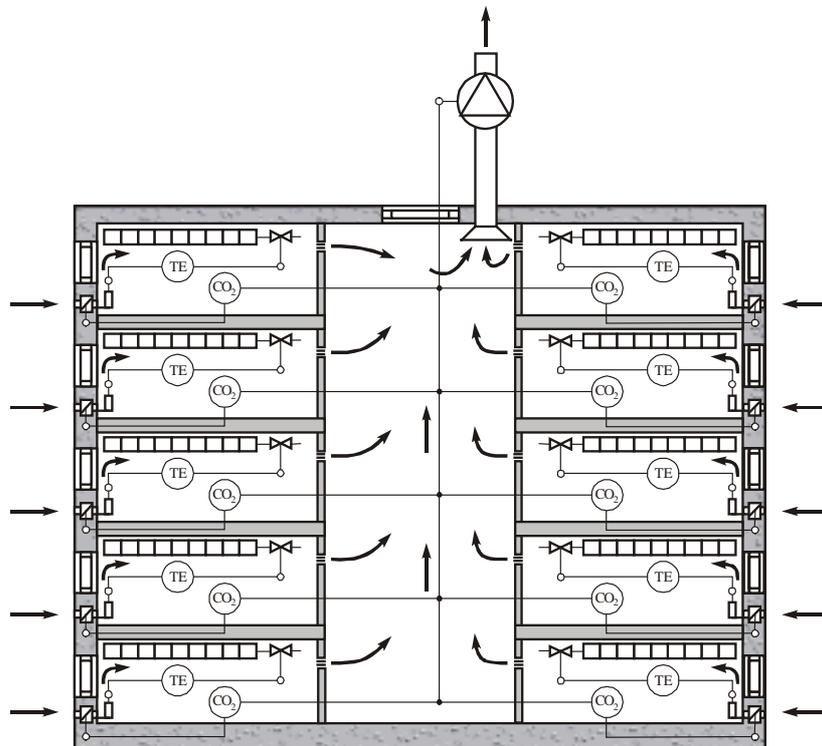
Järjestelmä	Tulopuhaltimen paine, Pa	Poistopuhaltimen paine, Pa	SFP, Pa = $W/(m^3/s)$
Tulo- ja poistojärjestelmä, vakio	860	615	2269
Tulo- ja poistojärjestelmä, muuttuva	860	615	2269
Hybridikonsepti 1	0	100	154
Hybridikonsepti 1 kaksoisfasadi	0	100	154
Hybridikonsepti 2	400 tai 0	100	769 tai 154

6.2.2 Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla

Toisen referenssitapauksen ilmanvaihto oli toteutettu muuttuvan ilmavirran järjestelmällä, jonka minimi-ilmavirta on $0,5 \text{ l/sm}^2$ ja maksimi-ilmavirta on $1,0 \text{ l/sm}^2$. Vastaavat ilmanvaihtokertoimet olivat $0,62 \text{ 1/h}$ ja $1,24 \text{ 1/h}$. Ilmavirtaa säädettiin tilakohtaisesti sisäilman hiilidioksidipitoisuuden mukaan, jonka tavoitearvo oli alle 900 ppm . Sääto oli toteutettu siten, että ilmanvaihto lisääntyi lineaarisesti minimistä maksimiin pitoisuuksien 700 ppm ja 800 ppm välillä. Rakennuksen muut järjestelmät ja sisäiset kuormat olivat samat kuin vakioilmavirtatapauksessa.

6.2.3 Hybridi 1 -konsepti

Simuloidun hybridi 1 -konseptin periaatekaavio on esitetty kuvassa 24. Ilma tulee toimitoihin sisään raitisilmaradiaattoreista, jotka oli varustettu säätöpelleillä. Ilma siirtyy siirtoilmasäleikköjen kautta atriumiin, jonka katosta se poistuu lyhyen kanaviston läpi puhaltimen avulla ulos. Simuloinneissa on oletettu, että samassa konttorissa lämmitys ja jäähdytys eivät ole samaan aikaan käytössä.

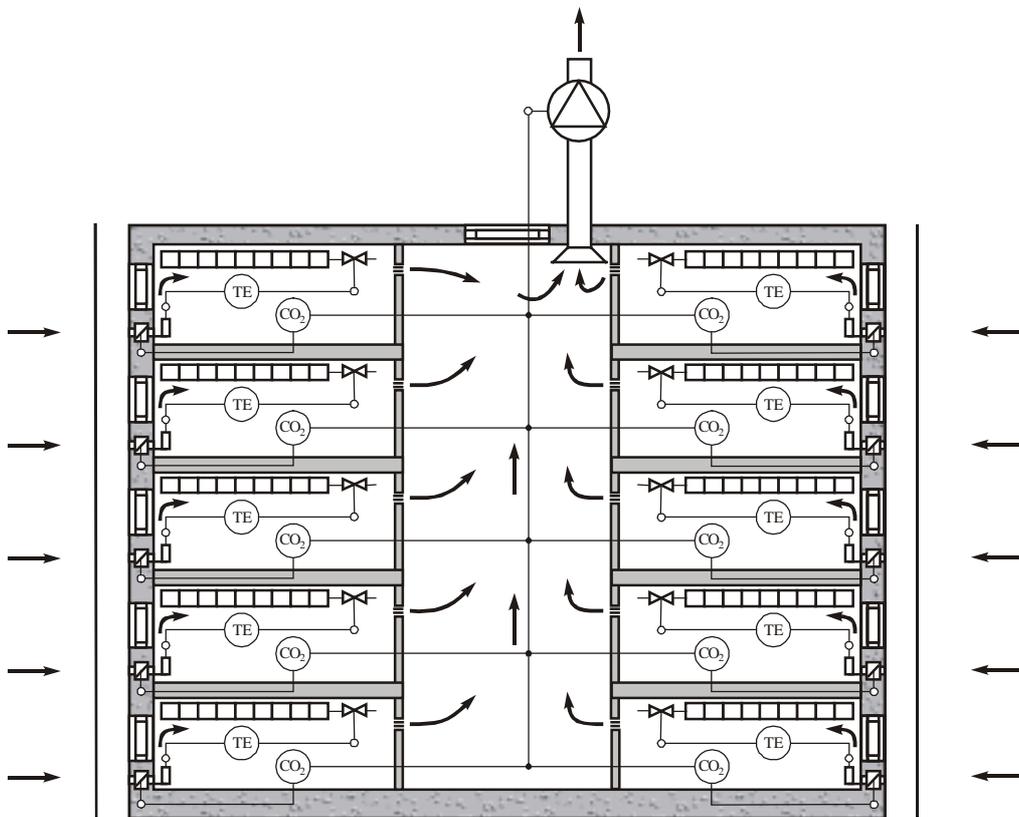


Kuva 24. Hybridi 1 -ilmanvaihtokonseptin periaatekaavio.

Tuloilman säätöpelti toimii huonetilan hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Konttorin minimi-ilmavirta on $0,5 \text{ l/sm}^2$ ja maksimi-ilmavirta $1,0 \text{ l/sm}^2$. Poistoilmapuhallinta ohjataan toimistotilojen hiilidioksidianturien perusteella.

6.2.4 Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla

Hybridi 1 -konsepti simuloitiin myös rakennuksella, johon oli lisätty lasinen kaksoisjulkisivu etelä- ja pohjoisfasadeille (kuva 25). Kaksoisjulkisivu on tehty 6 mm paksusta karkaistusta lasista. Kaksoisjulkisivun etäisyys ulkoseinästä on 800 mm ja kerrosten väliset aukot sekä ylä- ja alapään aukot olivat noin $1,5 \text{ m}^2$. Ilmavirran säädön periaate on sama kuin edellä, mutta säätö viritettiin uudelleen, jotta se olisi toiminut halutusti.

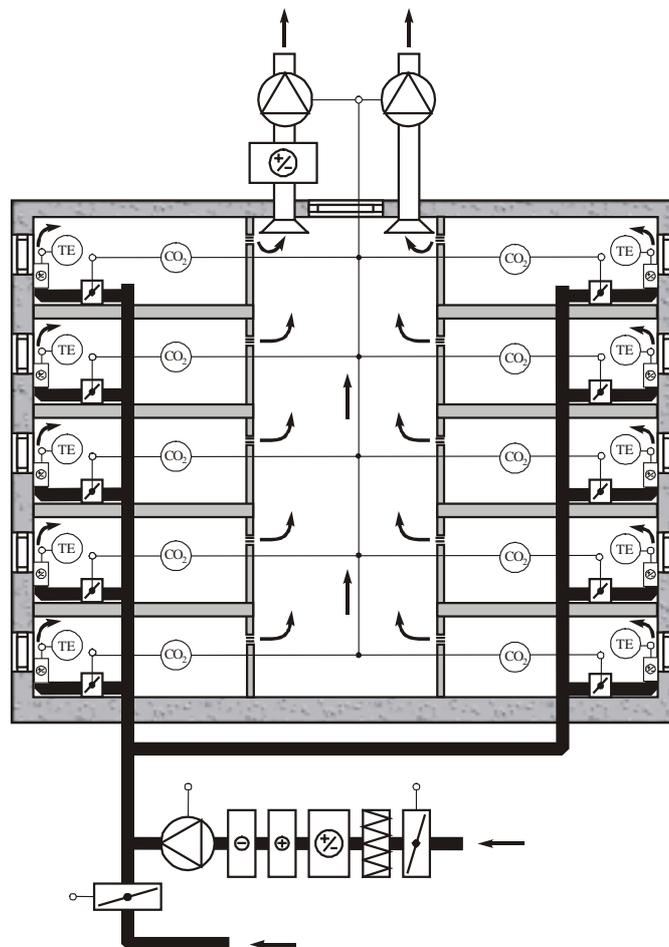


Kuva 25. Hybridi 1 -ilmanvaihtokonseptin kaavio rakennuksessa, jossa on kaksoisjulkisivu.

6.2.5 Hybridi 2 -konsepti

Hybridi 2 -ilmanvaihtokonseptin periaatekaavio on esitetty kuvassa 26. Poistoilmakanavisto on lyhyt ja keskitetty atriumin yläosaan. Tuloilma tuodaan sisään lämmitys- ja jäähdytyspatterilla varustetun puhallinkonvektorin läpi. Konseptissa oli kaksi vaihtoehtoista tapaa tuloilman käsittelylle. Tuloilma otetaan joko suoraan ulkoa ilman mitään käsittelyä tai vaihtoehtoisesti tuloilmapuhaltimen, jäähdytyspatterin, lämmityspatterin, suodattimen ja lämmön talteenottopatterin kautta. Koneellista tuloilmajärjestelmää käytetään silloin kun se on taloudellisesti kannattavaa. Muulloin tuloilma otetaan sisään suoraan ulkoa tuloilmakanaviston läpi. Rakennuksen minimi-ilmavirta on $0,5 \text{ l/sm}^2$ ja maksimi-ilmavirta $1,0 \text{ l/sm}^2$, jota ohjataan avokonttorien hiilidioksidipitoisuuden perusteella samoilla parametreilla kuin vaihtuvaihmavirtaisessa referenssitapauksessa.

Rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät puhallinkonvektoria lukuun ottamatta olivat samat kuin vakioilmavirtatapauksessa. Myös sisäilman lämpötilan tavoitetaso oli sama kuin muissakin konsepteissa eli lämmitykselle 21 °C ja jäähdytykselle 22 °C .

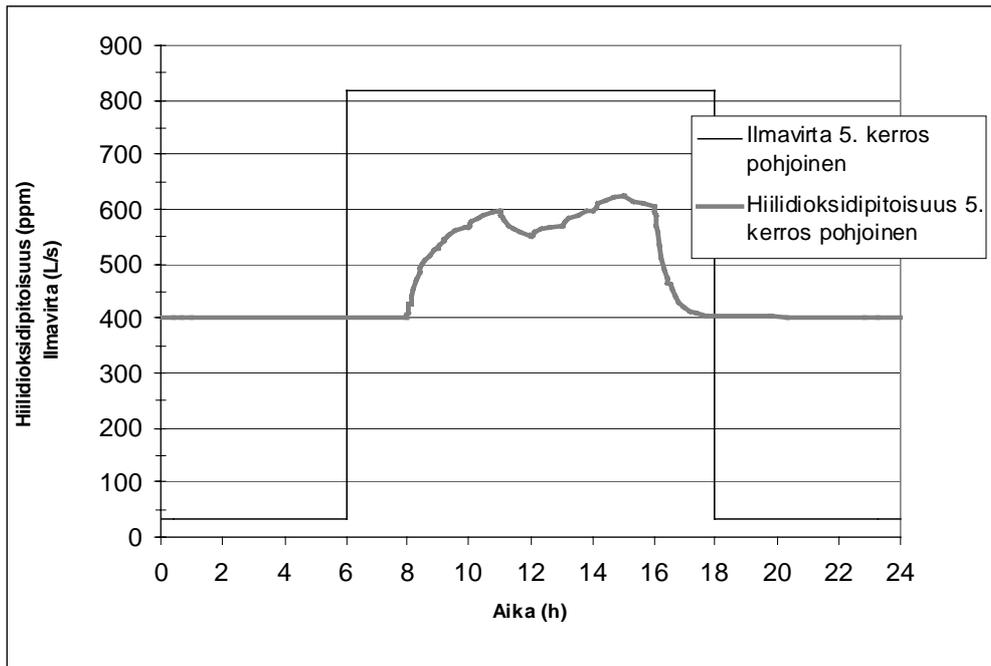


Kuva 26. Hybridi 2 -ilmanvaihtokonseptin periaatekaavio.

6.3 Sisäilmasto ja säädön toiminta

6.3.1 Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä vakioilmavirralla

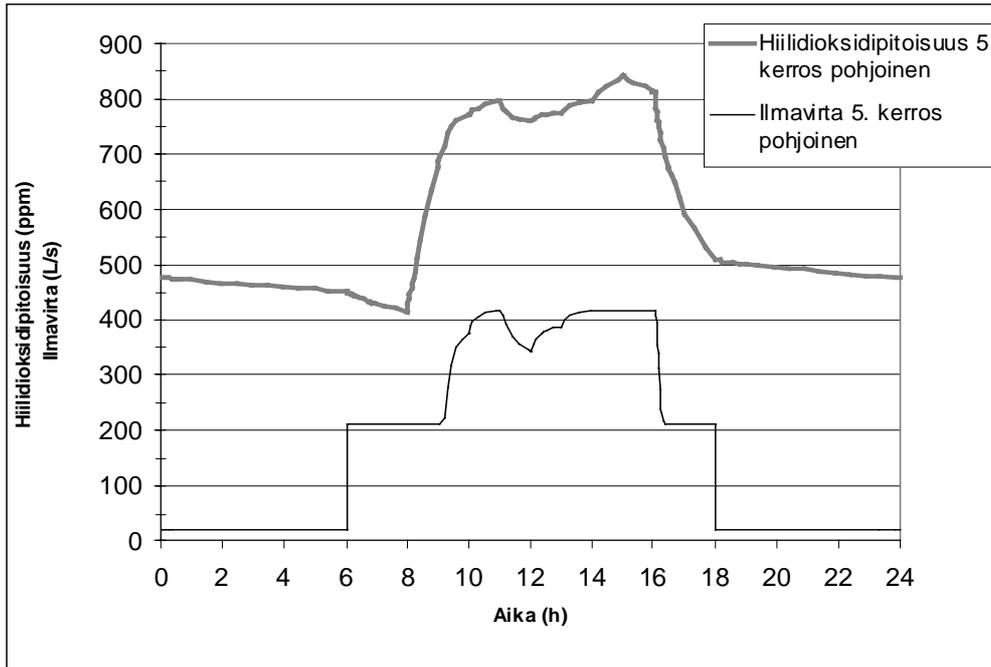
Sisäilman laatu oli vakioilmavirtajärjestelmällä erinomainen. Kuvasta 27 havaitaan, että ilman hiilidioksidipitoisuus ylittää 600 ppm vain lyhytaikaisesti päivän aikana. Ilmavirta on koneen käyntiaikana vakio 820 l/s vastaten ilmanvaihtokerrointa 2,5 1/h.



Kuva 27. Ilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus 5. kerroksen etelähuoneessa 3. tammikuuta vakioilmavirralla.

6.3.2 Koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä tarpeenmukaisella ilmanvaihhdolla

Ilmamääräsääteinen järjestelmä on mitoitettu pitämään sisäilman hiilidioksidipitoisuus alle 900 ppm, mikä simuloinnin perustella (kuva 28) toteutui hyvin. Ilmavirta oli korkeimmillaan 420 l/s (1,3 1/h).

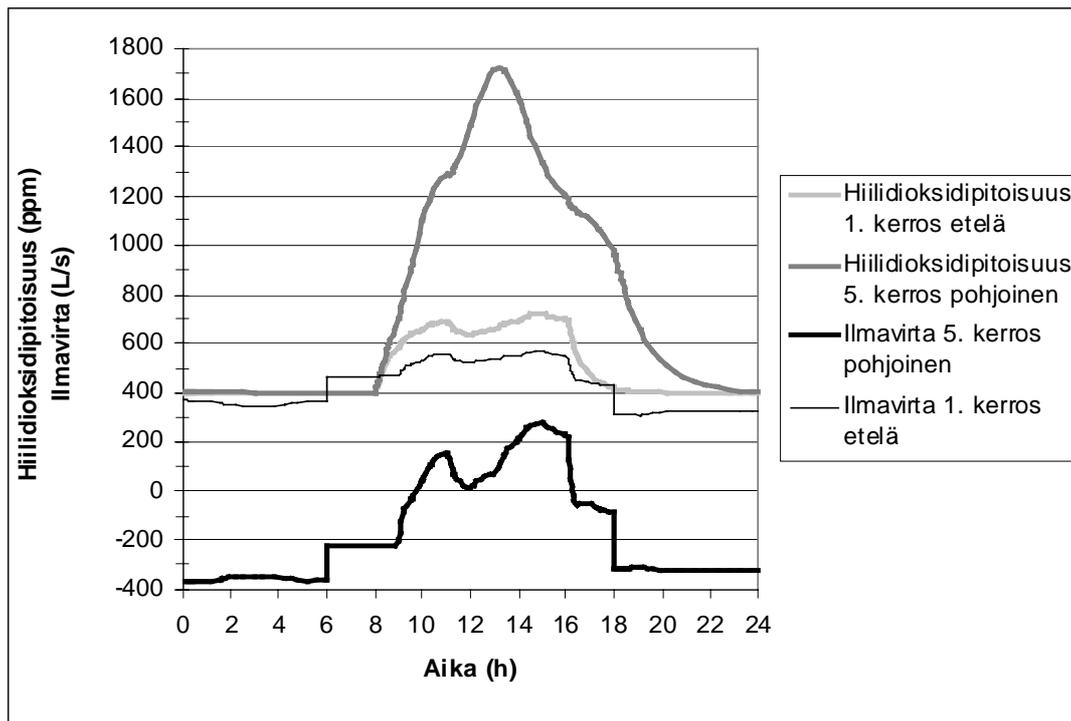


Kuva 28. Ilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus 5. kerroksen pohjoiskonttorissa 3. tammi-kuuta tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla.

6.3.3 Hybridi 1 -konsepti ilman säätyviä tuloilmaventtiilejä

Hybridi 1 -konsepti simuloitiin vertailun vuoksi myös yksinkertaisilla tuloilmaventtiileillä, joita ei säädetä hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Tuloilma-aukot olivat kaikissa avokonttoreissa kaiken aikaa samankokoiset (IDA-ICE-ohjelman parametri ELA 0,075 m²).

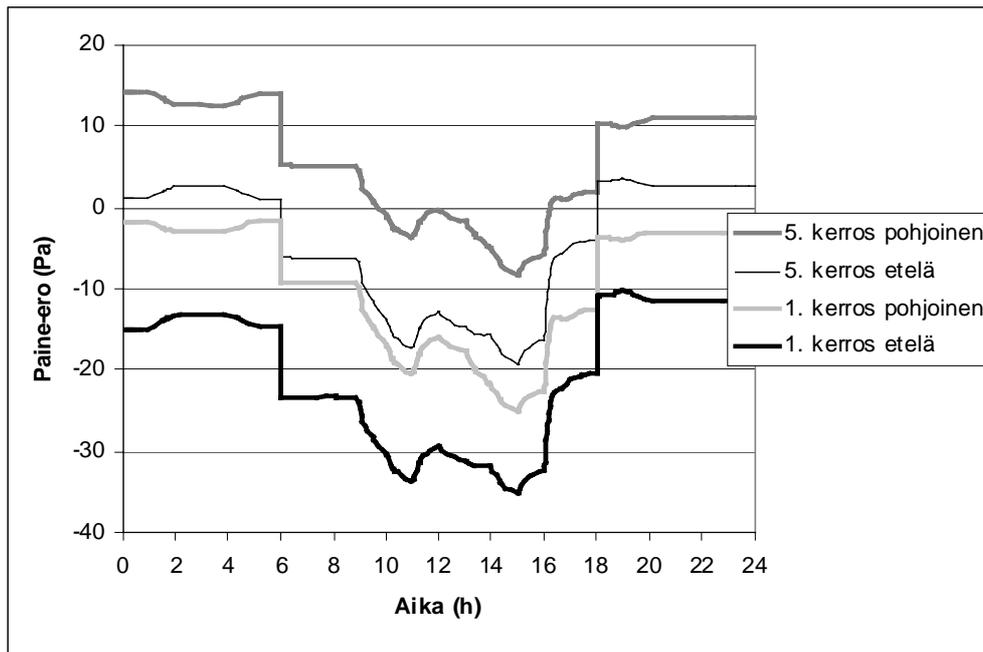
Kuvassa 29 on esitetty alimman ja ylimmän kerroksen ilmavirrat ja hiilidioksidipitoisuus talvipäivänä. Ensimmäisen kerroksen eteläisessä avokonttorissa sisäilman hiilidioksidipitoisuus pysyi alle suunnitteluarvon 900 ppm. Sen sijaan viidennen kerroksen pohjoisen avokonttorin sisäilman hiilidioksidipitoisuus nousi yli 1 600 ppm:n ja oli siten huomattavasti suunnitteluarvon yläpuolella.



Kuva 29. Ilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus 5. kerroksen pohjoispuolen ja 1. kerroksen eteläpuolen avokonttoreissa 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti ilman säätyviä tuloilmaventtiilejä.

Ensimmäisen kerroksen toimistoissa ilmavirta oli riittävä koko päivän, mutta vuotoilmanvaihto pysyi korkeana, vaikka ilmanvaihto oli pysäytettynä kello 18–6. Viidennessä kerroksessa ilmavirta oli koneen käyntiaikana kello 6–18 riittämätön, mistä aiheutui hiilidioksidipitoisuuden kasvu. Kun ilmanvaihto oli puoliteholla tai kokonaan pysähdyksissä, ilmavirta tilassa kääntyi niin, että atriumista virtasi ilmaa viidennen kerroksen toimistoon ja poistui tuloilmaventtiilin kautta ulos.

Ilmanvaihtokoneiden ollessa pysähdyksissä viidennen kerroksen avokonttorin vuotoilmanvirta oli lähes 370 l/s ja ilma virtasi toimistoon atriumista ja poistui vuotoilmareittien kautta ulos. Koko rakennuksen kannalta vuotoilmanvirta tuli sisään alakerroksissa sijaitsevista toimistotiloista ja poistui yläkerroksissa sijaitsevista toimistotiloista ulos. Ilmavirtojen käyttäytymistä selittävät kuvasta 30 ilmenevät paine-erot ulkoseinän yli. Ilmaa virtaa seinästä ulospäin, kun paine-ero kyseisen seinän kohdalla on positiivinen.



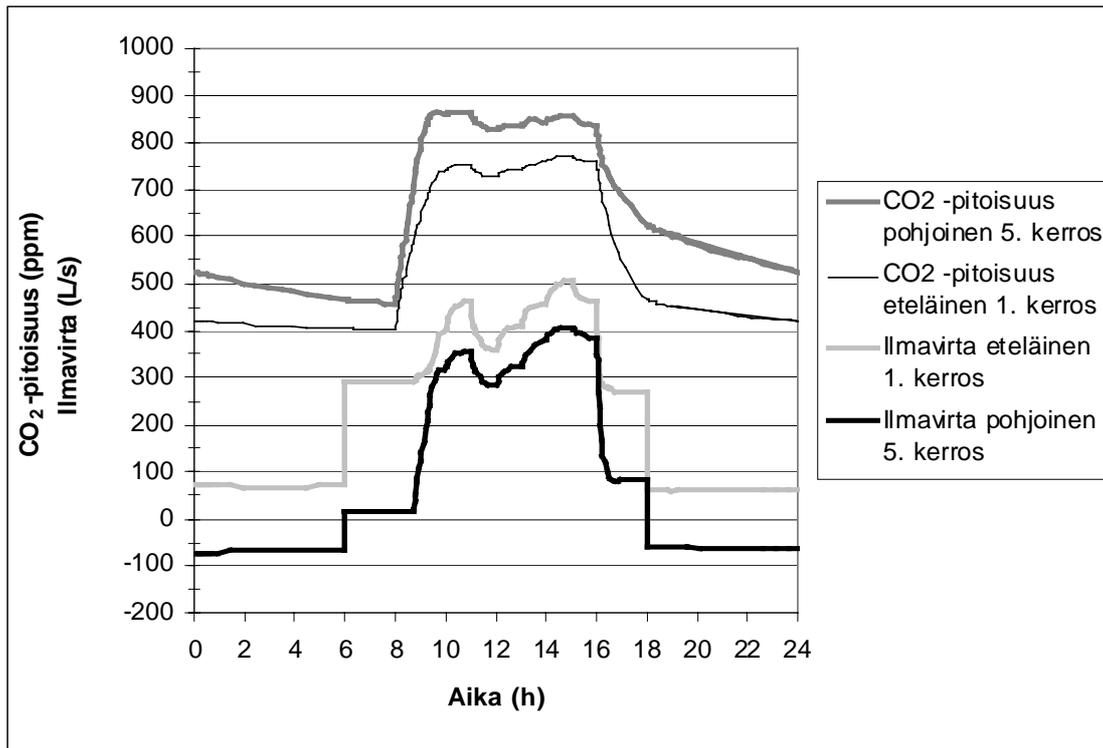
Kuva 30. Avokonttoreiden paine-ero ulkoseinän yli 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti ilman säätyviä tuloilmaventtiilejä.

6.3.4 Hybridi 1 -konsepti

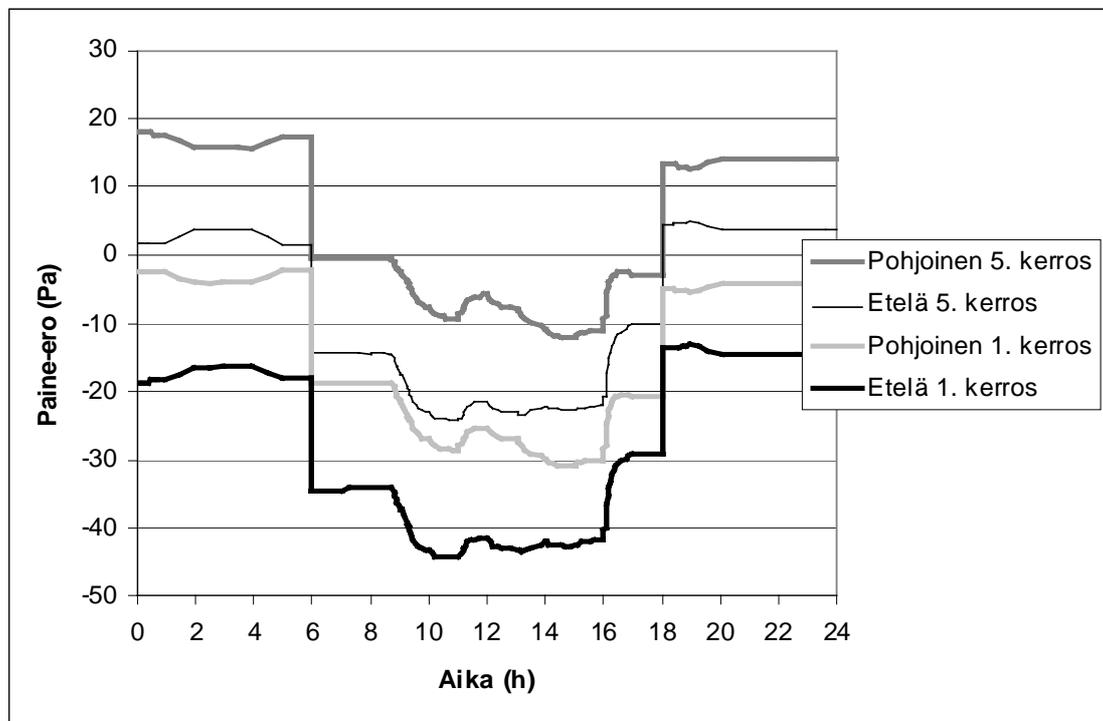
Hybridi 1 -konseptissa konttorin ilmavirtaa säädetään hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Lisäksi tuloilma-aukkojen koko on perussäädetty niin, että toisen kerroksen tuloilma-aukon ala on 10 %, kolmannen kerroksen 20 %, neljännen kerroksen 30 % ja ylimmän kerroksen 40 % suurempi kuin alimmassa kerroksessa. Näin ulkolämpötilan vaikutusta ilmavirtoihin saadaan tasoitettua. Koska kysymyksessä on toimistorakennus, joissa kuormat ovat vaihtelevia, tarvitaan lisäksi tarpeenmukaista ilmanvaihtoa, jotta hyvä sisäilmasto saadaan kaikkiin tiloihin mahdollisimman pienellä energiankulutuksella.

Kuvassa 31 on esitetty tuloilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus alimman ja ylimmän kerroksen toimistoissa talvipäivänä. Hiilidioksidipitoisuus pysyy tavoitealueella melko hyvin. Yöaikana, kun ilmanvaihto ei ollut käynnissä, vuotoilmavirta oli noin 100 l/s, vaikka rakennus oli hyvin tiivis. Kuvasta 32 näkyy vastaavat paine-erot ulkoseinän yli. Paine-erot olivat pääosin enimmillään 12–45 Pa ilmanvaihdon ollessa käynnissä toimiston sijainnista riippuen.

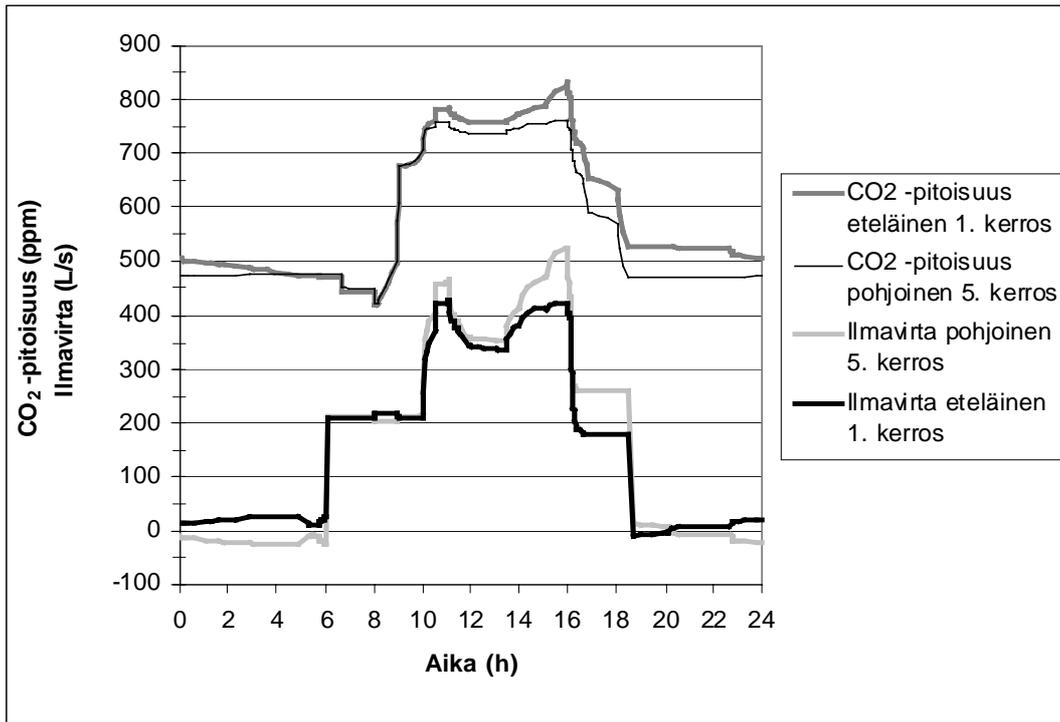
Kuvissa 33 ja 34 on esitetty vastaavat ilmavirrat ja paine-erot kesäpäivänä. Hiilidioksidipitoisuus pysyy hieman paremmin tavoitealueella kuin talvitilanteessa. Merkittävää yöaikaista vuotoilmavirtaa ei kesäpäivänä esiinny. Myös paine-erot (kuva 34) pysyvät tasaisimpina kuin talvitilanteessa.



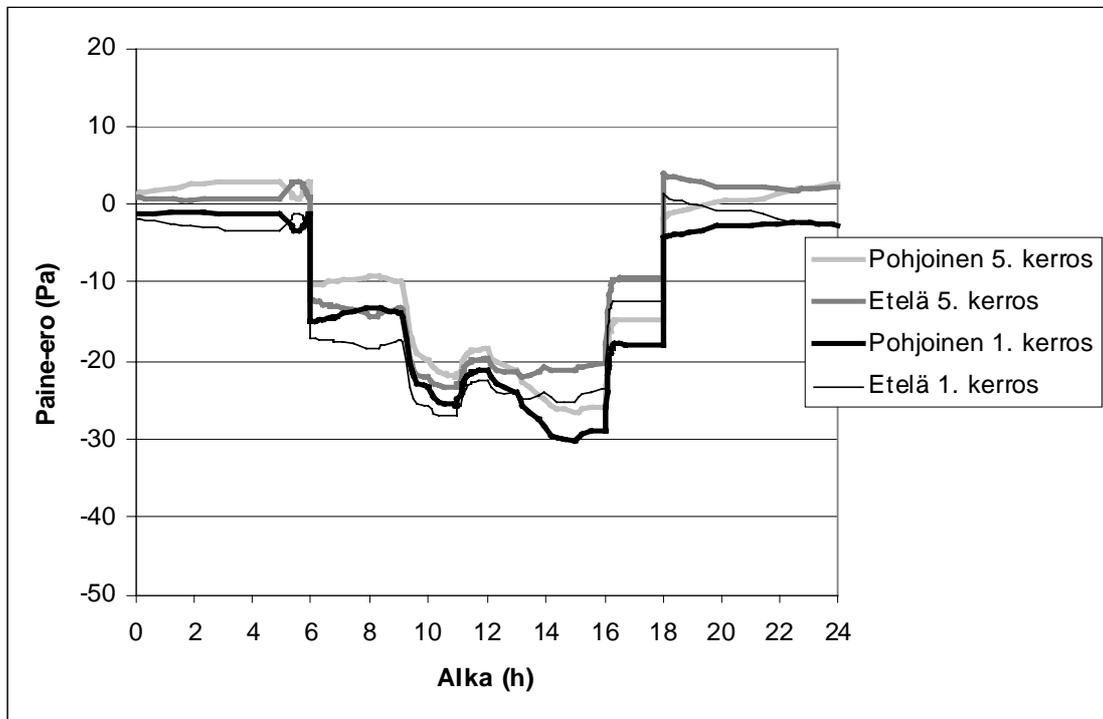
Kuva 31. Ilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus alimmassa ja ylimmässä kerroksessa 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti.



Kuva 32. Toimistotilojen paine-erot ulkoseinän yli 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti.



Kuva 33. Ilmavirta ja hiilidioksidipitoisuus 1. kesäkuuta. Hybridi 1-konsepti.

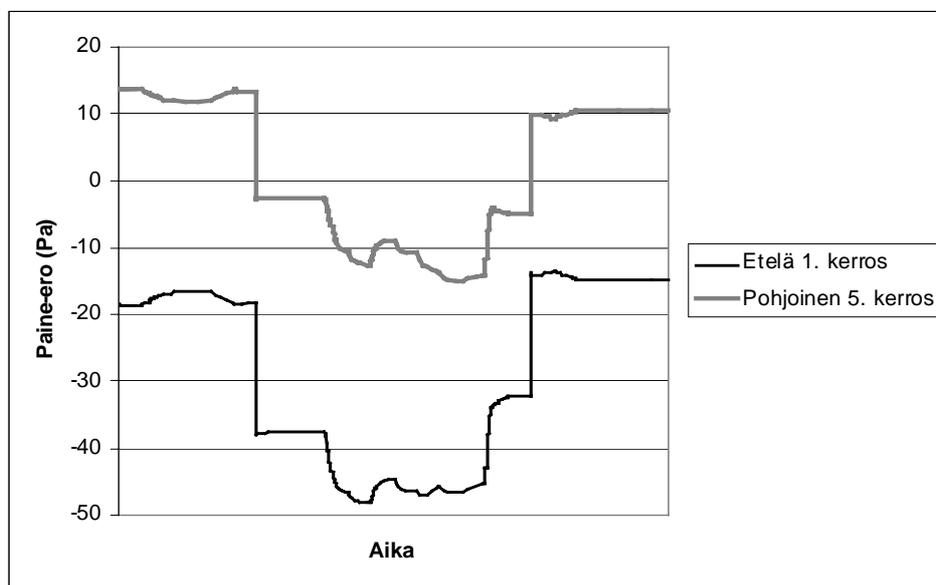


Kuva 34. Toimistotilojen paine-erot ulkoseinän yli 1. kesäkuuta. Hybridi 1-konsepti.

Suhteellisen kosteuden maksimiarvo vuoden aikana jäädytystilanteessa oli noin 9 prosenttiyksikköä suurempi konseptissa 1 kuin vakioilmavirtajärjestelmällä. Tämä pitää ottaa huomioon jäädytyspalkkien mitoituksessa.

6.3.5 Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla

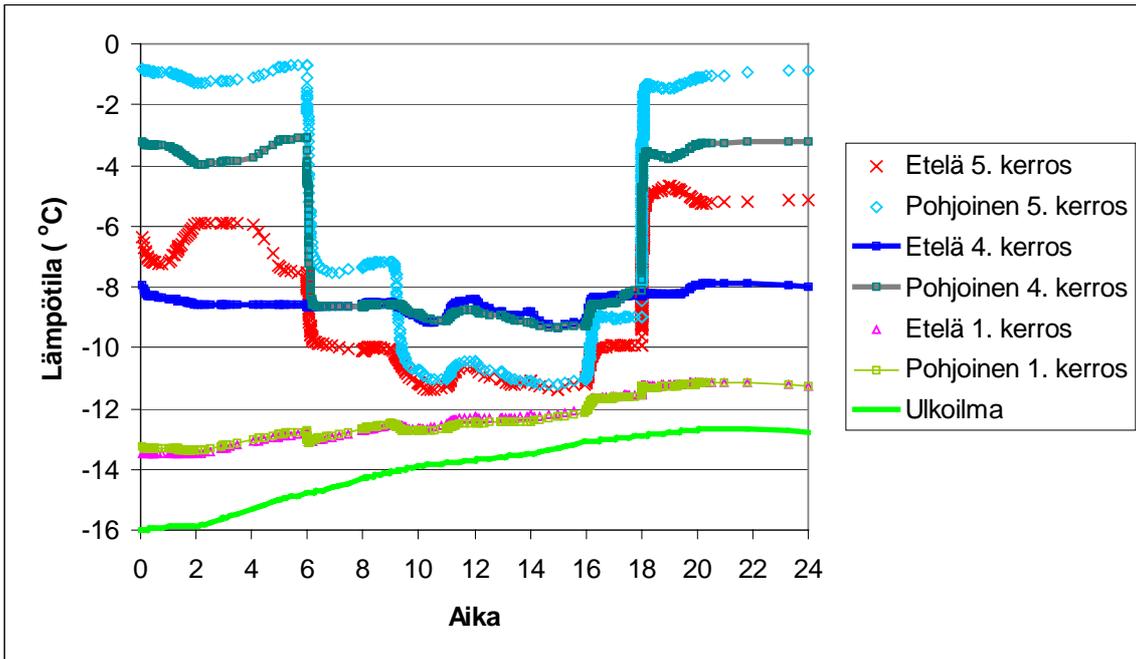
Kuvassa 35 on esitetty kaksoisfasadilla varustetun rakennuksen paine-ero ulkoseinän yli talvipäivänä. Paine-ero ei eroa merkittävästi rakennuksesta, joissa kaksoisjulkisivua ei ollut (kuva 30). Tästä voidaan päätellä, että kaksoisjulkisivu ei vaikuta paljontaan ilmavirtojen käyttäytymiseen.



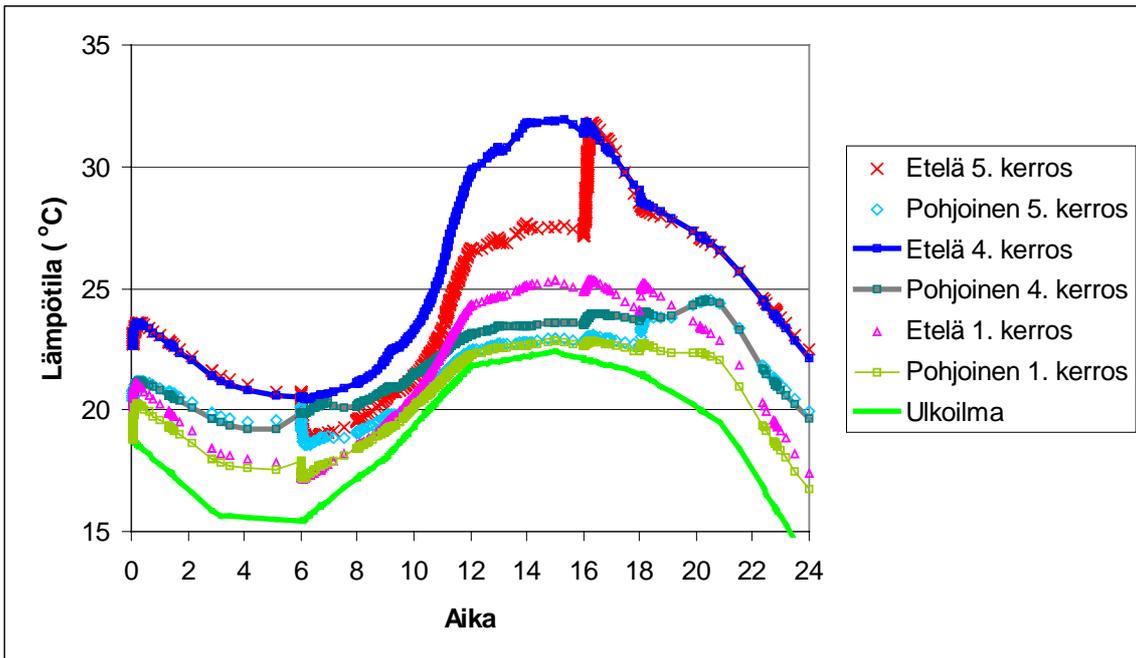
Kuva 35. Paine-ero ulkoseinän yli 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla.

Kuvassa 36 on esitetty tuloilman lämpötila eri avokonttoreissa talvipäivänä. Kaksoisjulkisivu nosti toimiston sijainnista riippuen tuloilman lämpötilaa 1–6 °C ilmanvaihtokoneen käyntiaikana. Simuloinneissa, joissa kaksoisjulkisivua ei ollut, tuloilman lämpötila oli sama kuin ulkoilman lämpötila.

Kuvassa 37 on esitetty tuloilman lämpötila kesäpäivänä. Kaksoisjulkisivu nosti tuloilman lämpötilaa erityisesti eteläfasadilla jopa 10 astetta koneen käyntiaikana.



Kuva 36. Tuloilman lämpötila 3. tammikuuta. Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla.



Kuva 37. Tuloilman lämpötila 13. kesäkuuta. Hybridi 1 -konsepti kaksoisjulkisivulla.

6.3.6 Hybridi 2 -konsepti

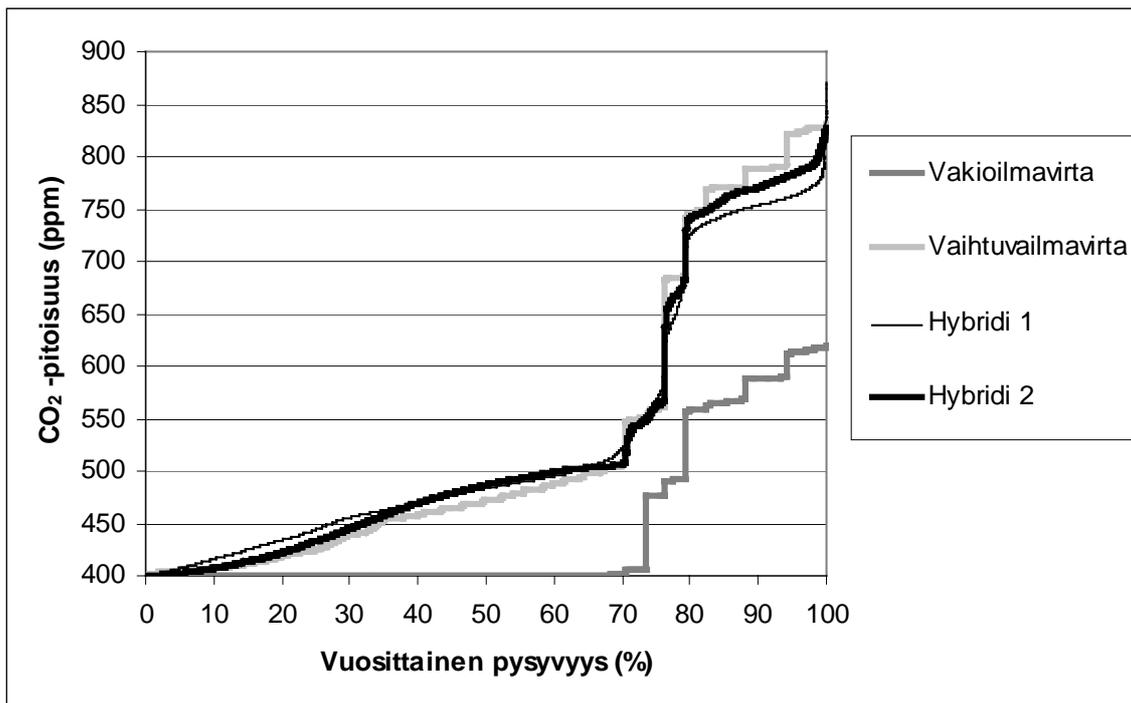
Hybridi 2 -konsepti simuloitiin sekä matalapaineisena koneellisena tulo- ja poistojärjestelmänä että koneellisena poistojärjestelmänä, jotka yhdistettiin laskennallisesti kustannusoptimoinnin perusteella. Säätojärjestelmä käytti sitä järjestelmää, jonka käyttäminen tuli energiakustannuksiltaan edullisimmaksi. Järjestelmän valinta tapahtui ulkolämpötilan mukaan.

Kustannuksiltaan edullisin järjestelmän vaihtolämpötila oli 8 °C, jota alemmilla lämpötiloilla käytettiin koneellista tuloilmajärjestelmää. Vuositasolla koneellista tuloilmajärjestelmää käytettiin 1 811 tuntia. Kokonaisuudessaan ilmanvaihtojärjestelmän käyttöaika oli 3 120 tuntia, joten lämmön talteenottoa käytettiin 58 % koko ilmastointijärjestelmän käyttöajasta.

6.3.7 Yhteenveto sisäilmastosta

Rakennuksen lämpötilat olivat hyvin hallinnassa kaikissa simulointitapauksissa. Tätä selittää osaltaan se, että lämmitystä ja jäädytystä käytettiin aina tarvittaessa ja sisälämpötilan asetusarvot olivat samat sekä kesällä että talvella. Hybriditapauksissa lämpötilan vaihtelut olivat hivenen suurempia kuin koneellisissa tulo- ja poistojärjestelmissä.

Kuvassa 38 on esitetty simulointitapausten hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys koko simulointijakson aikana. Vakioilmavirtajärjestelmän hiilidioksidipitoisuus on selvästi muita järjestelmiä alempi, mutta kaikissa järjestelmissä pitoisuus on pysynyt alle tavoitteen 900 ppm.



Kuva 38. Hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys eri tapauksissa 5. kerroksen eteläisessä avokonttorissa vuoden kaikkien tuntien aikana. Mukana on sekä työ- että poissaolotunnit.

6.4 Järjestelmien energiankulutukset

Taulukossa 9 on esitetty jäähdytykseen ja ilmanvaihtoon tarvittava sähköenergia vuoden aikana.

Taulukko 9. Rakennuksen lämmitykseen, jäähdytykseen ja ilmanvaihtoon kuluttama energia vuoden aikana eri järjestelmillä.

Järjestelmä	Kaukolämpö (kWh/a)	Jäähdytyssähkö (kWh/a)	Puhallinsähkö (kWh/a)
Vakioilmavirta	336 576	65 911	48 734
Vaihtuvilmavirta	237 887	73 706	17 983
Hybridi1	264 079	60 554	1 355
Hybridi1 (kaksoisfasadi)	244 528	63 492	1 666
Hybridi 2	223 120	64 586	4 939

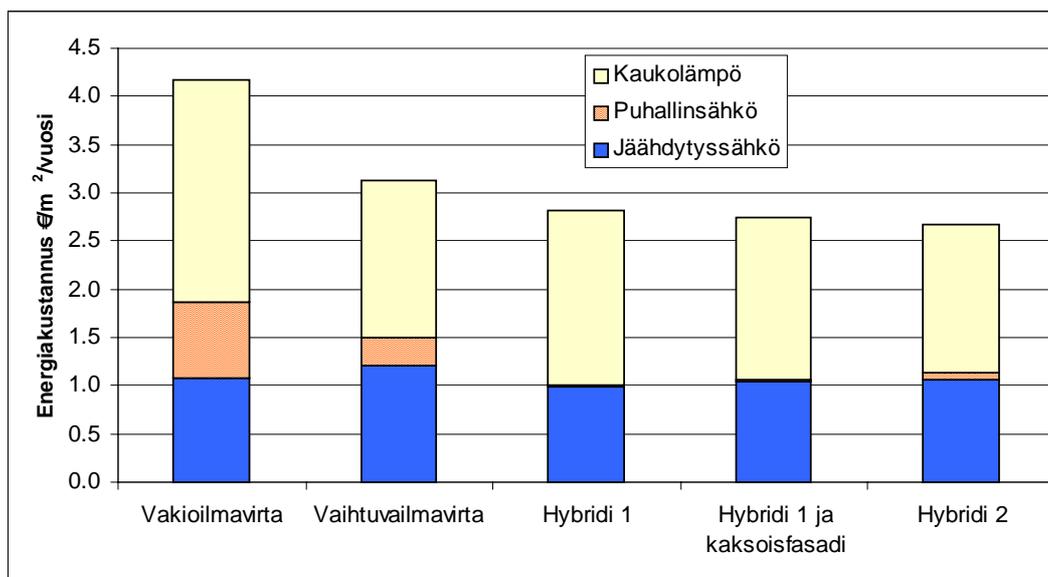
Simulointien mukaan koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä vakioilmavirralla kulutti selvästi eniten kaukolämpöä ja puhallinsähköä. Suurin jäähdytyssähkön kulutus oli vaihtuvilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistojärjestelmällä. Pienin kaukolämmönkulutus oli hybridi 2 -konseptilla ja pienin jäähdytys- ja puhallinsähkönkulutus hybridi 1

-konseptilla. Kaksoisjulkisivu lisää rakennuksen sähkönkulutusta hybridi 1 -konseptilla noin 5 %, mutta toisaalta vähentää lämmitysenergiankulutusta noin 7 %.

Kaksoisjulkisivulla varustetun toimistotalon jäähdytyspalkkien mitoitustehot vaihtelevat eri kerrosten mukaan. Simuloidussa konseptissa suurin jäähdytystehontarve oli neljännen kerroksen etelä-konttorissa, jonka jäähdytystehon maksimitarve kesän esimerkkipäivänä oli 10 % suurempi kuin rakennuksessa, jossa ei ole kaksoisjulkisivua. Koko rakennuksen jäähdytystehon maksimitarve oli kaksoisjulkisivulla varustetussa rakennuksessa kuitenkin vain 2 % suurempi kuin rakennuksessa, jossa ei ollut kaksoisjulkisivua.

Simuloinneissa kaksoisjulkisivun ylä- ja alaosan aukkoja ei säädetty. Aukkojen säädöllä voidaan vähentää rakennuksen energiankulutusta. Rakennuksesta simuloitiin tilanne, jossa kaksoisfasadin yläosan aukko oli suljettu. Simuloinnin perustella rakennuksen lämmitysenergiankulutusta voidaan optimatapauksessa vähentää enintään 12 % ohjaustavasta ja kaksoisfasadin tiiveydestä riippuen kaksoisfasadin tuuletusta ohjaamalla. Samalla kuitenkin jäähdytysenergian kulutus saattaa kasvaa simuloinnin perusteella enintään 2 %.

Kuvassa 39 on esitetty simuloitujen laskentatapausten lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon energiakustannus. Kaikki hybridijärjestelmät olivat energiakustannuksiltaan edullisempia kuin vaihtuvilmavirtainen koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä.



Kuva 39. Rakennuksen lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihtopuhaltimien energiakustannus vuodessa.

Hybridi 1 -konseptin yhteenlasketut energiakustannukset olivat noin 10 % pienemmät kuin vaihtuvailmavirtaisessa koneellisessa tulo- ja poistojärjestelmässä ja noin 33 % pienemmät kuin vakioilmavirtaisessa koneellisessa tulo- ja poistojärjestelmässä. Kaksoisjulkisivu vähensi hybridi 1 -konseptissa energiakustannusta noin 3 %. Puhallinsähkön energiakustannus on tällä ilmanvaihtojärjestelmällä häviävän pieni kuvassa 39.

Hybridi 2 -konseptin energiakustannukset kuvassa 39 olivat simulointien pienimmät. Energiakustannukset olivat 36 % alemmat kuin vakioilmavirran vertailujärjestelmässä ja 15 % alemmat kuin vaihtuvan ilmavirran vertailujärjestelmässä. Investointikustannuksia ei ole laskettu, mutta ne ovat suuremmat kuin vaihtuvailmavirtaisessa vertailujärjestelmässä. Lisäkustannuksia tulee ylimääräisestä poistoilmapuhaltimesta, suuresta tuloilmakanavasta sekä tavallista suuremmasta tuloilmakoneesta (SFP-luku on pienempi). Luvun 10 elinkaaritarkastelusta (kuva sivulla 107) voi päätellä, että hybridi 2 -järjestelmän pienempi SFP-luku lisää sen investointikustannuksia 30 vuoden tarkastelujaksolla noin $0,4 \text{ €/m}^2$ vuodessa, mikä lähes kompensoi pienemmän energiakustannuksen tuottaman hyödyn. Konseptin 2 edullisuutta on siten tarkasteltava kussakin tilanteessa erikseen investointikustannukset huomioon ottaen.

7. Konseptien 1 ja 2 herkkyystarkastelu

7.1 Herkkyystarkastelun suoritustapa

Edellä on esitetty hybridi-ilmanvaihtokonseptien toiminnan simulointituloksia tunti tunnilta eri käyttöolosuhteissa. Seuraavassa esitettävien herkkyyksanalyysien tarkoitus on tutkia järjestelmien mitoitusparametrien ja rakennuksen ominaisuuksien vaikutusta ilmanvaihdon toimintaan eri sääoloissa siinä tapauksessa, kun ilmavirtoja ei säädetä hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Kuten luvussa 6 osoitettiin, säätö hiilidioksidipitoisuuden mukaan parantaa tilakohtaisen ilmanvaihdon toteutumista. Tämän luvun laskelmat antavat siten lähtötilanteen, josta tarpeenmukaisella säädöllä voidaan vielä parantaa ilmanvaihdon toimintaa.

Rakennus on sama LVIS-2000-rakennuksesta muunnettu rakennus kuin edellä olevissa simuloinneissa. Mitoitusilmavirta on $1,0 \text{ l/s/m}^2$ ja se vastaa ilmanvaihtokerrointa 1,2 vaihtoa tunnissa. Analyysit on tehty konsepteille 1 ja 2.

Herkkyyksanalyysissä on muutettu seuraavia parametreja:

- rakennuksen tiiviys (ilmavuotoluvun lähtökohta 0,5 vaihtoa tunnissa 50 Pa testipaineella)
- rakennuksen korkeus (lähtökohta 5 kerrosta)
- rakennuspaikan tuulisuus (lähtökohta suojainen esikaupunkimaasto)
- ulkoilmareitin mitoituspainehäviö (lähtökohta 19 Pa mitoitusilmavirralla ja oletetulla rakennuksen tiiviydellä)
- painehäviön jakautuminen tuloilmakanavistolle ja tuloilmaventtiilille konseptissa 2 (lähtökohtana tasajako 50 %/50 %)
- toiminta minimi-ilmavirralla 0,6 vaihtoa tunnissa (lähtökohta 1,2 vaihtoa tunnissa)
- toiminta painovoimaisena poistona (lähtökohtana koneellinen poisto)

Analyysit on suoritettu 182:ssa säätilanteessa siten, että Helsingissä vuoden aikana esiintyvät ulkolämpötilat, tuulen nopeudet ja tuulen suunnat tulevat edustetuiksi. Tuloksena esitetään ilmavirrat eri ulkolämpötiloilla sekä lisäksi koko vuotta koskevat pysyvyyskäyrät. Pysyvyyskäyrät koskevat Helsingin sääoloja, mutta ulkolämpötilan mukaan esitettävät tulokset ovat sovellettavissa myös muille paikkakunnille. Laskettujen säätilanteiden lämpötila-alue on $-31 \text{ }^\circ\text{C} \dots 29 \text{ }^\circ\text{C}$, tuulen nopeusalue on $0 \dots 13,5 \text{ m/s}$ kah-

den m/s välein ja tuulen suuntia on kahdeksan. Tuulen painekertoimet kahdeksalle eri tuulen suunnalle on otettu kirjallisuudesta [22]. Rakennus on pitkänomainen ja pääjulkisivut suuntautuvat etelään ja pohjoiseen.

Laskelmat on tehty projektissa kehitetyllä yhden tilan virtausmallilla, joka toimii Excel-ympäristössä. Sen fysikaalinen perusta on sama kuin Movecomp [23] ja IDA-ICE-laskentamalleissa. Rajoituksena on, että rakennus on niin avoin, että se voidaan kuvata yhtenä tilana.

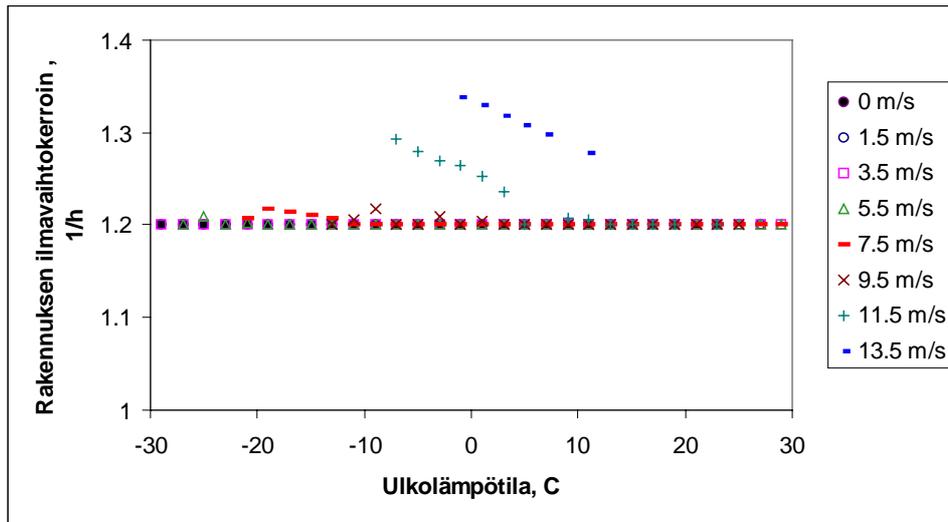
Kaikkien tilojen tarvitessa suurta ilmavirtaa poistopuhaltimen ilmavirta on maksimissaan ja ulkoilmaventtiilit täysin auki. Minimi-ilmavirralla kyseisen tilan ulkoilmaventtiilit sulkeutuvat puoliksi ja poistoilmapuhaltimen ilmavirta pienenee ilmavirran tarvetta vastaavaksi.

Seuraavassa laskentatuloksista esitetään useimmiten ilmavaihtokerroin ylimmässä kerroksessa ulkolämpötilan funktiona eri tuulen nopeuksilla. Ilmanvaihtokerroimen pysyvyys ja koko rakennuksen ilmanvaihtokerroin esitetään joissakin tilanteissa. Ylimmän kerroksen valinta tarkastelukohteeksi johtuu siitä, että ylimmän kerroksen ilmanvaihto on herkin säävaihtelujen aiheuttamille häiriöille. Tuloksia on kommentoitu pääosin kuvateksteissä.

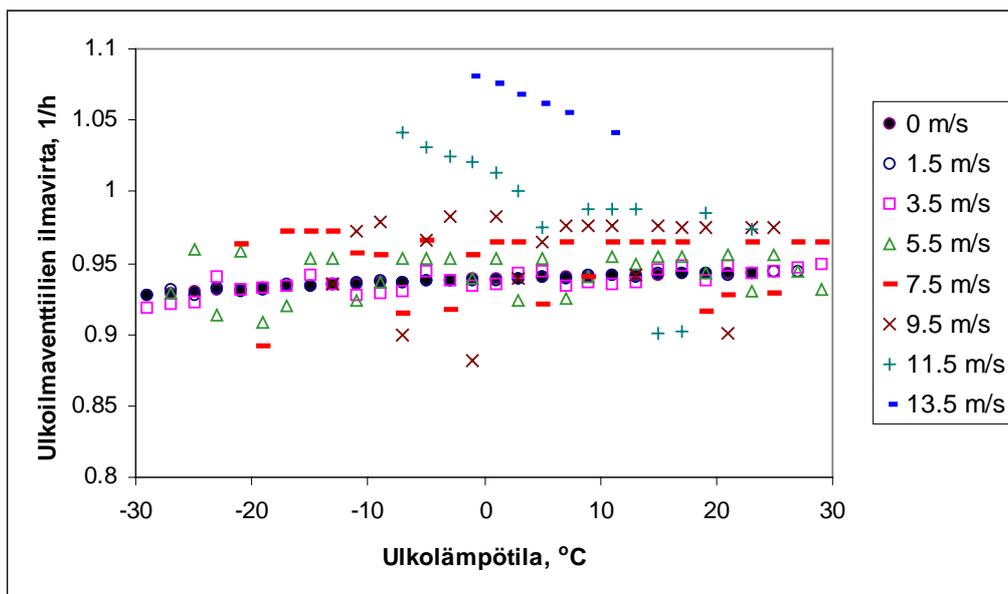
7.2 Konsepti 1 perustilanteessa

Kuvissa 40–42 on esitetty ilmanvaihdon toiminta lähtökohtana olleilla suunnitteluarvoilla, joiden mukaan rakennus on melko tiivis, se sijaitsee suojaisessa esikaupunkimaastossa ja ulkoilmaventtiilit on mitoitettu painehäviölle 19 Pa.

Kuvasta 40 näkyy, että koko rakennuksen kokonaisilmanvaihto pysyy hyvin vakaana, koska poistoilmapuhaltimen ilmavirta pysyy koko ajan vakiona. Ilmanvaihto lisääntyy vain kovalla tuulella, jolloin rakennuksessa esiintyy läpivuotoa julkisivulta toiselle. Koska ilmavuotopaikkojen sijainti rakennuksessa on epämääräinen, on hallitun ilmanvaihdon kannalta syytä tarkastella ensisijaisesti ulkoilmaventtiilien kautta tulevaa ilmavirtaa (kuva 41). Näin määritelty hallittu ulkoilmavirta on rakennevuotojen verran kokonaisilmanvaihtoa pienempi. Rakennevuotojen osuus koko ilmanvaihdosta on noin 20 prosenttia eli 0,26 vaihtoa tunnissa tällä rakennuksen tiiviystasolla.

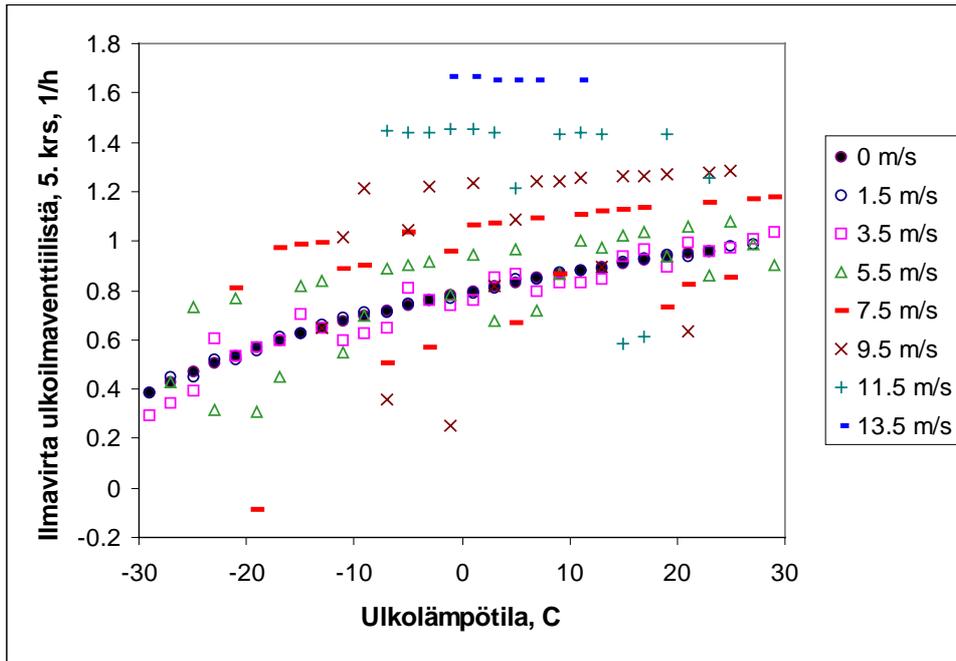


Kuva 40. Koko rakennuksen kokonaisulkoilmavirta. Ylimääräistä ilmanvaihtoa tapahtuu sanottavasti vain suurilla tuulen nopeuksilla.

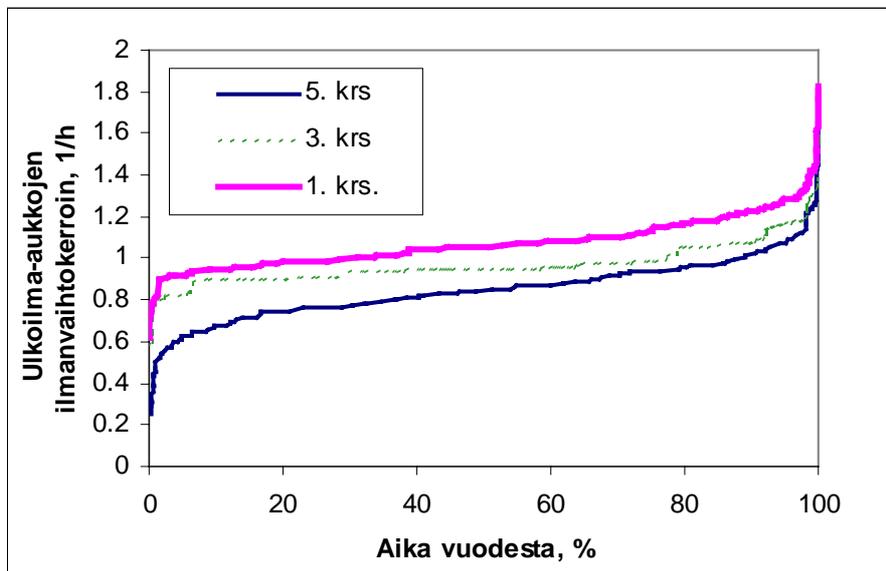


Kuva 41. Koko rakennuksen ulkoilmaventtiilien yhteenlaskettu ulkoilmavirta, joka on rakennevuotojen takia pienempi kuin koko talon ulkoilmavirta kuvassa 40. Ulkovaipan ilmavuotoluku on 0,5 1/h eli rakennus on kohtalaisen tiivis. Ulkoilmaventtiilin mitoitus-paine on 19 Pa.

Jos tarkastellaan ylimmän kerroksen ulkoilmaventtiilien ulkoilmavirtaa koko rakennuksen ilmavirran sijaan, lisääntyy herkkyys sään vaihteluille edelleen (kuva 42). Ilmavirta viidenteen kerrokseen pienenee erityisesti kylmällä säällä savupiippuvaikutuksen takia. Vastaavasti ulkoilmavirta lisääntyy alimmissa kerroksissa. Tämä näkyy kuvan 43 pysyvyykäyristä, jotka on koottu kuvan 42 tuloksista ottaen huomioon eri säätilanteiden todennäköisyydet Helsingissä.



Kuva 42. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä.. Tässä ei ole mukana rakennevuotoina tulevaa ulkoilmaa. Ulkovaippa on kohtalaisen tiivis, ilmavuotoluku on 0,5 1/h. Ulkoilmaventtiilin mitoituspainne on 19 Pa. Kylmällä säällä ylimmän kerroksen ilmavirta pienenee savupiippuvaikutuksen takia. Vastaavasti alempien kerrosten ilmavirta kasvaa. Tuuli aiheuttaa vaihteluja ilmavirtaan.



Kuva 43. Ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä eri kerroksissa pysyvyysskäyränä. Viiden kerroksen tulokset ovat samat kuin edellisessä kuvassa, mutta säätilanteiden todennäköisyys Helsingissä on otettu huomioon.

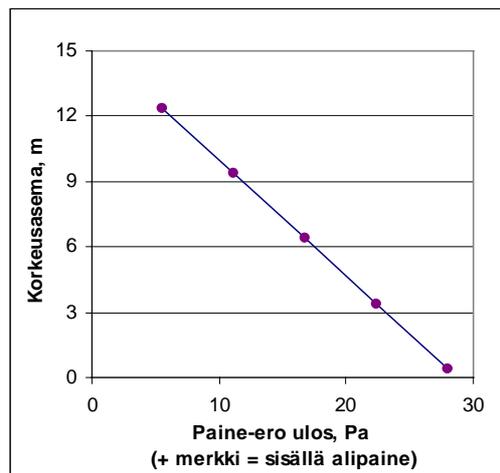
7.3 Konsepti 1, rakennuksen tiiviiden ja paine-erojen merkitys

Ulkovaipan paine-ero vaikuttaa ratkaisevasti ilmanvaihdon herkkyyteen säähäiriöille, koska se vastustaa lämpötilaerojen ja tuulen aiheuttamia painevaihteluita. Häiriöttömässä säätilanteessa eli tuulettomalla ja lämpimällä säällä vallitsevaan ulkovaipan paineeseen vaikuttavat rakennuksen poistoilmavirta, rakennuksen tiiviys sekä ulkoilmaventtiilien mitoitus. Ulkoilmaventtiilin mitoituspaine-erolla tarkoitetaan tässä yhteydessä paine-eroa, joka toteutuisi ennakoitun tiivystason rakennuksessa. Taulukossa 10 on esitetty ulkovaipan häiriötön paine-ero lasketuissa tilanteissa.

Taulukko 10. Häiriötön paine-ero ulkovaipassa eri rakennuksen tiivystasoilla ja ulkoilmaventtiilien mitoituksella. Häiriöttömässä säätilanteessa tuulen nopeus on nolla ja ulkolämpötila sama kuin sisälämpötila.

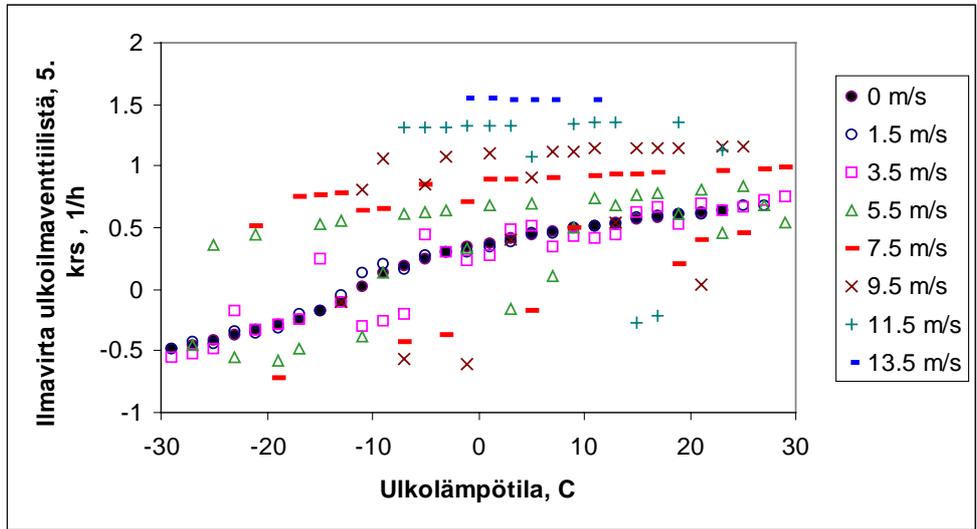
Laskettu tilanne	Häiriötön paine-ero, Pa
Perustilanne (ilmavuotoluku 0,5 1/h, mitoituspaine 19 Pa)	19
Täysin tiivis rakennus	30
Ilmavuotoluku 0,1 1/h	27
Ilmavuotoluku 2,0 1/h	9
Mitoituspaine-ero 30 Pa (ilmavuotoluku 0,5 1/h)	30

Taulukon paine-eroja voi verrata savupiippuvaikutuksen aiheuttamiin paine-eron muutoksiin, jotka on esitetty kuvassa 44 ulkolämpötilassa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Paine-ero ulkovaipan yli on viidennessä kerroksessa huomattavasti pienempi kuin ensimmäisessä kerroksessa: ero kerrosten välillä on 22 Pa.

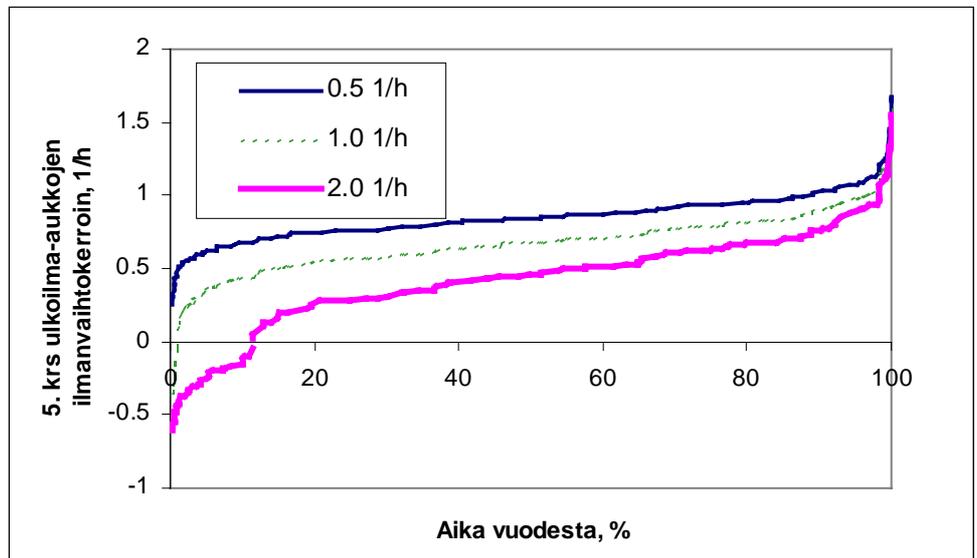


Kuva 44. Paine-ero eri kerrosten ulkoilmaventtiileiden kohdalla tyynellä säällä $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötilassa. Rakennus on viisikerroksinen ja kerroskorkeus on 3 m. Rakennuksen tiiviys ja ulkoilmaventtiilien mitoitus ovat perustilanteen mukaiset.

Kuvan 45 laskentatilanteessa rakennuksen ulkovaipan tiiviys on perustilannetta huonompi; ilmavuotoluku on 2,0 1/h. Tästä syystä ulkoilmavirran herkkyys säähäiriöille on lisääntynyt kuvaan 42 verrattuna. Kuvasta 46 näkyy, että ulkoilmavirran pysyvyys heikenee rakennuksen tiiviuden heikentyessä eli ilmavuotoluvun kasvaessa.

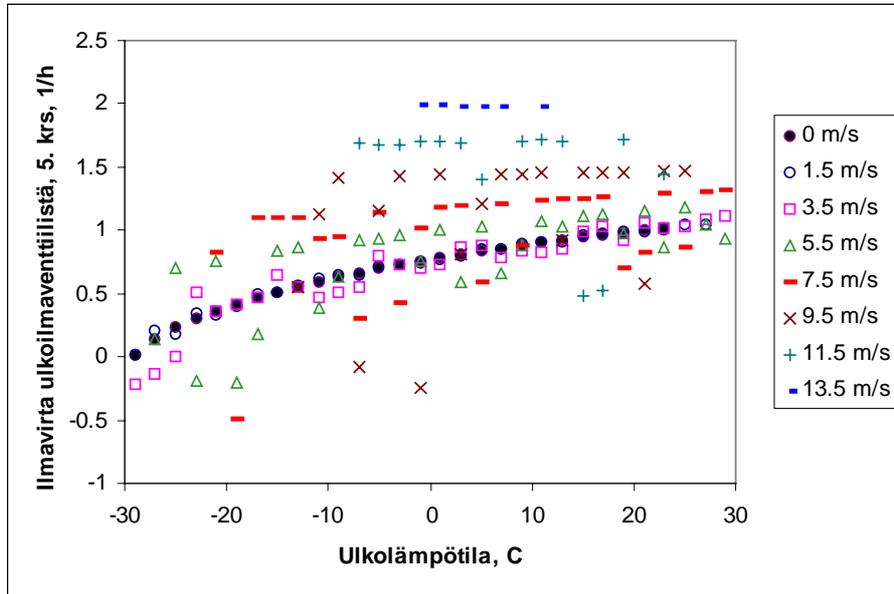


Kuva 45. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä. Ulkovaippa ei ole tiivis, ilmavuotoluku on 2,0 1/h, mistä syystä ilmavirta on herkempi säähäiriöille.

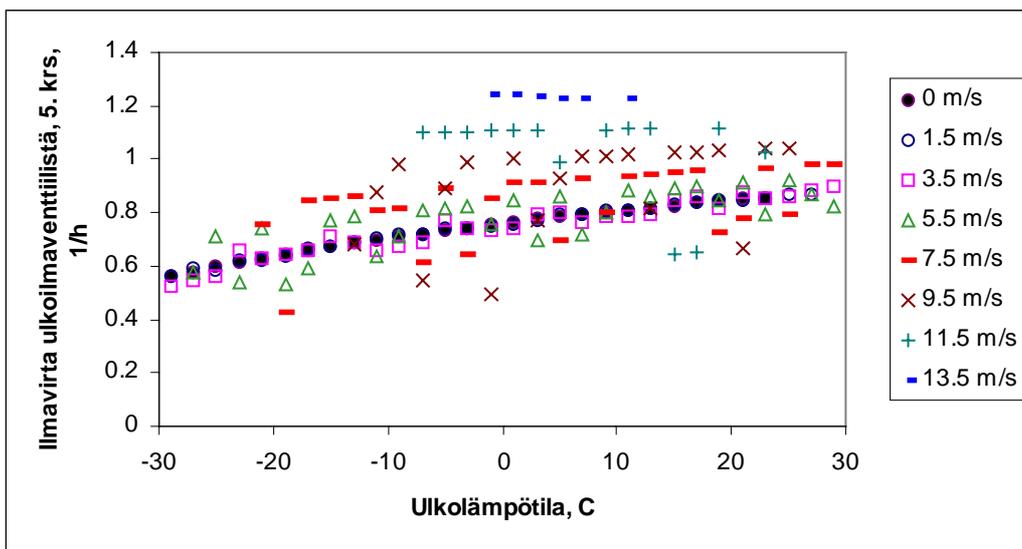


Kuva 46. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä rakennuksen eri tiivystasoilla. Parametrina on rakennuksen ilmavuotoluku 50 Pa testipaineella. Ulkoilmaventtiilin mitoituspainero on 19 Pa.

Kuvista 47 ja 48 näkyy, että ulkoilmaventtiilien mitoituspaineen nosto vähentää ilmanvaihdon sääherkkyttä mutta samalla pienentää hallitun ilmanvaihdon määrää. Suurempi osa ilmavirrasta tulee sisään rakennevuotojen kautta.



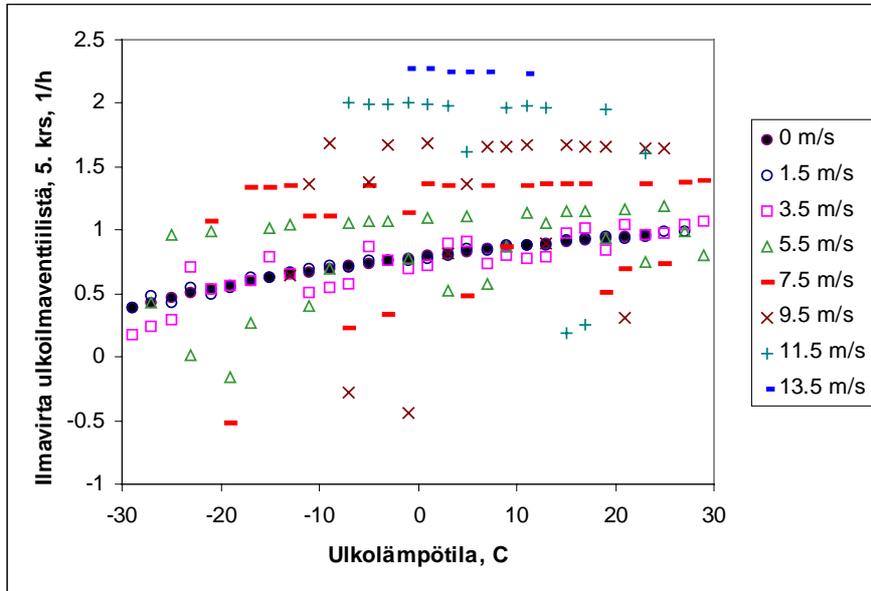
Kuva 47. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä. Ulkoilmaventtiilien mitoituspaine on 14 Pa. Vertaa kuvaan 42, jossa mitoituspaine on 19 Pa. Herkkyys säähäiriöille on lisääntynyt.



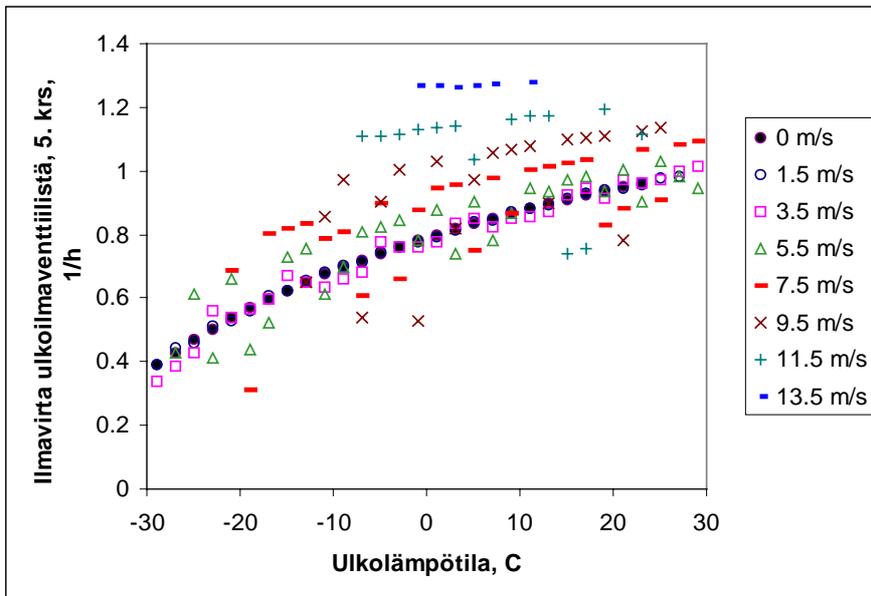
Kuva 48. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä. Ulkoilmaventtiilien mitoituspaine on 30 Pa. Vertaa kuvaan 42, jossa mitoituspaine on 19 Pa. Herkkyys säähäiriöille on tässä vähäisempi.

7.4 Konsepti 1, rakennuspaikan tuulisuuden merkitys

Avoimessa, tuulelle alttiissa maastossa ylimmän kerroksen ilmavirta voi kasvaa yli kaksinkertaiseksi tyyneen säähän verrattuna (kuva 49). Suojaisessa kaupunkimaastossa (kuva 50) tuuliherkkyys pienenee selvästi.



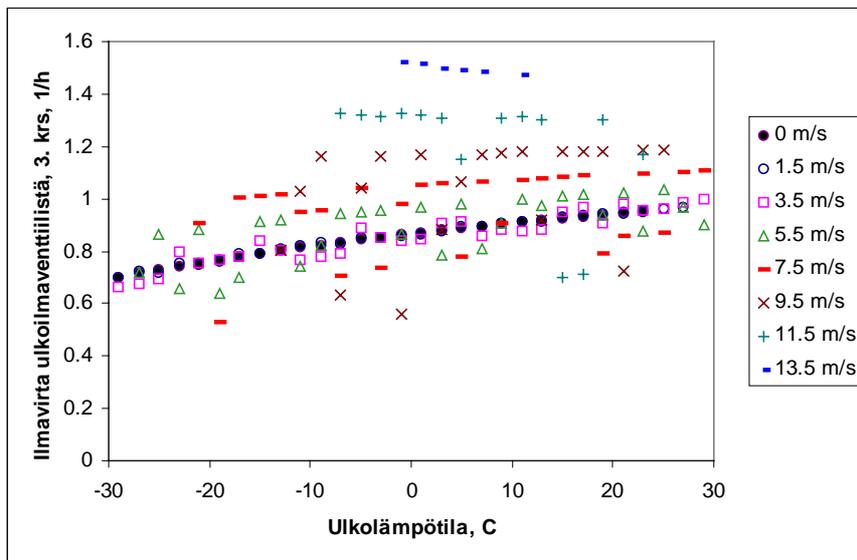
Kuva 49. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä, kun maasto on avoin, esimerkiksi meren rannassa. Tuuliherkkyys lisääntyy kuvaan 42 verrattuna.



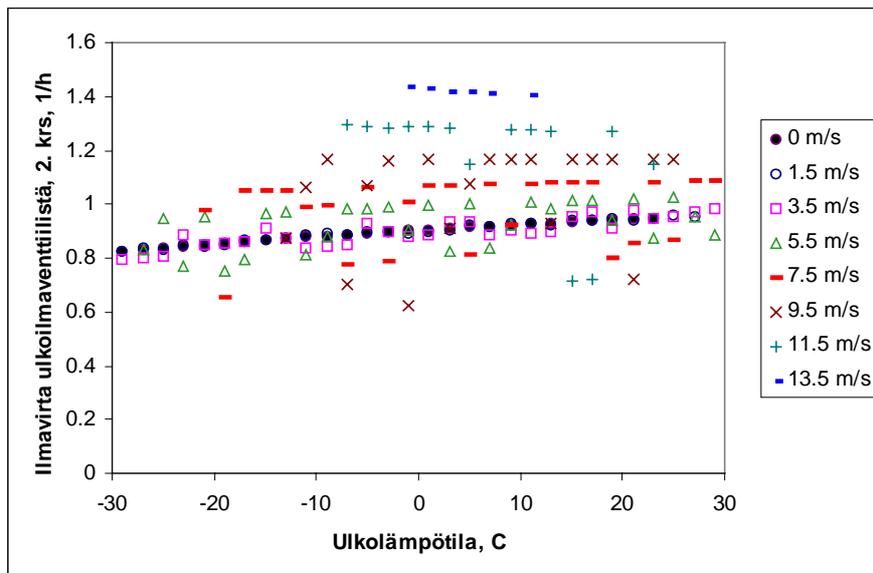
Kuva 50. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä, kun rakennus sijaitsee muiden rakennusten suojassa kaupunkikeskustassa. Tuuliherkkyys pienenee kuvaan 42 verrattuna.

7.5 Konsepti 1, rakennuksen korkeuden merkitys

Rakennuksen kerrosluvun muutos viidestä kolmeen (kuva 51) tai kahteen (kuva 52) parantaa selvästi ilmanvaihtoa kylmällä säällä. Ilmanvaihtokonseptilla 1 onkin paremmat toimivuusedellytykset matalissa rakennuksissa, joissa savupiippuvaikutuksen merkitys on pienempi kuin korkeissa rakennuksissa.



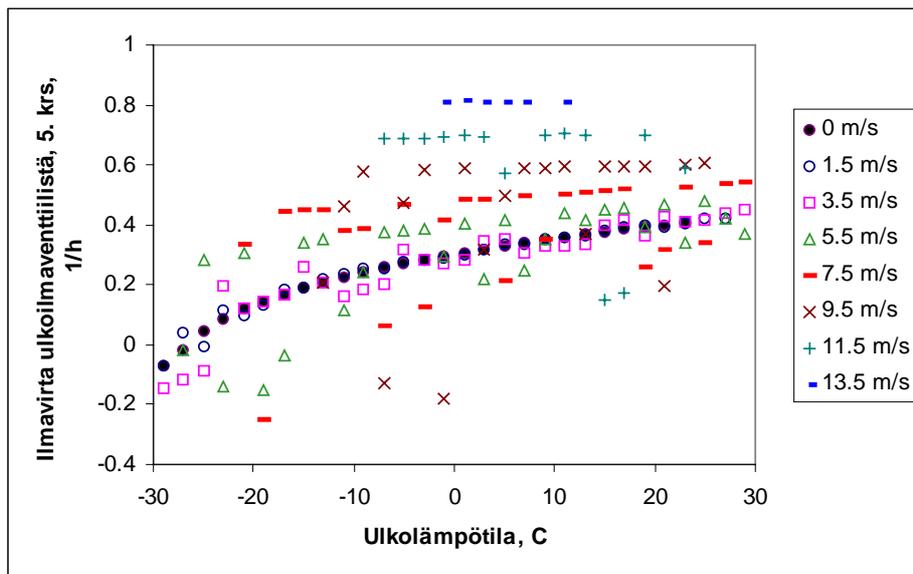
Kuva 51. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiilistä. Kolmikerroksinen rakennus. Viisikerroksiseen rakennukseen verrattuna (kuva 42) ilmanvaihdon herkkyyks ulkolämpötilalle on pienentynyt.



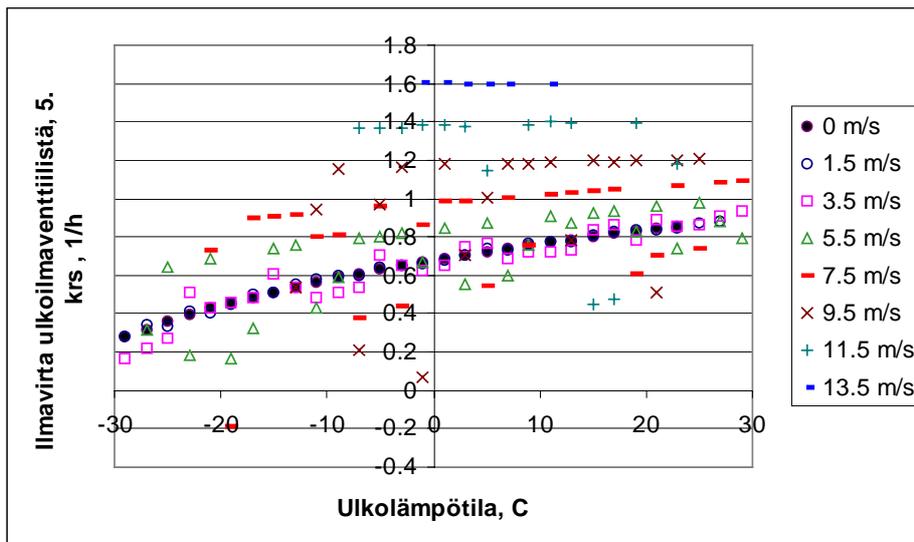
Kuva 52. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiilistä. Kaksikerroksinen rakennus. Viisikerroksiseen rakennukseen verrattuna (kuva 42) ilmanvaihdon herkkyyks ulkolämpötilalle on pienentynyt.

7.6 Konsepti 1, toiminta minimi-ilmavirralla

Ilmavirtojen pienentäminen heikentää ilmanvaihtojärjestelmän mahdollisuuksia hallita rakennuksen paine-eroja ja ilmavirtoja vaikka ulkoilma-aukkoja samalla pienennetään, koska vuotoilmareittien merkitys korostuu. Jos ilmavirtoja pienennetään koko rakennuksessa (kuva 53), pienenee ulkovaipan paine-ero perustilanteen (kuva 42) 19 pascalista 13 pascaliin. Jos ilmavirtoja pienennetään muissa kuin ylimmässä kerroksessa (kuva 54) paine-ero pienenee edelleen ja ilmanvaihdon sääherkkyys lisääntyy.



Kuva 53. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä, kun koko rakennuksessa on käytössä minimi-ilmavirta 0,6 1/h.

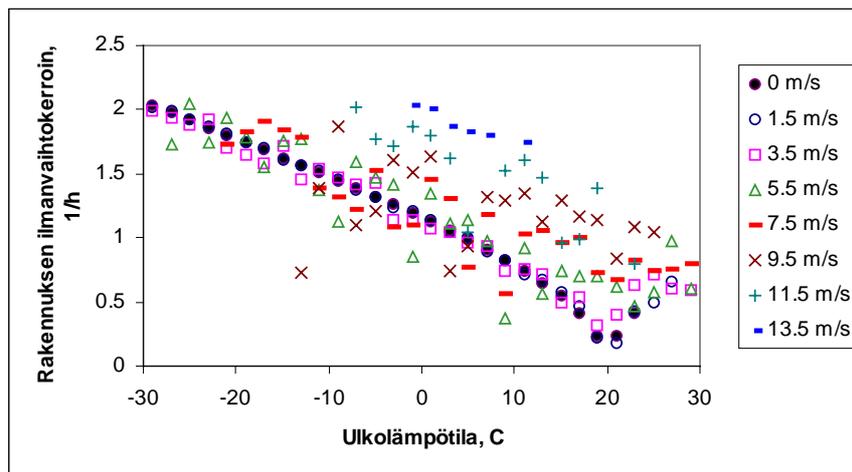


Kuva 54. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta ulkoilmaventtiileistä kun muissa kerroksissa on käytössä minimi-ilmavirta 0,6 1/h.

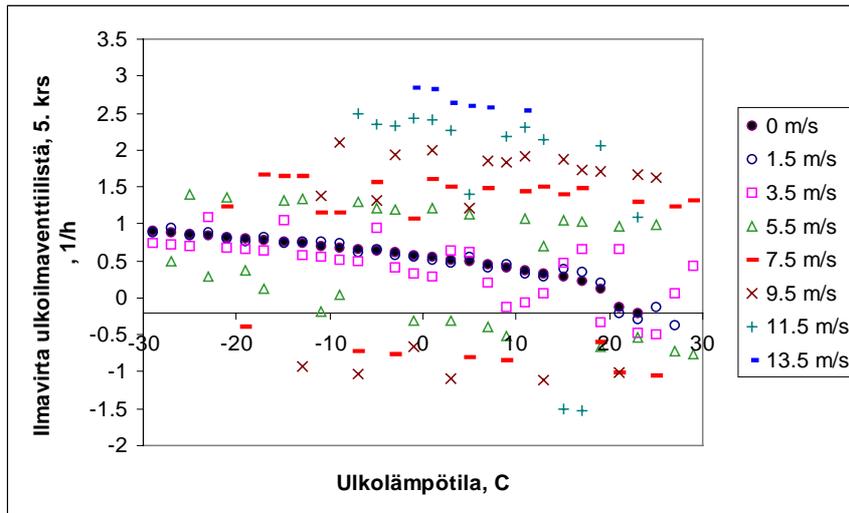
7.7 Konsepti 1, toiminta painovoimaisena

Ilmanvaihto voi toimia painovoimaisesti käyttämällä atriumtilan kattoikkunoita tai vastaavaa poistoilmapiippua poistoilmareittinä. Painovoimaisen järjestelmän käyttöpaine on pieni, ja siksi virtausreitit on mitoitettava väljemmiksi kuin koneellisen poiston järjestelmässä. Tässä on valittu kanaviston painehäviöt siten, että 0 °C ulkolämpötilalla saavutetaan nimellisilmavirta 1,2 vaihtoa tunnissa. Vastaava ulkoilmaventtiilin painehäviö on kaikissa kerroksissa 7 Pa ja poistokanaviston painehäviö 3 Pa.

Kuvasta 55 näkyy, että koko rakennuksen ilmanvaihto saadaan riittäväksi alle 0 °C ulkolämpötiloilla. Sen sijaan tilakohtaisissa ilmajirroissa on suuria eroja: viidennen kerroksen ulkoilmavirta (kuva 56) on pieni ja herkkä tuulelle. Ulkoilma-aukkojen mitoitus olisikin syytä tehdä kerroskohtaisesti. Se tasaisi eri kerrosten ulkoilmavirrat ainakin mitoitusulkolämpötilassa tyynellä säällä.



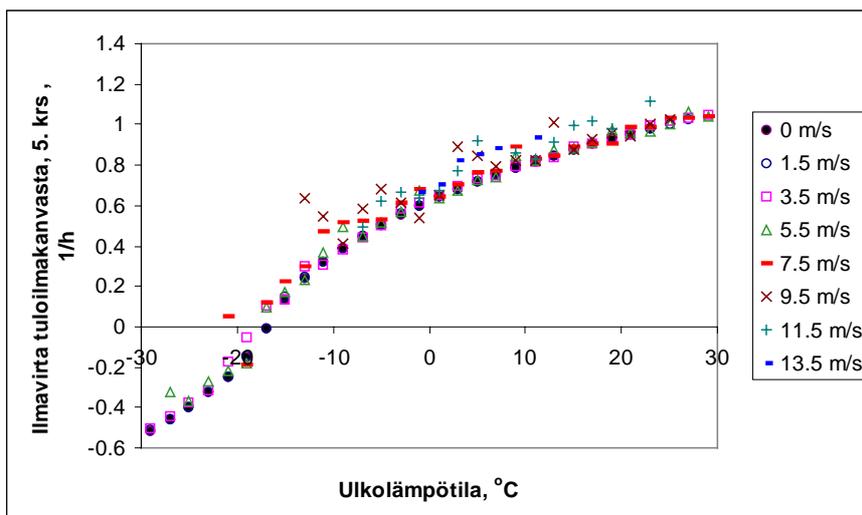
Kuva 55. Koko rakennuksen ilmanvaihto, kun järjestelmä on mitoitettu toimimaan painovoimaisesti. Ulkoilmaventtiilin mitoituspaine on 10 Pa ja poistokanaviston mitoituspaine 3 Pa. Mitoitusilmavaihto 1,2 1/h saavutetaan noin 0 °C ulkolämpötilalla.



Kuva 56. Ylimmän kerroksen ulkoilmaventtiilien ilmavirta, kun järjestelmä on mitoitettu toimimaan painovoimaisesti. Kuvaan 42 vertaamalla nähdään, että ylimmän kerroksen hallitun ilmavirran hajonta eri säätilanteissa on selvästi suurempi kuin kokorakennuksen ilmavirran hajonta.

7.8 Konsepti 2, lähtökohtatilanne

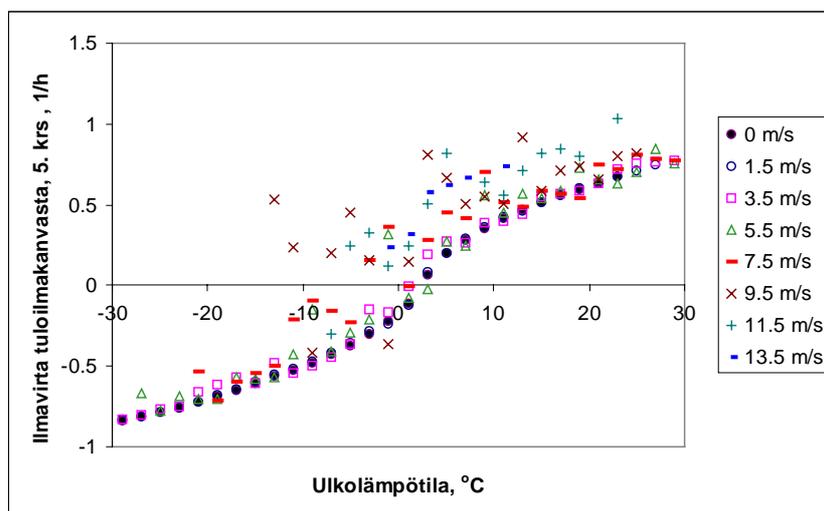
Konseptin 2 laskelmat koskevat toimintaa välikausitilanteessa, jolloin tuloilma ohittaa tuloilmakoneen (ks. kuva 26). Tämän lämpötila-alueen (-5 ... +10 °C) ulkopuolella välikausitilanteen järjestelmän ei edes tarvitse toimia koska tuloilmakone on käytössä. Seuraavassa esitetään kuitenkin tulokset laajemmalla ulkolämpötila-alueella (kuva 57).



Kuva 57. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Tässä ei ole mukana rakennevuotojen kautta tuleva ulkoilma. Ulkovaipan ilmavuotoluku on 0,5 1/h. Kanavan mitoituspaine on 10 Pa ja ulkoilmaventtiilin mitoituspaine 10 Pa.

7.9 Konsepti 2, rakennuksen tiiviyden merkitys

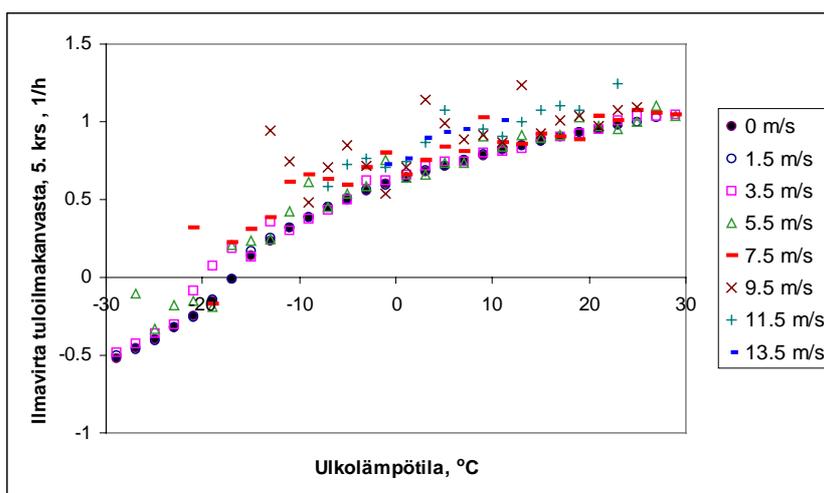
Kun rakennuksen ulkovaipan tiiviyys heikkenee, lisääntyy ilmanvaihdon herkkyys säähäiriöiden vaikutuksille (kuva 58). Syynä on ulkovaipan paine-eron pieneneminen tiiviiseen rakennukseen (kuva 57) verrattuna.



Kuva 58. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Ulkovaippa ei ole tiivis, ilmavuotoluku on 2,0 1/h.

7.10 Konsepti 2, rakennuspaikan tuulisuuden merkitys

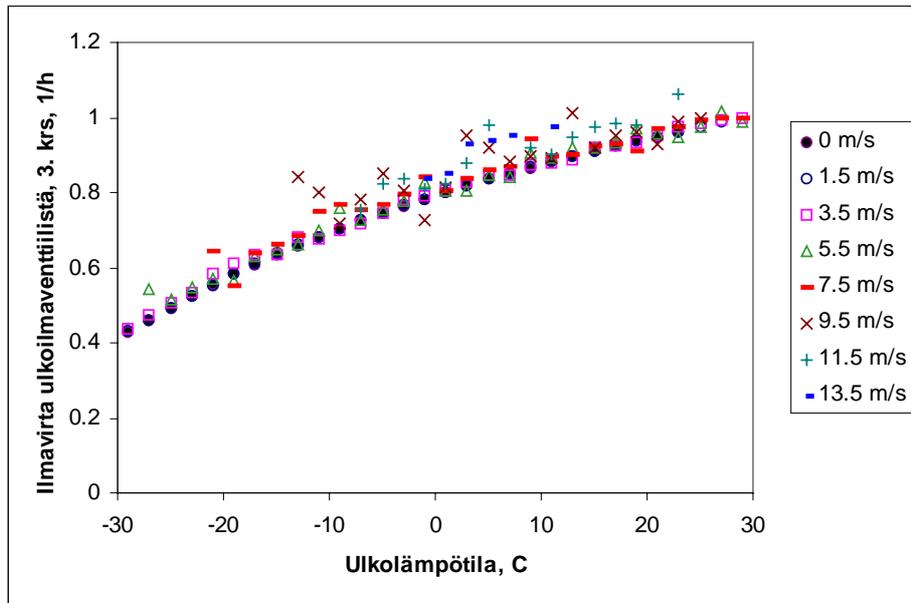
Konseptin 2 tilakohtaiset ilmavirrat eivät ole kovin herkkiä tuulelle (kuva 59), koska ulkoilman sisäänotto on keskitetty yhteen paikkaan.



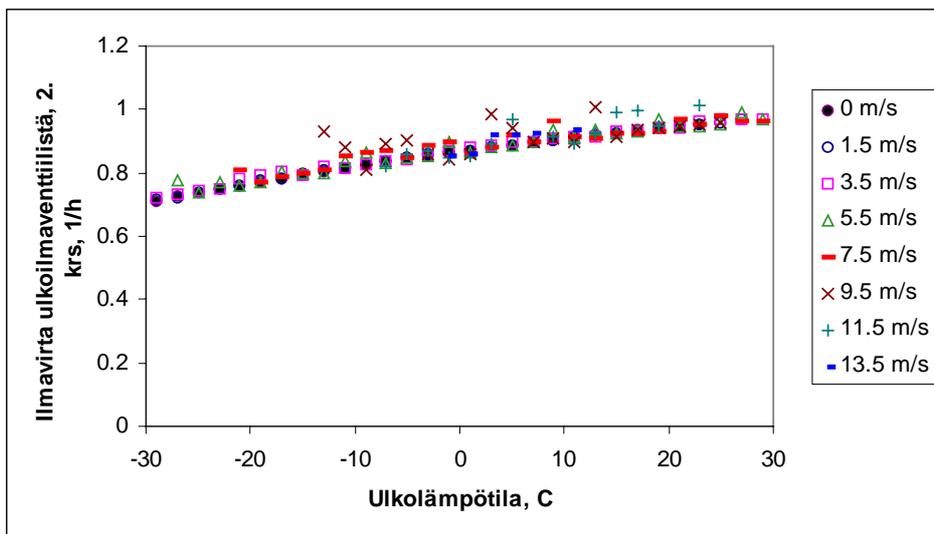
Kuva 59. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta, kun maasto on avoin, esimerkiksi meren rannassa. Vertaa kuvaan 57.

7.11 Konsepti 2, rakennuksen korkeuden merkitys

Varsinaisella käyttölämpötila-alueella $-5 \dots +10 \text{ }^\circ\text{C}$ ylimmän kerroksen ilmavirrat pienenevät viisikerroksisessa rakennuksessa savupiippuvaikutuksen takia jo lähes 40 % (kuva 57). Kolmen ja kahden kerroksen rakennuksessa (kuvat 60 ja 61) ilmavirran herkkyys ulkolämpötilalle on selvästi pienempi.



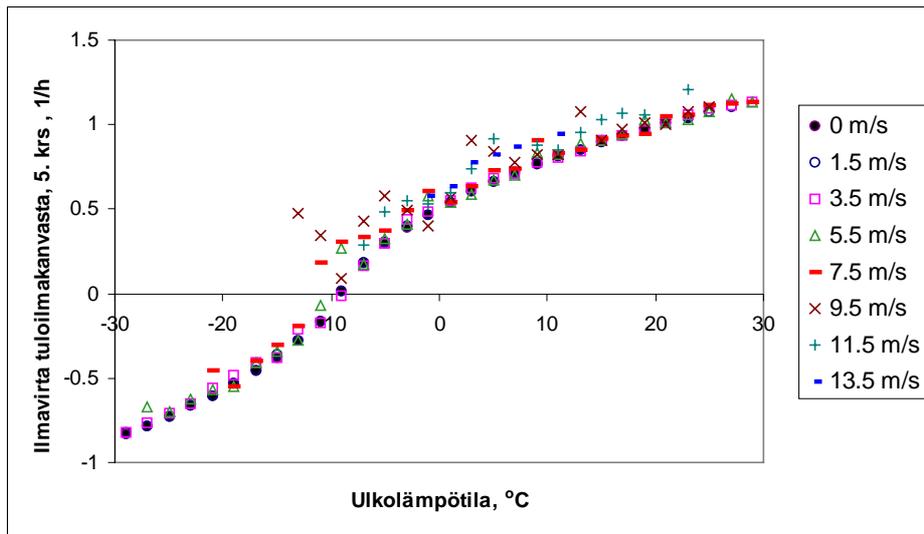
Kuva 60. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Kolme kerrosta.



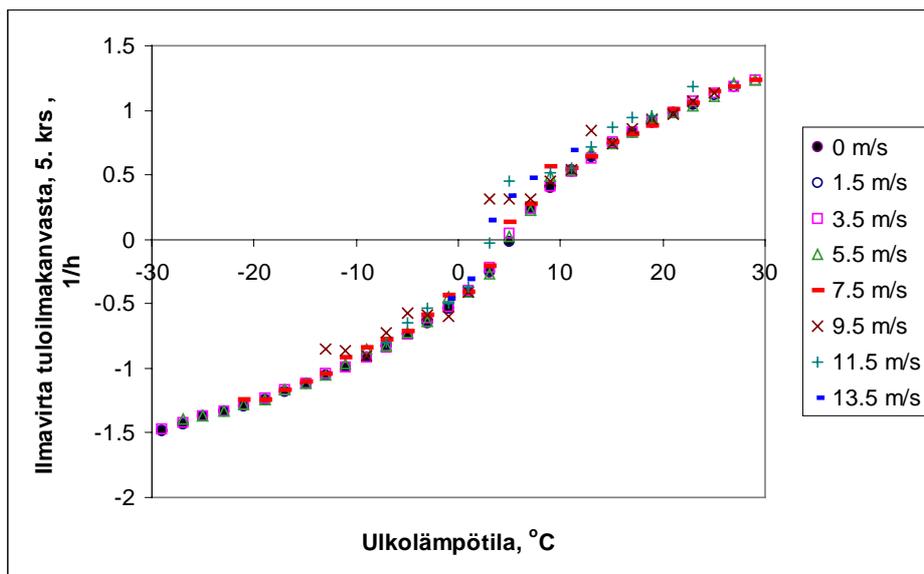
Kuva 61. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Kaksi kerrosta.

7.12 Konsepti 2, ulkoilmareitin painehäviön merkitys

Ulkovaipan mitoituspainereon pienentäminen lisää ilmanvaihdon sääherkkyyttä myös konseptissa 2, kuva 62. Ulkovaipan paine-ero on ulkoilmaventtiilin ja ulkoilmakanavan painehäviön summa. Suurin osa käytettävissä olevasta ulkovaipan paine-erosta pitäisi keskittää ulkoilmaventtiiliin. Jos kanaviston painehäviön osuus on liian suuri lisääntyvä sääherkkyys merkittävästi (kuva 63).



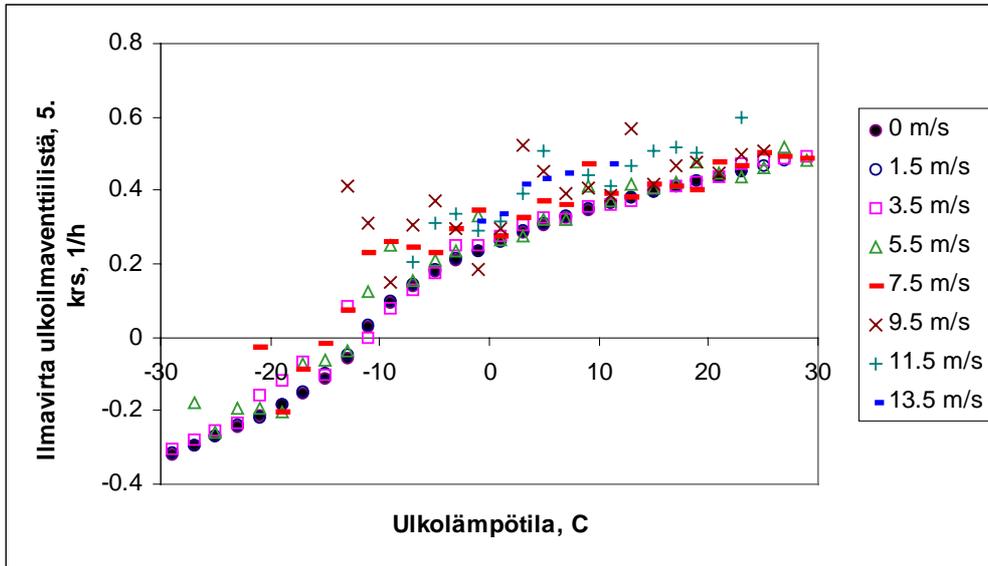
Kuva 62. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Kanavan mitoituspainere 7 Pa ja ulkoilmaventtiilin mitoituspainere 7 Pa ovat pienempiä kuin perustilanteessa.



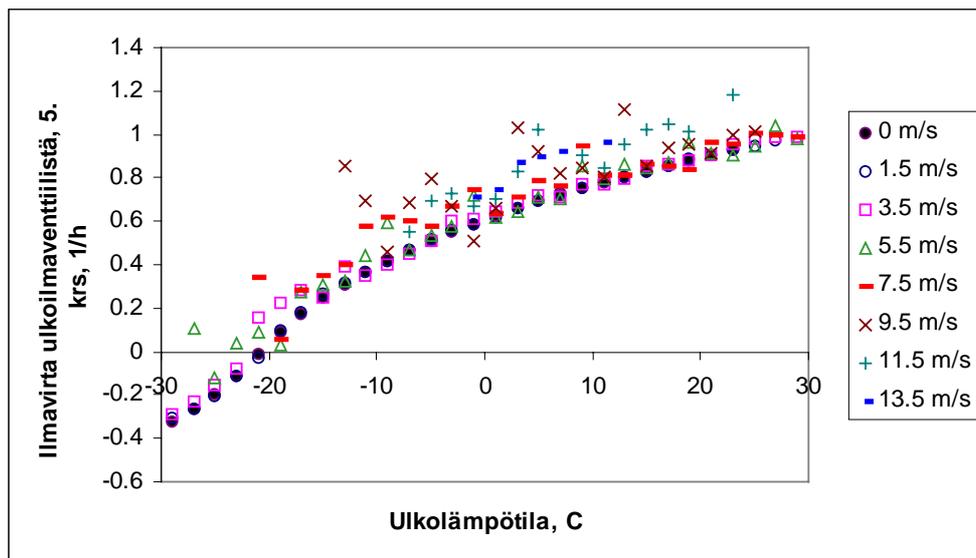
Kuva 63. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta. Kanavan mitoituspainere on 18 Pa ja ulkoilmaventtiilin mitoituspainere 3 Pa.

7.13 Konsepti 2, toiminta minimi-ilmavirralla

Pienennetyllä ilmavirralla ulkoilmavirran herkkyys ulkolämpötilalle ei kovin paljon lisääntynyt (kuvat 64 ja 65) verrattuna maksimi-ilmavirtaan (kuva 57). Sen sijaan tuuliherkkyys lisääntyy pienenevän ulkovaipan paine-eron takia.



Kuva 64. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta, kun koko rakennuksessa on käytössä minimi-ilmavirta 0,6 1/h.

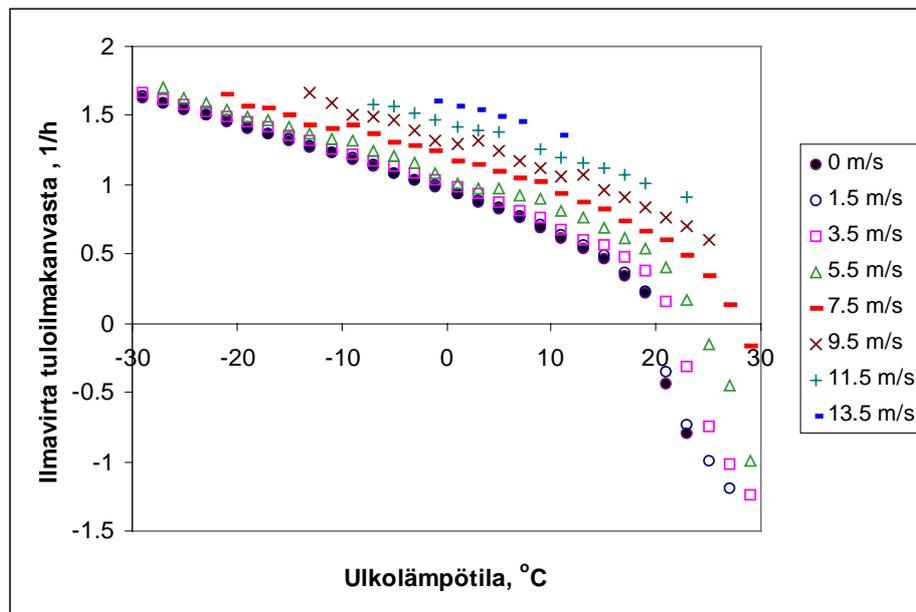


Kuva 65. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta, kun muissa kerroksissa on käytössä minimi-ilmavirta 0,6 1/h.

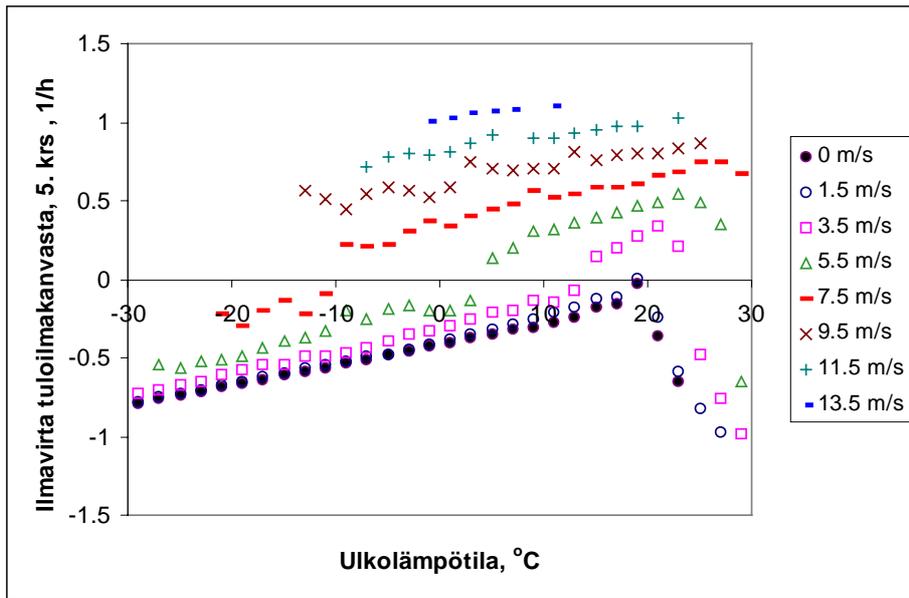
7.14 Konsepti 2, toiminta painovoimaisena

Ilmanvaihto voi toimia painovoimaisesti käyttämällä atriumtilan kattoikkunoita tai vastaavaa poistoilmapiippua poistoilmareittinä. Painovoimaisen järjestelmän käyttöpaine on pieni, ja siksi virtausreitit on mitoittettava väljemmiksi kuin koneellisen poiston järjestelmässä. Tässä valittiin tuloilmapuolen painehäviöksi 7 Pa kuten konseptissa 1 ja se jaettiin tasan tuloilmakanaviston ja tuloilmalaitteen kesken. Myös poistokanavisto oli sama kuin konseptissa 1.

Koko rakennukseen saadaan riittävä ilmanvaihto (kuva 66), mutta ylimmän kerroksen ulkoilmavirta (kuva 67) jää useimmiten negatiiviseksi. Tämä johtuu siitä, että kanaviston painehäviö on liian suuri ja savupiippuvaikutus liian voimakas. Järjestelmä ei siis toimi painovoimaisena, jos tuloilmaa ei lämmitetä rakennuksen alaosassa.



Kuva 66. Koko rakennuksen ulkoilmavirta, kun järjestelmä on mitoittettu toimimaan painovoimaisesti. Tuloilmakanavan mitoituspaine on 3,5 Pa ja ulkoilmaventtiilin mitoituspaine 3,5 Pa ja poistokanaviston mitoituspaine 2,5 Pa.



Kuva 67. Ylimmän kerroksen ulkoilmavirta tuloilmakanavasta, kun järjestelmä on mitoitettu toimimaan painovoimaisesti. Kanavan mitoituspaino on 3,5 Pa, ulkoilmaventtiilin mitoituspaino 3,5 Pa ja poistokanaviston mitoituspaino 2,5 Pa. Vertaa kuvaan 57.

8. Yhteenveto konseptien 1 ja 2 laskentatuloksista

8.1 Konsepti 1

Konseptin 1 ilmavirtojen ajallinen ja paikallinen hallinta on haasteellista. Ohjausjärjestelmän tulee olla kehittynyt ja viritetty toimimaan kohdekohtaisesti. Pelkällä vakioasentoisilla ulkoilmaventtiileillä ja hiilidioksidiohjatulla poistoilmapuhaltimella saadaan ilmavirrat keskimäärin hallintaan, mutta ei pystytä ohjaamaan ilmavirtoja tilakohtaisesti, eikä ulkolämpötilan vaikutusta ilmavirtoihin saada kompensoitua.

Tilan hiilidioksidipitoisuuden perusteella säätyvällä ulkoilmaventtiilillä saadaan tilakohtainen ohjaus toimimaan kohtalaisen hyvin ja sillä pystytään myös huomattavasti paremmin ottamaan huomioon ulkolämpötilan vaikutukset ilmavirtoihin.

Tilakohtaisten ulkoilmavirtojen vaihtelut eri säätilanteissa pienevät, kun rakennus on tiivis, se sijaitsee tuulelta suojaisella alueella ja se on matala. Jos ilmavirtojen vaihtelulle asetetaan tiukat vaatimukset, konseptia 1 voidaan suositella vain mataliin rakennuksiin. Ulkoilmaventtiilien mitoituksen tekee käytännössä hankalaksi se, että ulkoviipan tiiviyttä on suunnitteluvaiheessa vaikea ennakoida. Viisikerroksisessa rakennuksessa järjestelmällä on edellytyksiä toimia kohtuullisesti myös painovoimaisena, jos ulkoilma-aukot mitoitetaan väljiksi.

Konseptin 1 tapauksessa suurimmat säästöt energiankulutuksessa saadaan puhallinenergiassa. Säästöä saadaan myös jäähdytysenergiassa, koska ulkoilmaa kyetään käyttämään jäähdytykseen myös yli 8 °C ulkolämpötilalla. Lämmitysenergian kulutus on huomattavasti korkeampi konseptissa 1 kuin referenssitapauksessa, koska järjestelmässä ei ole lämmön talteenottoa poistoilmassa. Vaikka konseptin 1 lämmitysenergian kulutus on huomattavasti referenssitapausta korkeampi, sähköenergian korkeamman hinnan johdosta energiakustannukset ovat konseptissa 1 referenssitapauksia alemmat. Konseptin 1 lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon energiakustannukset olivat noin 10 % pienemmät kuin referenssitapauksena olleessa vaihtuvailmavirtaisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä. Verrattuna vakioilmavirtajärjestelmään energiakustannukset olivat 33 % pienemmät.

Ulkoilmaventtiilin vedottomuus ja riittävä ääneneristys ovat edellytyksenä konseptin 1 käytölle.

8.2 Konsepti 2

Konseptin 2 lämmityksen, jäädytyksen ja ilmanvaihdon energiakustannukset olivat simulointien pienimmät. Energiakustannus oli 15 % pienempi kuin muuttuvan ilmavirran referenssijärjestelmässä ja 36 % pienempi kuin vakioilmavirran referenssijärjestelmässä. Konseptissa 2 käytettiin koneellista tuloilmajärjestelmää, kun ulkoilman lämpötila laski alle 8 °C. Kehittyneemmällä säätöjärjestelmällä, joka ottaisi huomioon myös rakennuksen jäädytyksen- ja lämmityksentarpeen ohjatessaan tuloilmajärjestelmien käyttöä, olisi todennäköisesti päästy vielä jonkin verran pienempiin energiakustannuksiin.

Investointikustannuksia ei ole selvitetty, mutta ne ovat suuremmat kuin vaihtuvaihtuvirtaisessa vertailujärjestelmässä. Lisäkustannuksia tulee ylimääräisestä poistoilmapuhaltimesta, suuresta tuloilmakanavasta sekä tavallista suuremmasta tuloilmakoneesta. Konseptin 2 edullisuutta on siten tarkasteltava investointikustannukset huomioon ottaen.

Koneellista tuloilmajärjestelmää käytettiin noin 58 % koko ilmanvaihtojärjestelmän käyttöajasta. Paitsi energiatalouden, myös sisäilmaston kannalta koneellisen tuloilmajärjestelmän käyttö vuoden kylmimpinä aikoina on perusteltua. Näin vältetään pahimmilta veto-ongelmilta, kun kylmää ulkoilmaa tuodaan suoraan toimistotilaan.

Konsepti 2 toimii tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmänä, kun lämmön talteenotto tai keskitetty jäädytys ovat tarpeen. Välikausina se voi toimia poistoilmanvaihtojärjestelmänä. Seuraavat arviot koskevat välikausitilannetta.

Verrattuna konseptiin 1 herkkyys tuulen vaihteluille on pieni. Sen sijaan herkkyys ulkolämpötilalle on suurempi, koska ulkoilmakanava vie osan ulkoilmareitin painehäviöstä. Ulkoilmakanavan koolla ja tuloilma-aukon koolla on suuri merkitys ilmanvaihdon pysyvyyteen. Mahdollisimman suuri osa käytettävissä olevasta paine-erosta on varattava tuloilma-aukon osalle, mikä tarkoittaa sitä, että ulkoilmakanavan on oltava väljä.

Konsepti 2 voi toimia painovoimaisena, jos tuloilma lämmitetään rakennuksen alaosassa olevassa lämmityspatterissa.

9. Koulun matalapainejärjestelmän simulointi (konsepti 3)

Tässä luvussa tarkastellaan Poikkilaakson korttelitalolle IDA-ICE -ohjelmistolla tehtyjä laskelmia. Tarkastelun tavoitteena on tutkia rakennuksessa sijaitsevien koulun ja päiväkodin sisäilmasto-olosuhteita eri vuodenaikoina erilaisissa kuormitustilanteissa sekä niiden energiataloutta.

9.1 Lähtötiedot

9.1.1 Poikkilaakson korttelitalo

Poikkilaakson korttelitalo ja sen ilmavaihtojärjestelmä on esitetty aikaisemmin luvussa 2.1. Rakennuksessa toimii sekä päiväkotia että ala-asteen koulu. Kohteen laajuuden vuoksi rakennuksesta rajattiin päiväkotia ja koulun normaalit opetusluokat tarkastelun kohteeksi Helsingin kaupungin toimesta.

Rakenteet ovat Climaconsult Finland Oy:n toimittaman tiedon mukaiset. Ilmastointikoneessa on lämmön talteenotto sekä lämmityspatteri. Sisäänpuhalluslämpötila pidetään vakiona +18 °C. Tulopuhaltimen paineentuotto on 500 Pa ja poistopuhaltimen 300 Pa. Lämmön talteenoton hyötysuhde on 70 %. Ilmanvaihto on päällä arkisin 6–18 päiväkodista johtuen ja siitä, että ohjelmisto sallii vain yhden ilmanvaihtokoneen mallintamisen järjestelmässä. Täten koulunkin ilmanvaihdolla on simuloinnissa sama käyntiaika.

Huoneissa on ilmamääräsäätöinen ilmanvaihtojärjestelmä, jonka minimi-ilmamääränä on 6 l/s henkilöä kohti. Ohjaussuurena on sisäilman hiilidioksidipitoisuus siten, että ilmamäärää aletaan kasvattaa lineaarisesti, kun pitoisuus ylittää 800 ppm. Ilmanvaihto on maksimissaan, kun pitoisuus on 1 000 ppm.

9.1.2 Kuormitus

Eri huoneiden kuormat on esitetty taulukossa 11. Kaikissa huoneissa valaistustehona on käytetty 12 W/m². Valaistuksen ja ihmisten lisäksi huoneissa ei ole muita sisäisiä kuormia.

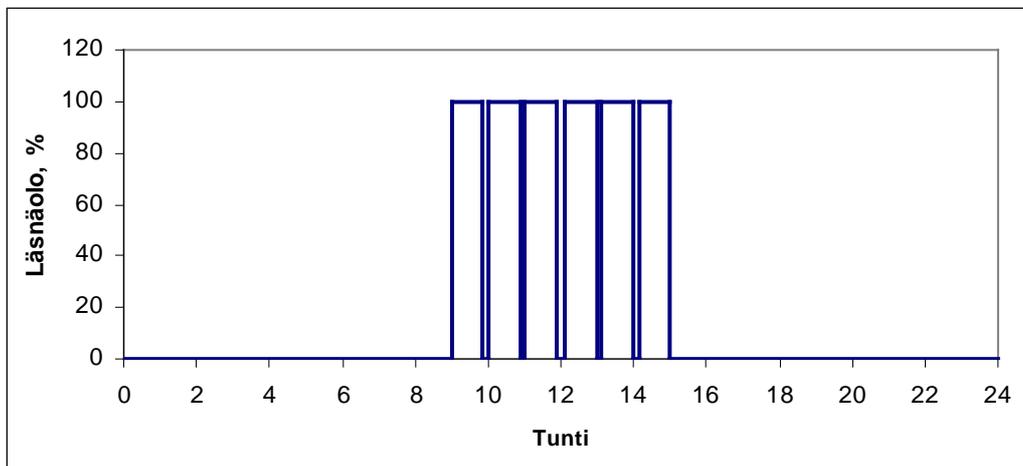
Taulukko 11. Eri huoneiden henkilökuormat.

Huone	Henkilöiden lukumäärä	Profiili
101 (Piazza)		
102		
103	18 (21+3)	Päiväkoti
104+105+106+107	36 (50+2)	Luokkahuone
108	18 (21+3)	Päiväkoti
109		
110		
111		
iso aula		

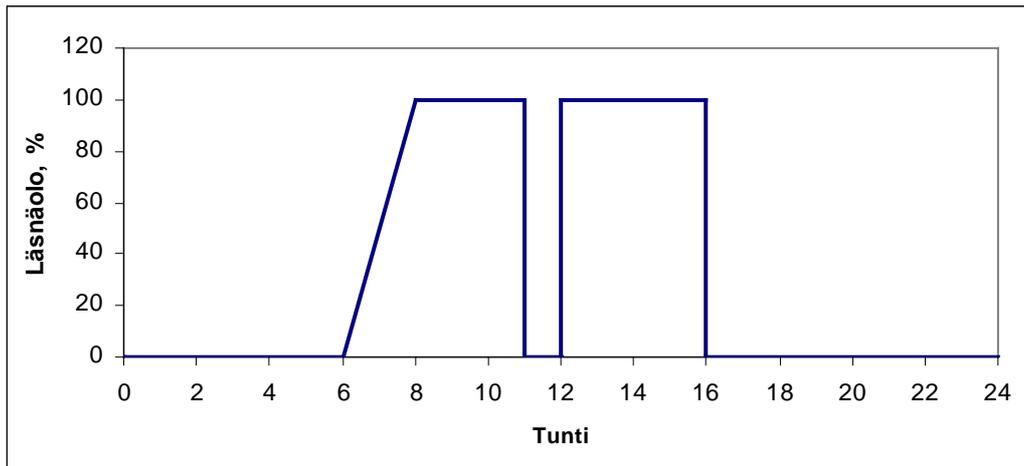
Koska ohjelmistossa annetaan henkilölukumäärä aikuisina, lapset on suhteutettu ihon pinta-alan avulla aikuisiin. Oheisessa taulukossa on esitetty suluissa lasten ja aikuisten lukumäärä ja ilman sulkuja ohjelmaan annettu aikuisten lukumäärä. Lukumäärien suhteen laskemiseksi on käytetty seuraava kaavaa [19]

$$A = 0,203Paino^{0,425}Pituus^{0,725} . \quad (1)$$

Näin 40 kg painoisen ja 1,4 m pituisen lapsen ihon pinta-ala on 1,24 m², joka on n. 70 % aikuisen ihon pinta-alasta. Tätä suhdelukua on käytetty oheisessa taulukossa. Luokka- ja päiväkotihuoneiden kuormitusprofiilit ovat kuvan 68 ja 69 mukaisia.



Kuva 68. Luokkahuoneen läsnäoloprofiili.



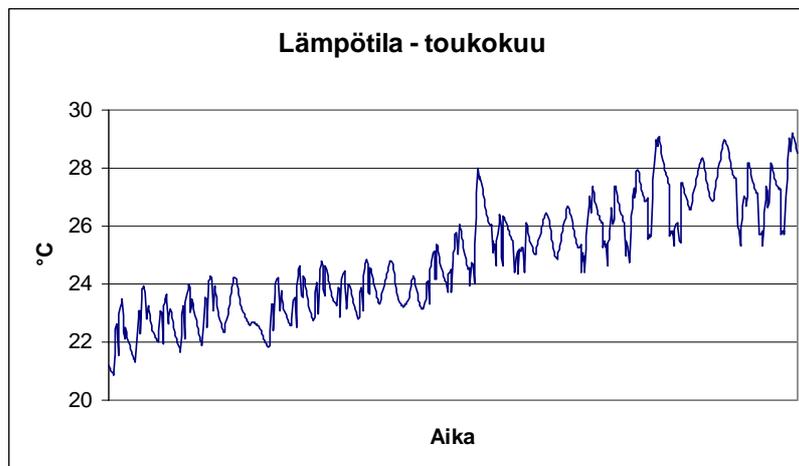
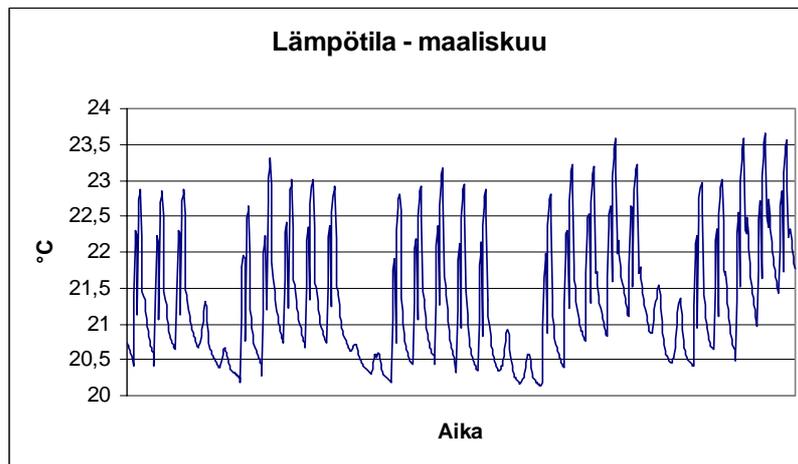
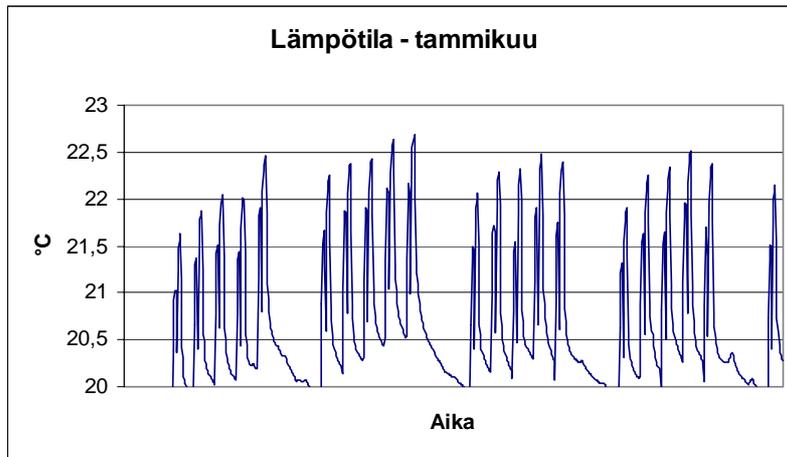
Kuva 69. Päiväkodin läsnäoloprofiili.

Tarkasteltaessa poikkeavia kuormitustilanteita, kuten isossa aulassa pidettäviä tilaisuuksia, profiilit poikkeavat tapauskohtaisesti.

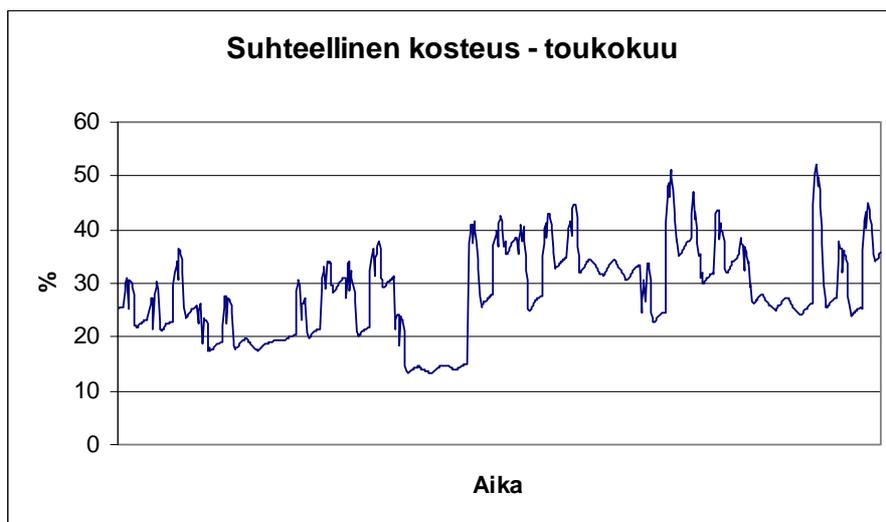
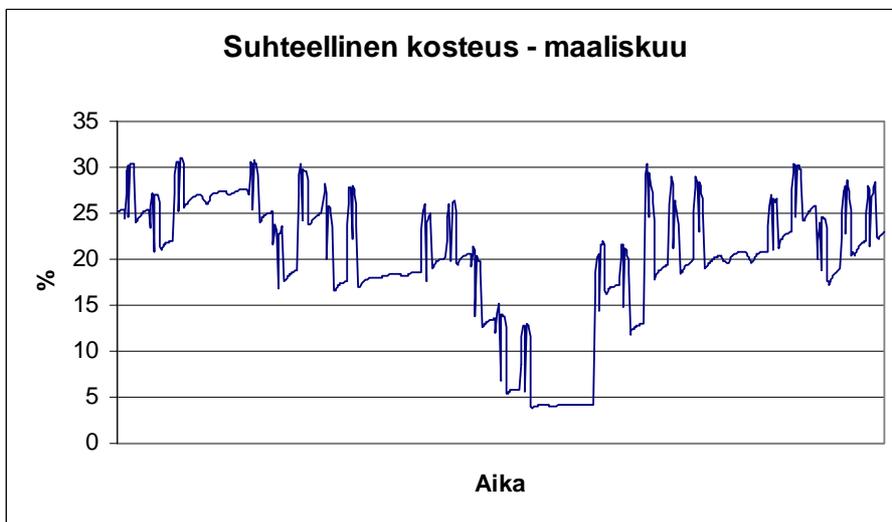
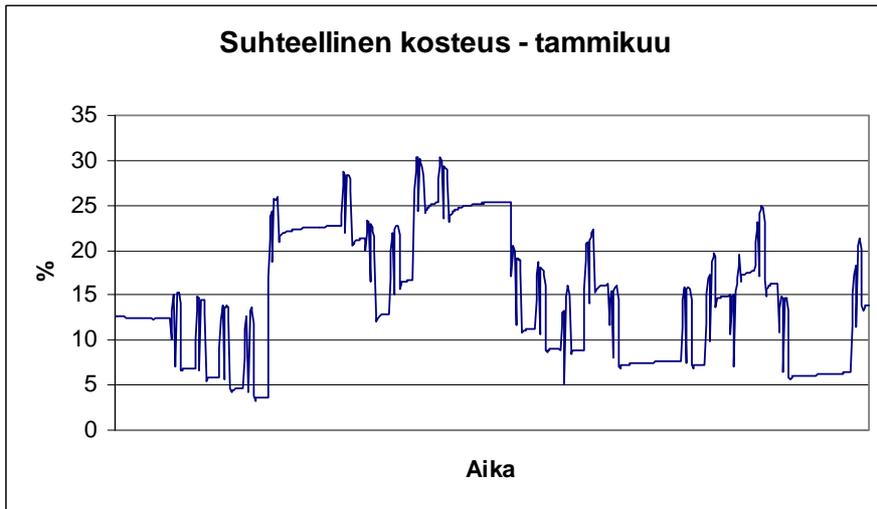
9.2 Tulokset

9.2.1 Päiväkotihuoneen 103 sisäolosuhteet

Kuvissa 70 ja 71 on esitetty päiväkotihuoneen 103 sisälämpötilat ja ilman kosteudet eri kuukausina.

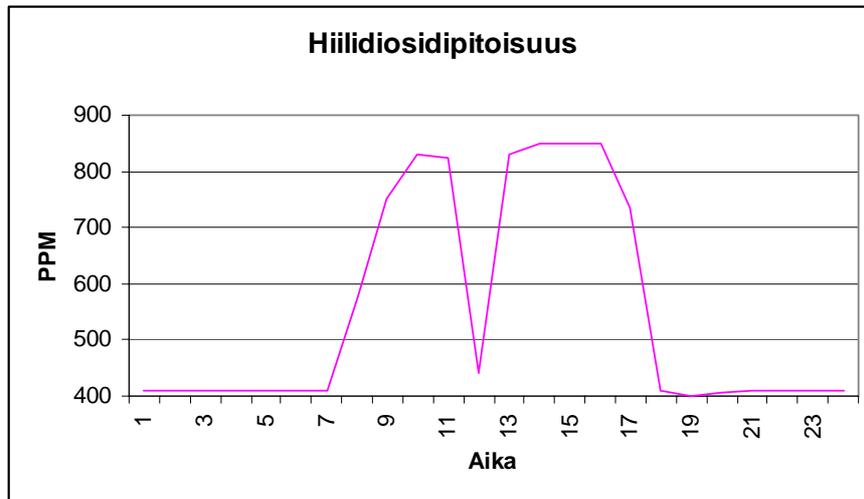


Kuva 70. Huoneen 103 tammi- maaliskuu- ja toukokuun sisälämpötilat.



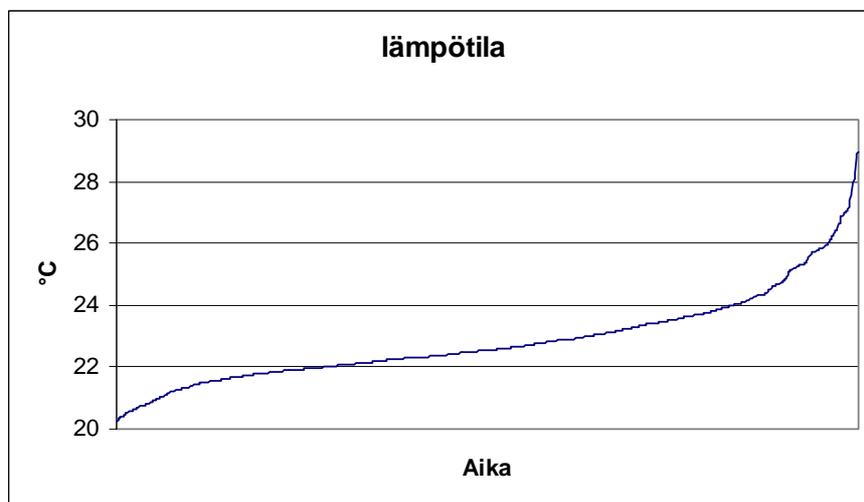
Kuva 71. Huoneen 103 suhteelliset kosteudet tammi-, maaliskuu-, ja toukokuussa.

Kuvassa 72 on esitetty päiväkotihuoneen 103 CO₂-pitoisuuden vaihtelu tyypillisen koulupäivän aikana.

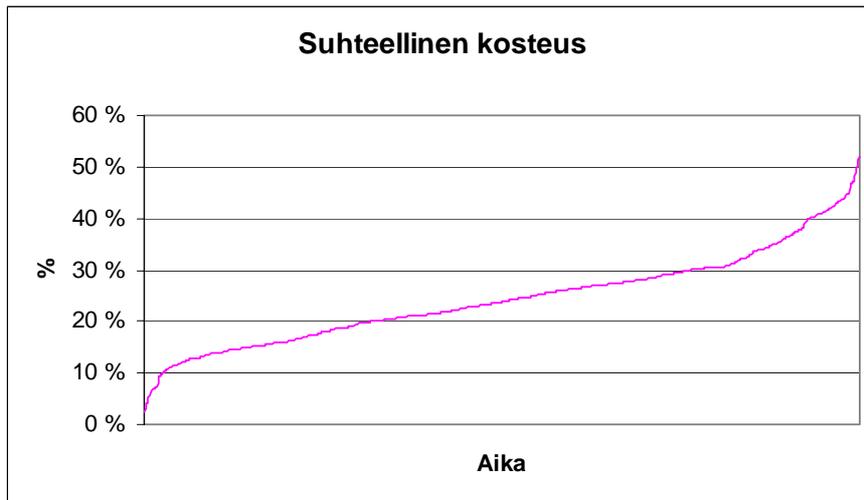


Kuva 72. Huoneen 103 hiilidioksidipitoisuus.

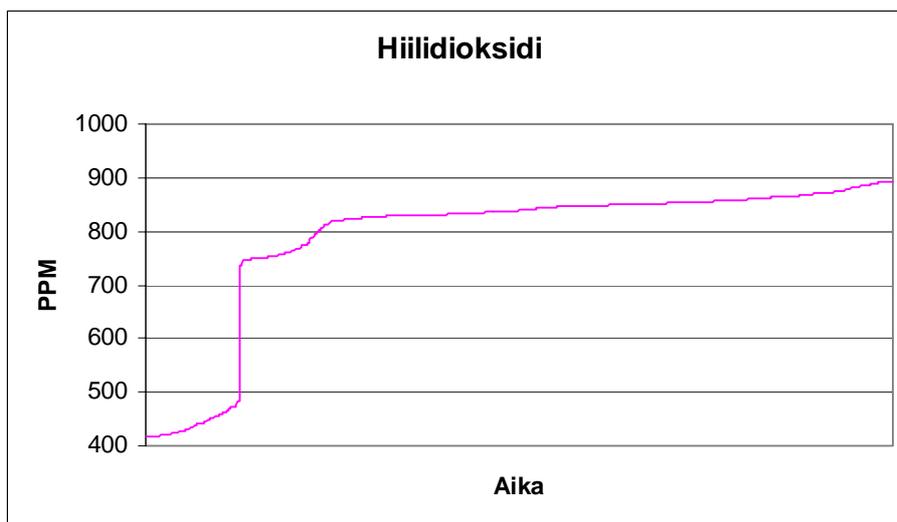
Kuvissa 73–75 on esitetty päiväkotihuoneen 103 sisälämpötilan, suhteellisen kosteuden ja CO₂-pitoisuuden pysyvyydet kevätlukukauden aikana. Kuvissa on mukana ainoastaan kello 8 ja 15 välinen aika arkisin.



Kuva 73. Huoneen 103 lämpötilan pysyvyys arkipäivisin 8–15 välisenä aikana.



Kuva 74. Huoneen 103 suhteellisen kosteuden pysyvyys arkipäivisin 8–15 välisenä aikana.

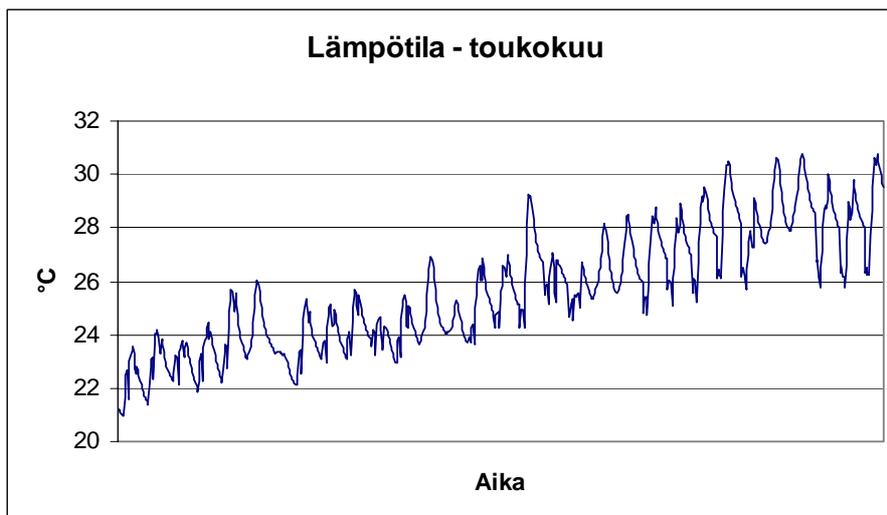
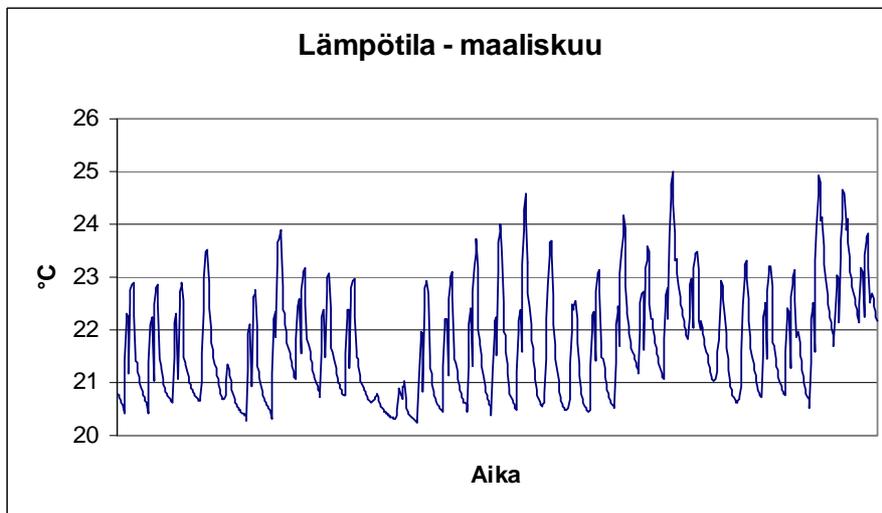
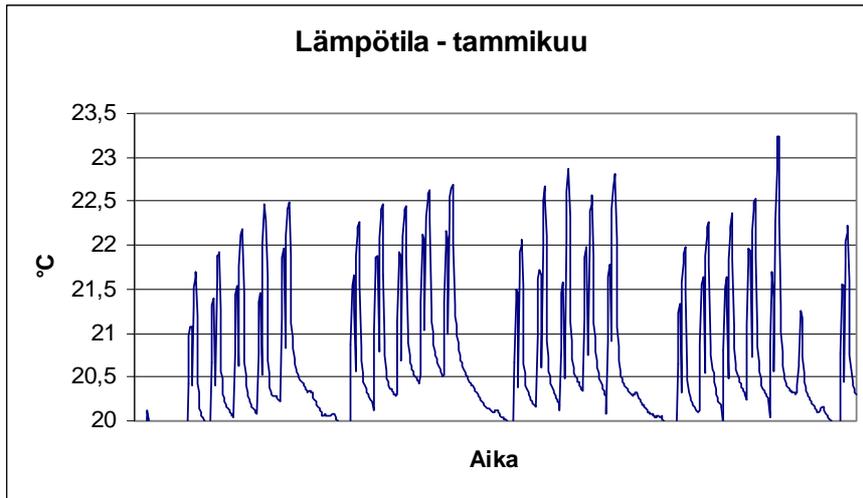


Kuva 75. Huoneen 103 hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys arkipäivisin 8–15 välisenä aikana.

Edellä esitetyistä kuvista voidaan havaita, että päiväkotihuoneen 103 sisäilmasto-olosuhteet ovat kevätlukukauden aikana hyvät toukokuun kuumimpia päiviä lukuun ottamatta. Sisälämpötila ylittää 26 °C neljässä prosentissa läsnäolotunneista. Hiilidioksidipitoisuus ei ylitä 900 ppm:ää, joka on sisäilmastoluokituksen S2-luokan raja-arvo.

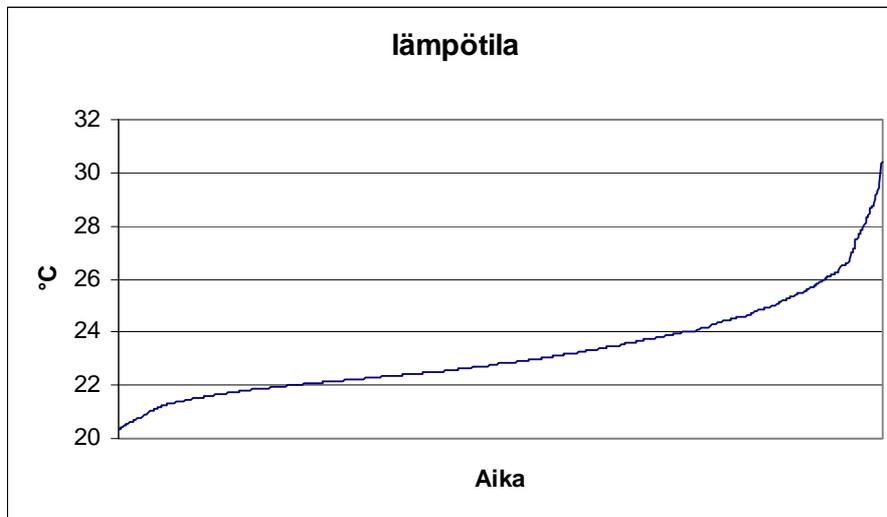
9.2.2 Päiväkotihuoneen 108 sisäolosuhteet

Kuvassa 76 on esitetty päiväkotihuoneen 108 sisälämpötilat eri kuukausina.



Kuva 76. Huoneen 108 sisälämpötilat tammi- maaliskuu- ja toukokuussa.

Kuvassa 77 on esitetty päiväkotihuoneen 108 sisälämpötilan pysyvyys kevätlukukauden aikana. Kuvassa on mukana ainoastaan kello 8 ja 15 välinen aika.

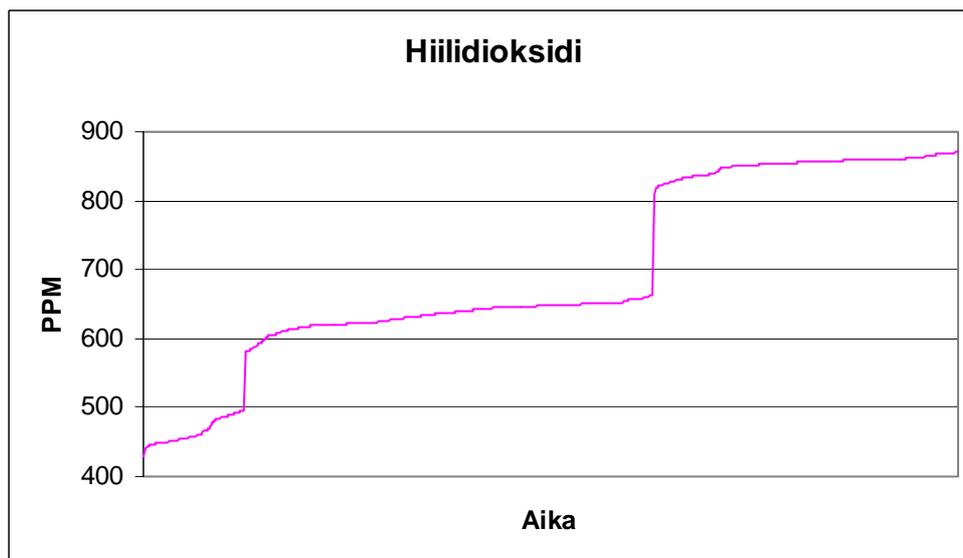


Kuva 77. Huoneen 108 sisälämpötilan pysyvyys.

Edellä esitetystä kuvasta voidaan havaita, että päiväkotihuoneen 108 sisälämpötila ylittää sisäilmastoluokan S2 raja-arvon (+26 °C) n. 8 prosentissa käyttötunneista.

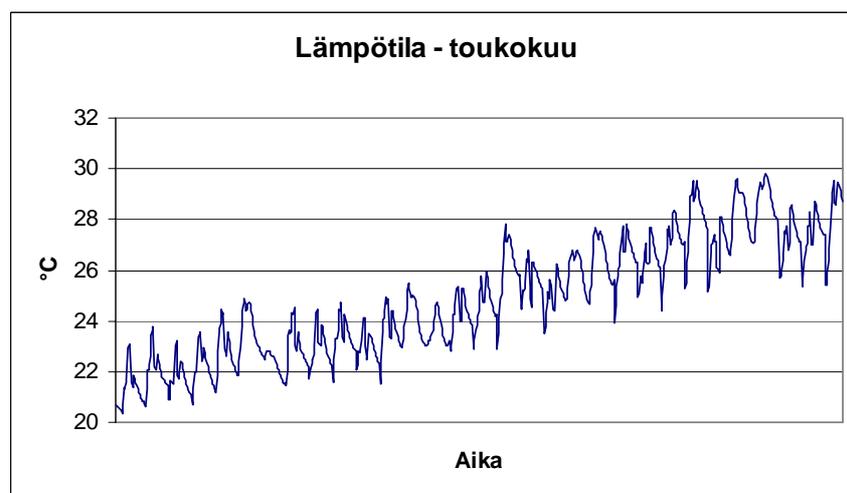
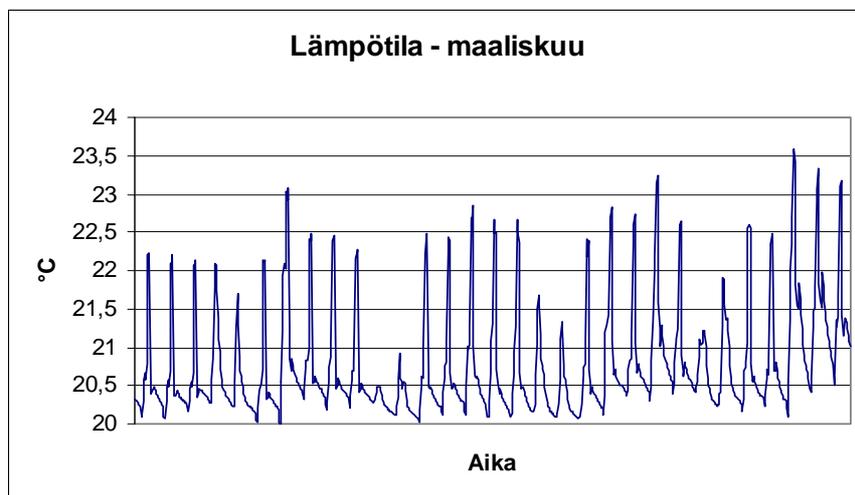
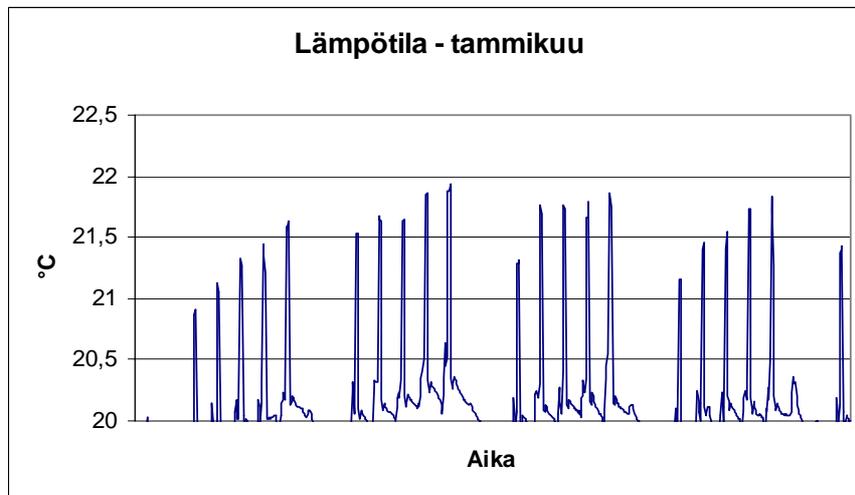
9.3 Luokkahuoneiden sisäolosuhteet

Kuvassa 78 on luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus tyypillisenä koulupäivänä.



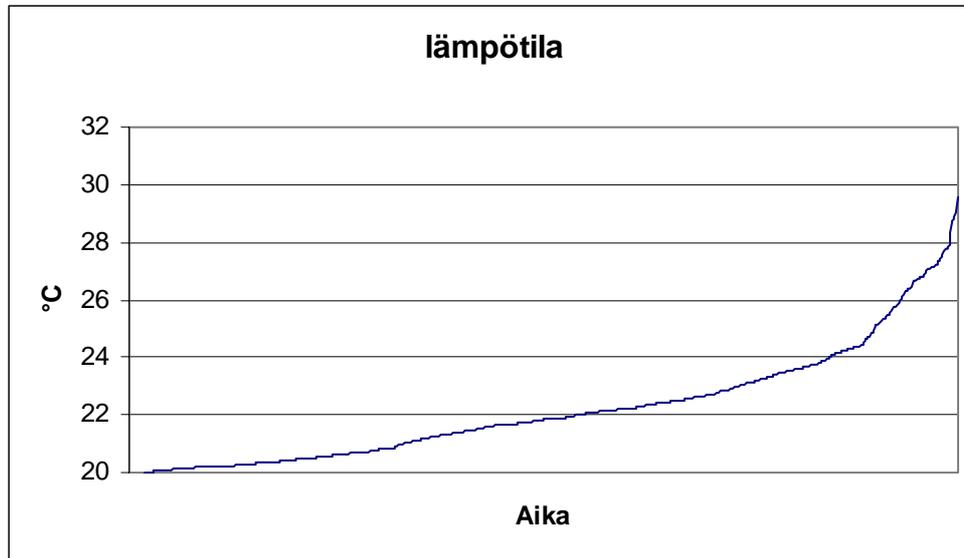
Kuva 78. Luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys.

Kuvassa 79 on esitetty luokkahuoneen 105&106 sisälämpötilat eri kuukausina.



Kuva 79. Luokkahuoneen sisälämpötilat tammi-, maaliskuu- ja toukokuussa.

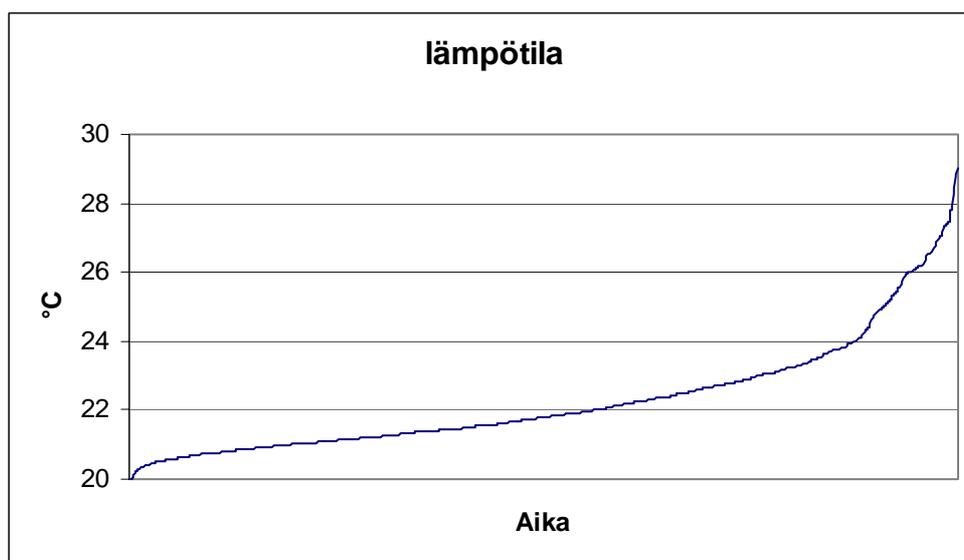
Kuvassa 80 on esitetty luokkahuoneen 105&106 sisälämpötilan pysyvyys kevätlukukauden aikana. Voidaan havaita, että luokkahuoneen 105&106 sisälämpötila ylittää sisäilmastoluokan S2 raja-arvon n. 7 prosentissa käyttötunneista ja hiilidioksiditaso ei ylitä 900 ppm:ää, joka on sisäilmastoluokan S2 raja-arvo.



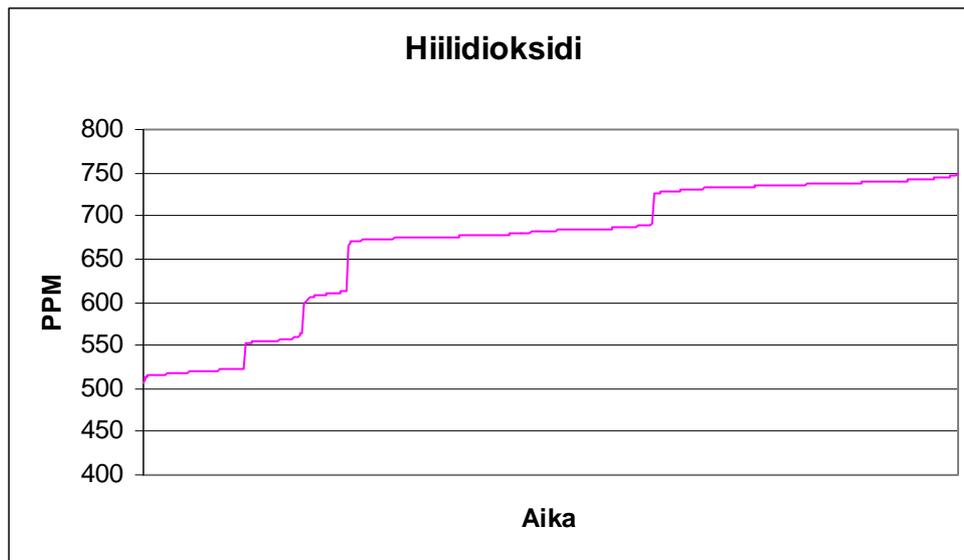
Kuva 80. Luokkahuoneen sisälämpötilan pysyvyys.

9.3.1 Piazzan sisäolosuhteet

Kuvissa 81 ja 82 on esitetty Piazzan eli aulatilán 101 lämpötilan ja CO₂-pitoisuuden pysyvyydet kevätlukukauden ajalta.



Kuva 81. Aulatilán sisälämpötilán pysyvyys.



Kuva 82. Aulatilän hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys.

Edellä esitetyistä kuvista voidaan havaita, että Piazzan sisälämpötila ylittää sisäilmatuokan S2 raja-arvon n. 6 prosentissa kouluajasta ja CO₂-pitoisuus pysyy aina alle 750 ppm:n.

9.3.2 Energiatalous

Rakennuksen energiatalous poikkeaa muista rakennuksista siten, että ilmanvaihtokanaviston painetaso on normaalia alhaisempi ja käytönaikaiset kokonaisilmamäärät jäävät periteistä järjestelmää pienemmiksi.

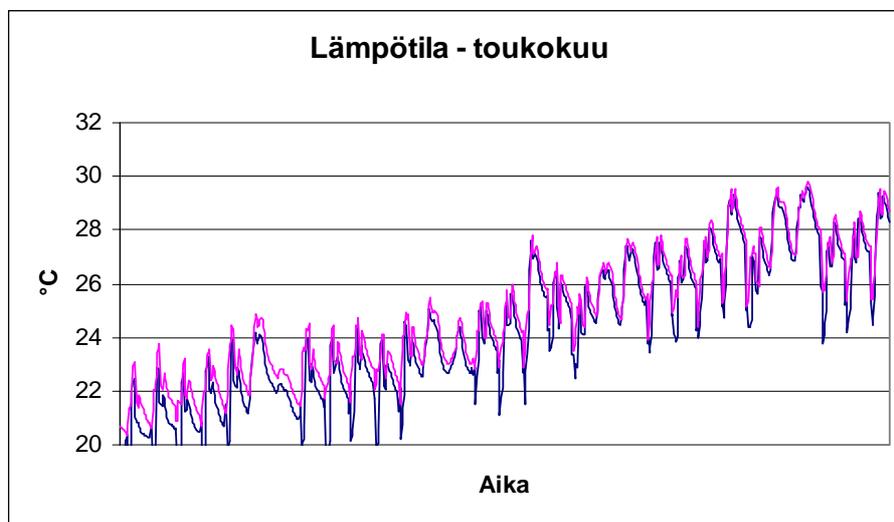
Koska ilmastointilaitoksessa ilmavirtojen suhde pysyy kaikissa olosuhteissa vakiona ja lämmön talteenoton mitoitukselta ei ole käytettävissä tarvittavaa tietoa, voimme olettaa, että lämmön talteenoton hyötysuhde pysyy vakiona. Täten ilmanvaihdon lämmitysenergian osuus perinteiseen järjestelmään verrattuna on suoraan ilmavirtojen suhde. Simulointien mukaan ilmastoinnin lämmitysenergiatarve on alle 60 % vertailujärjestelmään verrattuna

Puhallinenergian säästö johtuu pienentyneestä kokonaisilmamäärästä ja pienemmästä painetasosta. Vertailujärjestelmän painetasoina käytettiin 1 000, 1 500 ja 2 000 Pa. Puhallinenergian tarve oli 45 %, 30 % ja 23 % vertailujärjestelmän edellä mainittuihin eri painetasoihin verrattuna.

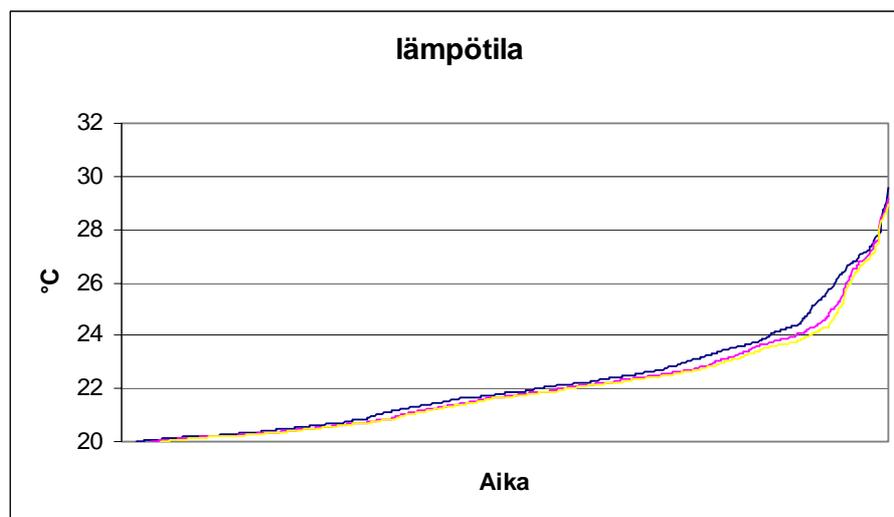
9.4 Erikoistapaukset

9.4.1 Luokkahuoneen ikkunatuuletus

Tässä tapauksessa tutkitaan ikkunatuuletuksen vaikutusta luokkahuoneen 105&106 tuki-
kokuussa esiintyviin lämpötiloihin. Ikkunatuuletus ajoittuu välitunteihin. Kuvassa 83 on
lämpötilan pysyvyys ikkunatuuletuksella ja ilman. Kuvista 83 ja 84 nähdään, että ikku-
nan aukaisulla välituntisin ei ole merkittävää vaikutusta sisälämpötilaan. Sisäilmasto-
luokan S2 ylittäviä käyttötunteja on 4–5 % ikkunatuuletuksen kanssa, kun ilman ikku-
natuuletusta niitä on 7 %. Parempaan tulokseen päästään, kun ikkunan aukioloaikaa
lisätään.



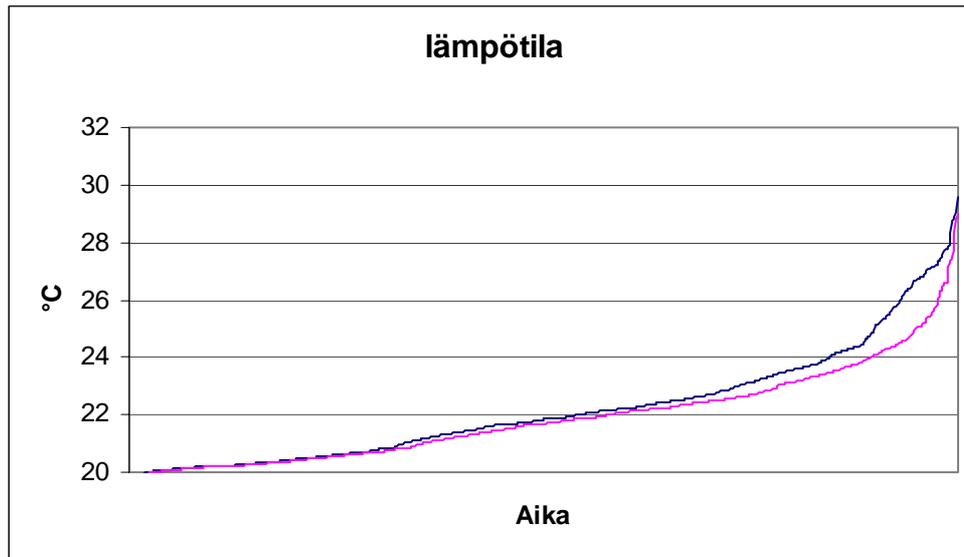
Kuva 83. Luokkahuoneen ikkunatuuletuksen vaikutus sisälämpötilaan.



Kuva 84. Luokkahuoneen ikkunatuuletuksen vaikutus sisälämpötilan pysyvyyteen.

9.4.2 Luokkahuoneen ilmamäärän säätö lämpötilan mukaan

Tässä vaihtoehdossa tutkitaan, miten ilmamäärän säätö, joka toimii sekä lämpötilan että hiilidioksidipitoisuuden mukaan, vaikuttaa toukokuun yllämpöön (kuva 85). Säätö toimii siten, että lämpötila- ja CO₂-säätimien suurempi arvo määrää ilmamäärän. Hiilidioksidisäätimen arvot ovat 800 ja 1 000 ppm ja lämpötilasäätimen arvot ovat 24 ja 26 °C. Kun molemmat säätimet toimivat, vain 2 % käyttäjistä ylittää 26 °C.

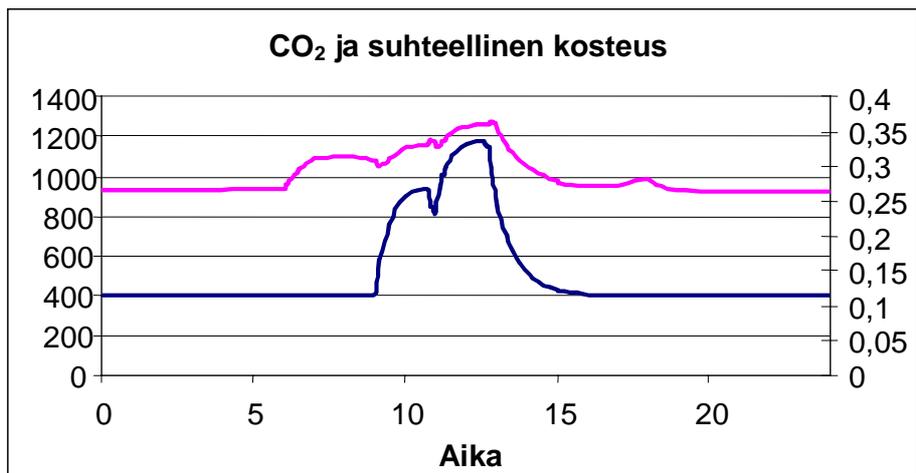


Kuva 85. Luokkahuoneen ilmanvaihdon lämpötilan säädön vaikutus sisälämpötilaan.

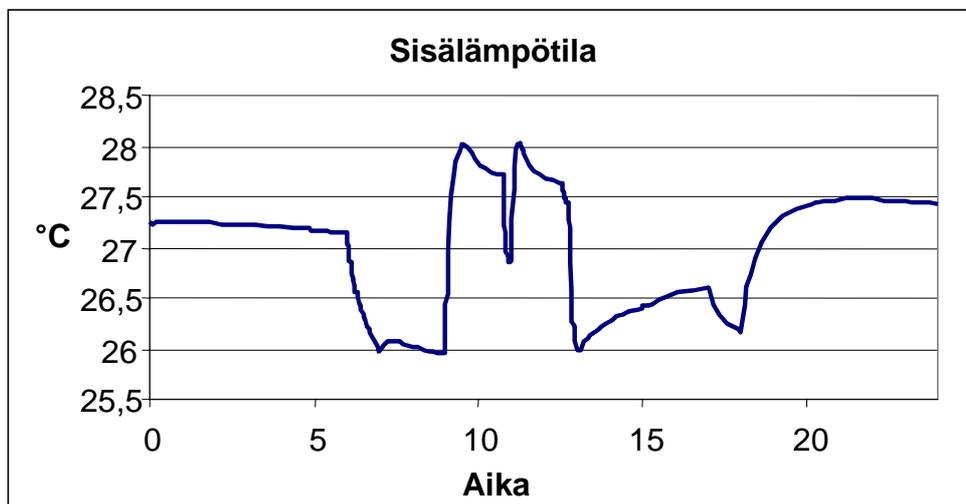
9.4.3 Koulun päättäjäiset

Tässä tarkastellaan koulun päättäjäisiä, joissa kuormitus on hetkellisesti hyvin suuri. Päättäjäiset pidetään kahdessa erässä, koska kerralla koko koulun oppilaat vanhempineen eivät mahdu juhlasaliin. Toisen erän saapuessa juhlasaliin ensimmäisen erän oppilaat vanhempineen siirtyvät luokkahuoneisiin todistustenjakoon. Laskelmissa isossa aulassa on 200 henkilöä klo 9.00–10.45 ja 11.00–12.45.

Kuvassa 86 on esitetty ison aulatilän CO₂-pitoisuus ja suhteellinen kosteus päättäjäispäivänä. Suhteellinen kosteus ei näytä muodostuvan ongelmaksi ja hiilidioksidipitoisuuskin pysyy alle 1 200 ppm:n. Päättäjäispäivän simulointi on tehty testivuoden toukokuun kuumimpana päivänä, joten sisälämpötilojen osalta simulointitulokset edustavat huonointa tilannetta (kuva 87). Päättäjäispäivän tilannetta voidaan parantaa siirtymällä ennakoita ilmanvaihtolaitos käsiohjaukseen siten, että myös kuormittamattomien luokkien tuloilmavirtaa kasvatetaan. Kuvassa 88 ilmanvaihtolaitos on päällä vuorokauden ympäri, jolloin aulan lämpöolosuhteet muodostuvat huomattavasti miellyttävämmiksi.



Kuva 86. Aulatilán hiilidioksidipitoisuus ja suhteellinen kosteus päättäjáisten aikana.



Kuva 87. Aulatilán sisälämpötila päättäjáisten aikana.



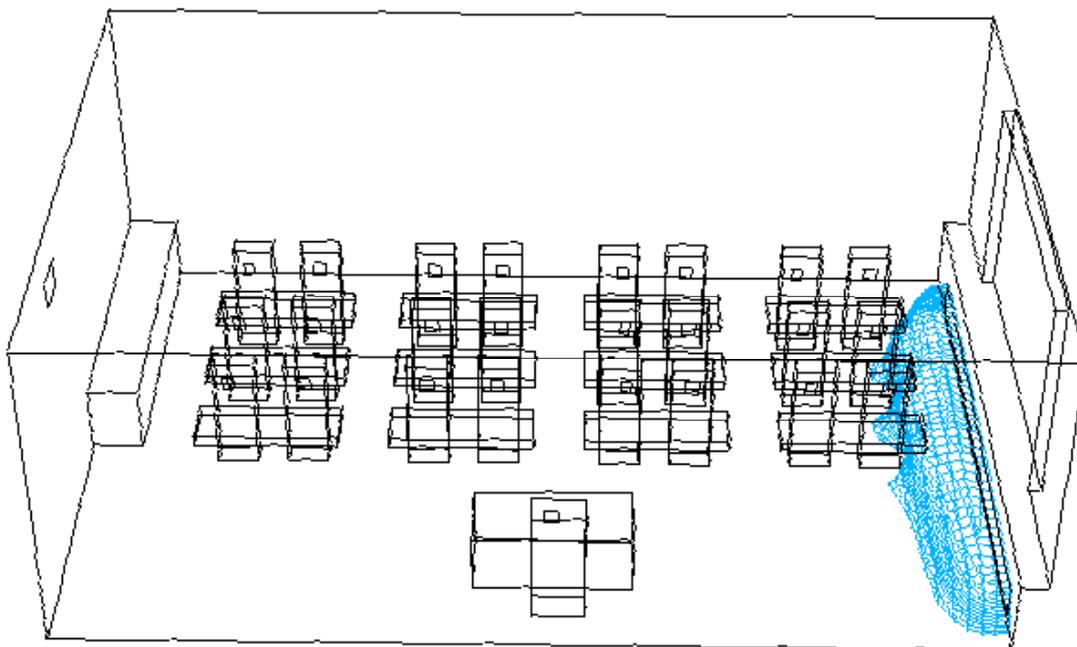
Kuva 88. Aulatilán sisälämpötila päättäjáisten aikana yötuuletuksen jälkeen.

9.5 Luokkahuoneen virtauskenttä

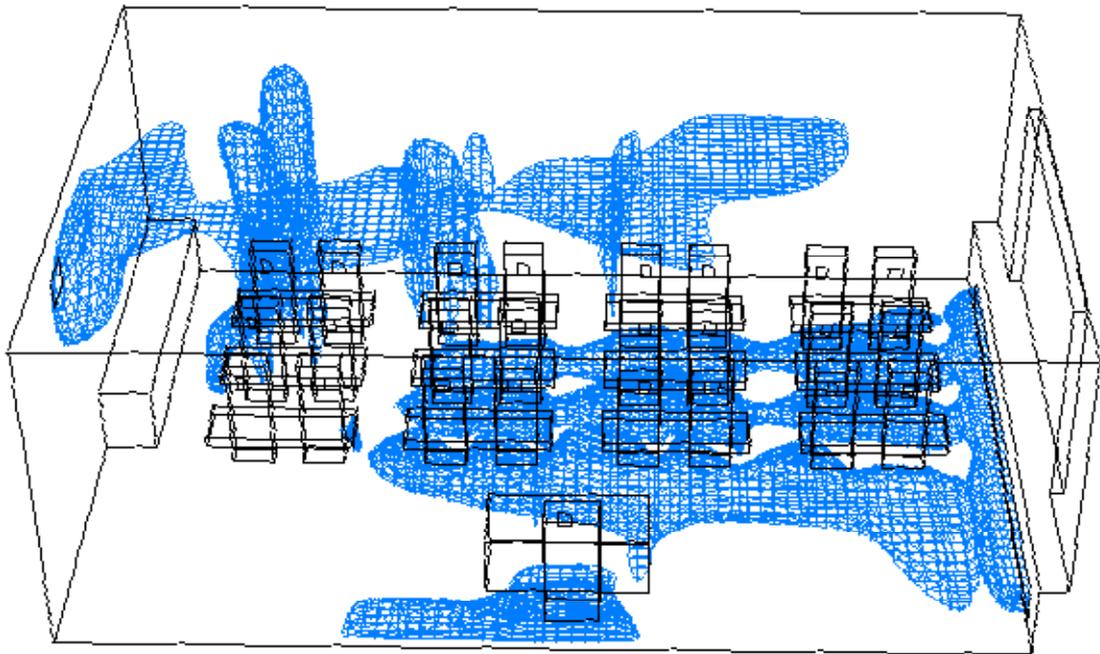
Poikkilaakson koulun luokkahuoneen 105 ilmanjaon toimintaa laskettiin Fluent-virtauslaskentaohjelmistolla. Luokan (kuva 1 sivulla 15) pituus ja leveys ovat 9,2 ja 6 m sekä korkeus 3,3 m. Laskelmat tehtiin maksimi-ilmavirralla 240 dm³/s käyttäen syrjäytysilmanvaihtoa tai vaihtoehtoisesti kattohajottimia. Tuloilman lämpötila oli 20 °C ja poistoilman lämpötila noin 24 °C, joten tuloilman alilämpötila oli 4 °C.

Syrjäytysilmanvaihtotapaus laskettiin myös isotermisenä, jotta sitä voitiin verrata ilmanjakolaitteen valmistajan omiin tuloksiin tuloilmalaitteen lähialueen virtausnopeudesta. Vertailun mukaan tuloilmalaitteen mallinnus on onnistunut laskelmassa. Tässä esitetään kuitenkin vain alilämpöisen tilanteen laskentatulokset.

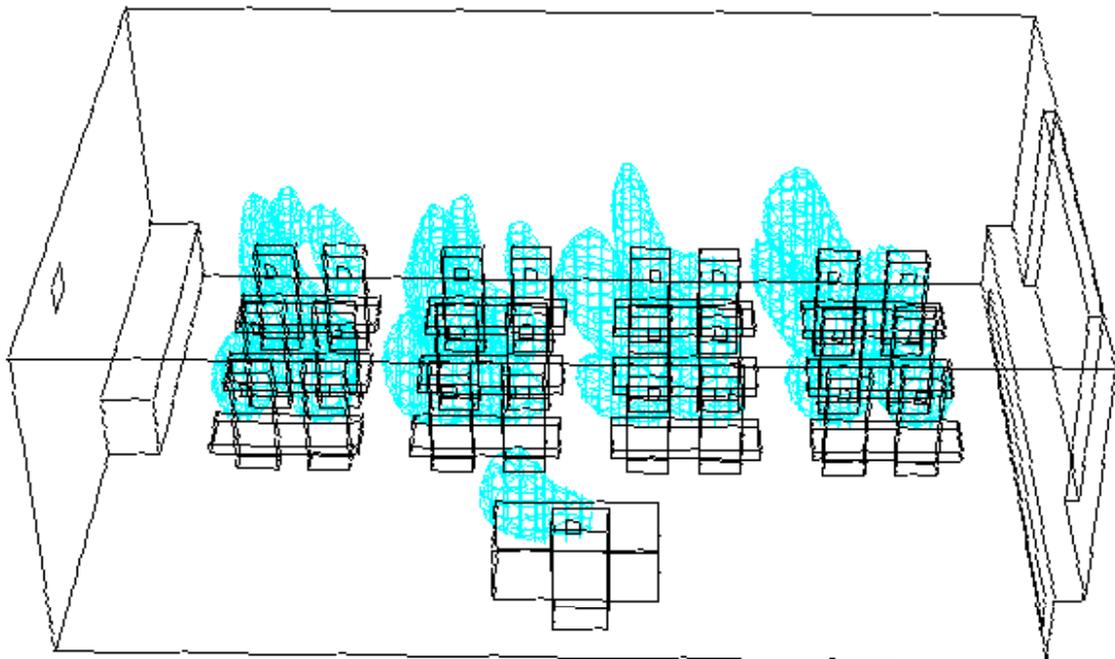
Viileän tuloilman lämpeneminen tuloilma-aukon läheisyydessä näkyy kuvasta 89. Tulosten mukaan ilman nopeudet oleskeluvyöhykkeellä ovat syrjäytysilmanvaihdolla alle 0,2 m/s, mutta nopeus 0,15 m/s ylittyy ohuessa kerroksessa lähellä lattiaa, kuva 90. Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon, että kyseessä on jäähdytystilanne ja edellä olevien tarpeenmukaisen ilmanvaihdon simulointien mukaan maksimi-ilmavirta esiintyy vain hyvin harvoin. Hiilidioksidipitoisuus on laskelmien mukaan tasainen: oppilaiden yläpuolella oleva alue, jossa pitoisuus on 20 % poistoilman pitoisuutta suurempi, on pieni, kuva 91. Siksi edellä olevien simulointilaskelmien vakiopitoisuusoletus on hyvä.



Kuva 89. Kuvassa on laskettu 23 °C lämpötilan pinta luokkahuoneessa syrjäyttävällä ilmanjaolla. Tuloilma tulee ikkunan alla olevasta ilmanjakolaitteesta lämpötilassa 20 °C. Ilma ehtii lämmitä siten noin 3 °C ennen kuin se saavuttaa reunimmaisien oppilasrivien. Poistoilman lämpötila on noin 24 °C.

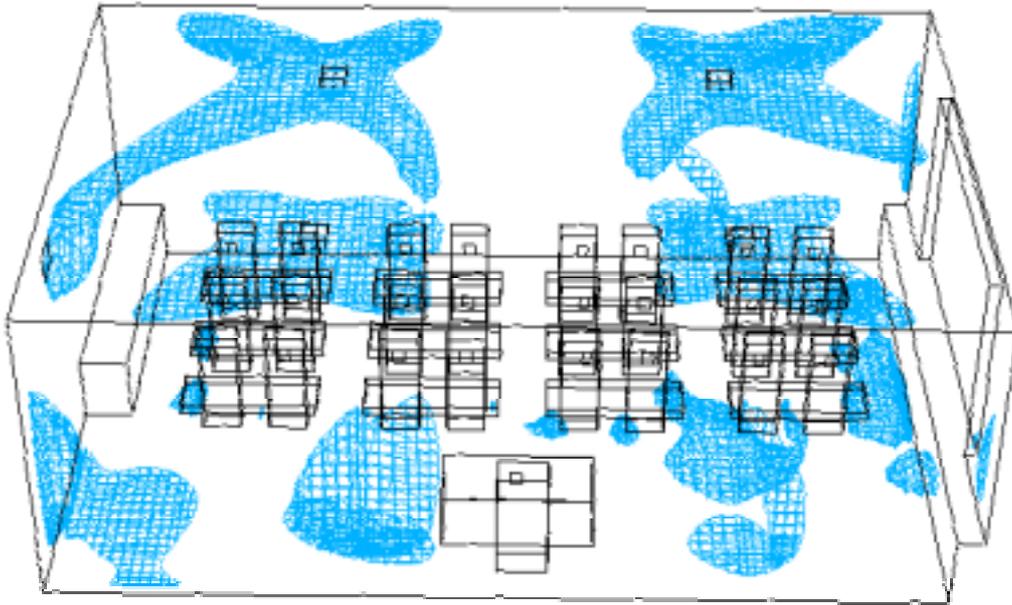


Kuva 90. Ilman nopeuden 0,15 m/s pinta syrjäyttävällä ilmanjaolla maksimi-ilmavirralla. Ilman nopeus 0,15 m/s ylittyy laskennan mukaan paikoitellen lähellä tuloilmalaitetta.

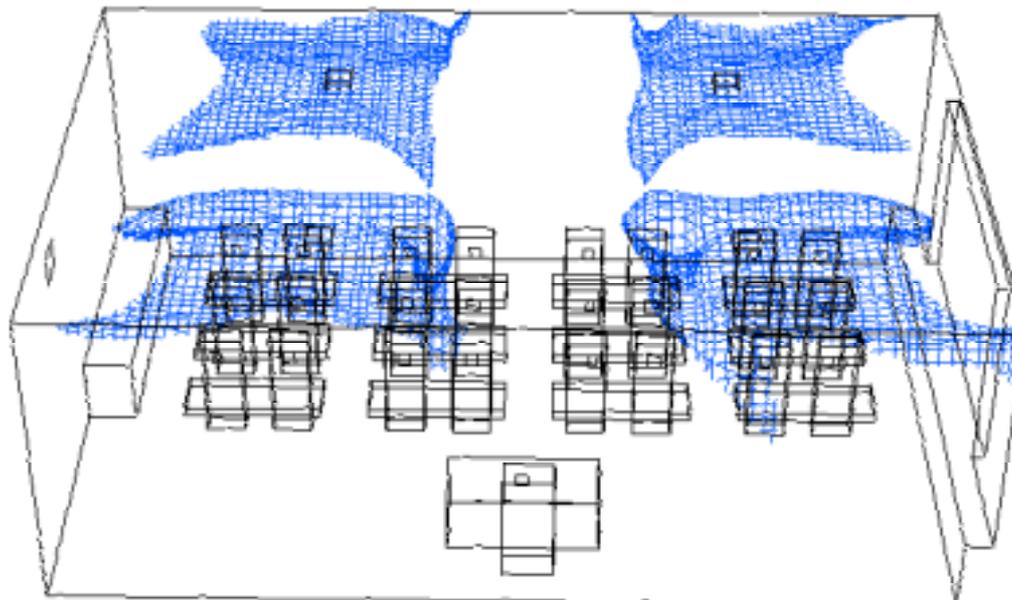


Kuva 91. Pinta, jolla ihmisperäinen hiilidioksidipitoisuus on 20 % suurempi kuin poistoilma-aukossa. Todetaan, että korkea hiilidioksidipitoisuus rajoittuu pieneen alueeseen oppilaiden ja opettajien yläpuolella. Tuloilma tulee syrjäyttävästi oikealta ikkunan alta ja ilma poistuu vasemmalla sivuseinällä olevasta aukosta.

Vaihtoehtoisella sekoittavalla ilmanjaolla katosta virtausnopeudet ovat yllättäen hieman suurempia kuin syrjäyttävällä ilmanjaolla. Nopeus 0,25 m/s ylittyy paikoitellen lähellä lattiaa, kuva 92. Lämpötilaerot huoneessa ovat pieniä, kuva 93. Huoneen virtauksia tullaan mittaamaan koulun valmistuttua.

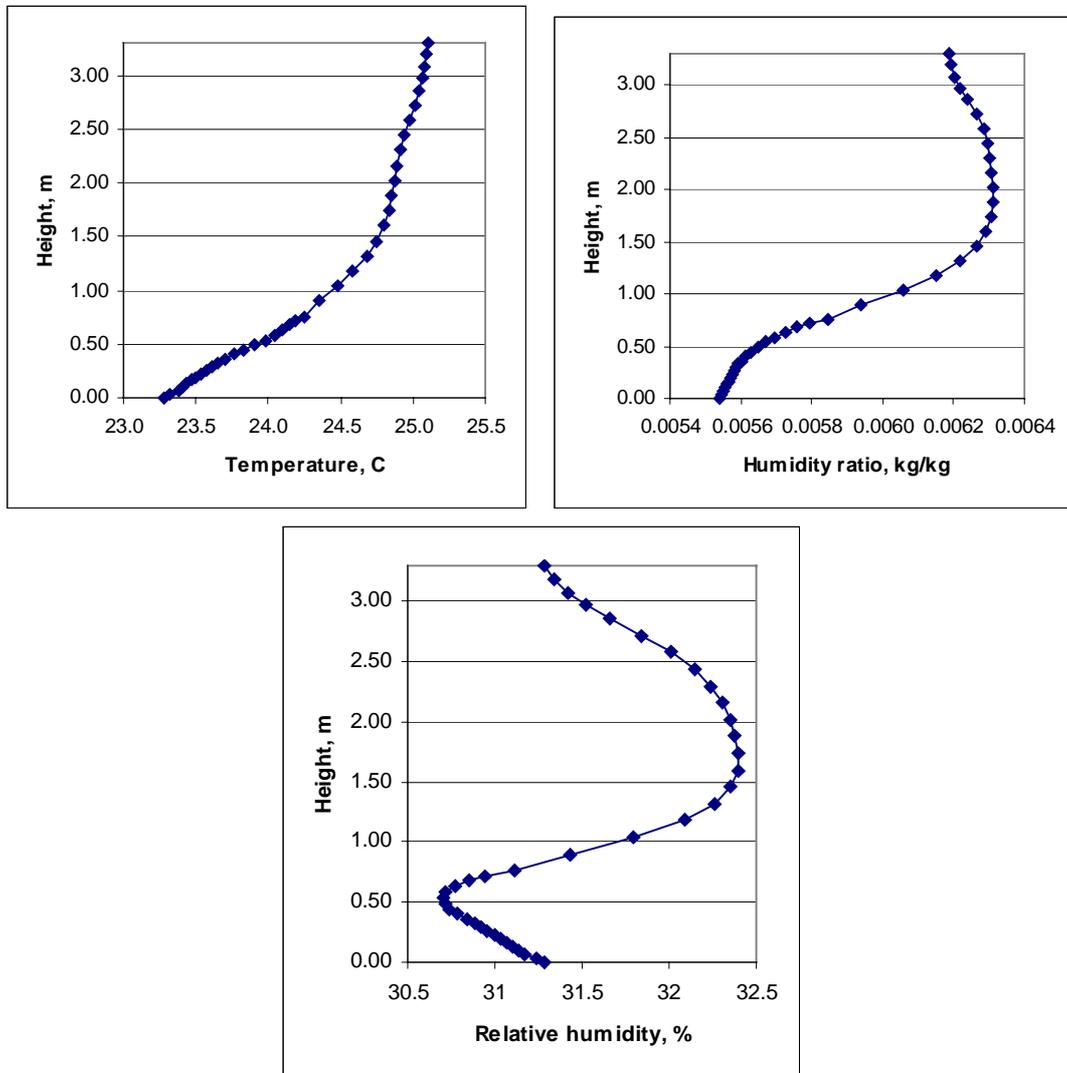


Kuva 92. Ilman nopeuden 0,25 m/s pinta sekoittavalla ilmanjaolla. Nopeus 0,25 m/s ylittyy kattohajottimien lähellä ja paikoin lattialla seinien vierellä.



Kuva 93. Ilman lämpötilan 23 °C pinta sekoittavalla ilmanjaolla esiintyy vain lähellä kattohajottimia. Kun tuloilman lämpötila on 20 °C ja poistoilman 24 °C, voidaan todeta, että huoneen lämpötilaerot ovat pieniä.

Myös ilman kosteus jakautuu huoneessa suhteellisen tasaisesti. Kuvasta 94 näkyy, että absoluuttinen ilman kosteus kerrostuu samaan tapaan kuin lämpötila tai hiilidioksidipitoisuus: lähellä lattian rajaa ilma on kuivempaa kuin oppilaiden yläpuolella.



Kuva 94. Ilman lämpötilan, absoluuttisen kosteuden ja suhteellisen kosteuden kerrostumat keskellä luokkahuonetta syrjäyttävällä ilmanjaolla. Laskettu Fluent-virtauslaskentaohjelmalla.

9.6 Yhteenveto

Poikkilaakson kouluun suunniteltu matalapaineinen ilmastointijärjestelmä on simuloinneissa osoittautunut energiataloudelliseksi ja hyvän sisäilmaston takaavaksi järjestelmäksi. Simulointien mukaan ilmastoinnin lämmitysenergiatarve on alle 60 % vertailujärjestelmään verrattuna. Puhallinenergian tarve oli 45 %, 30 % ja 23 % vertailujärjestelmän eri painetasoihin verrattuna (1 000, 1 500 ja 2 000 Pa).

Simulointien mukaan päiväkotihuoneiden sisäilmasto-olosuhteet ovat kevätlukukauden aikana hyvät. Sijainniltaan epäedullisimman päiväkotihuoneen sisälämpötila ylittää sisäilmastoluokan S2 [2] raja-arvon (+26 °C) n. 8 prosentissa käyttötunneista. Hiilidioksidipitoisuus ei ylitä S2-luokan raja-arvoa (900 ppm). Käytännössä simuloinneissa esiintyneitä sisälämpötilojen huippuja ei tule kuitenkaan esiintymään, koska lapset viettänevät suurimman osan ajastaan ulkona noina päivinä.

Simuloiduissa luokkahuoneissa sisälämpötila ylittää sisäilmastoluokan S2 raja-arvon n. seitsemässä prosentissa käyttötunneista ja hiilidioksiditaso ei ylitä 900 ppm:ää, joka on sisäilmastoluokan S2 raja-arvo.

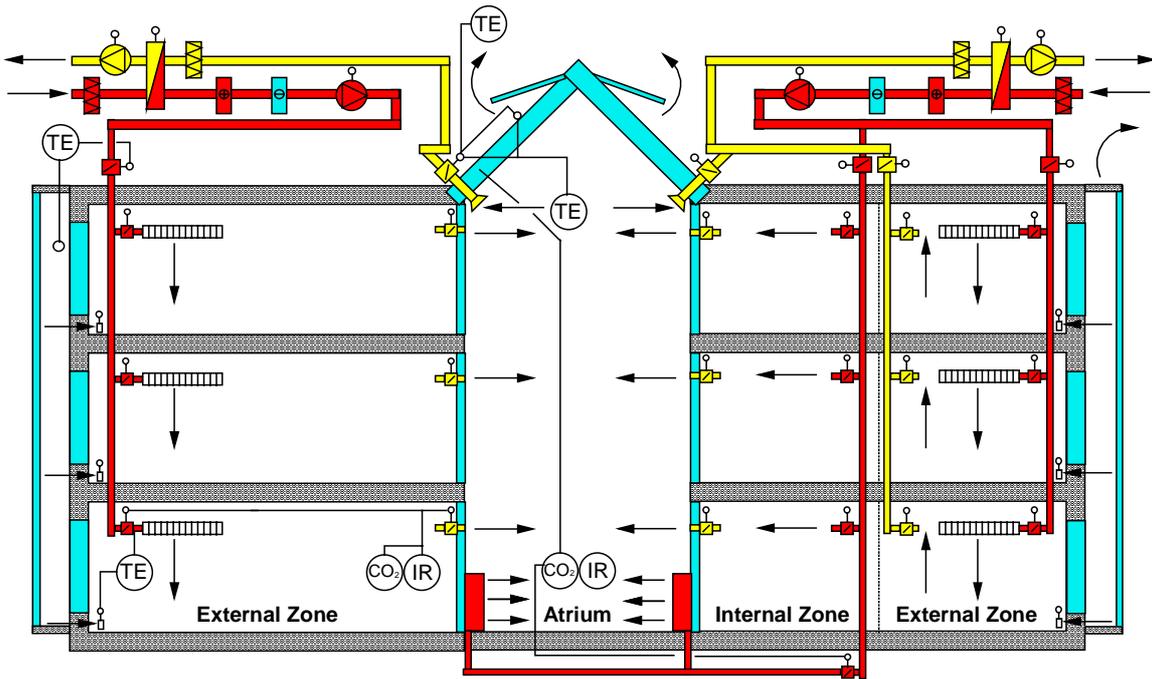
Sekä ikkunatuuletus että tuloilmamäärän ohjaaminen lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden mukaan parantavat luokkahuoneiden tilannetta toukokuun kuumien päivien aikana.

Koulun päättäjäisten aikana aulatilán hiilidioksidipitoisuus nousee yli 1 200 ppm:n ja lämpötila aina 28 °C:seen. Koulun päättäjäisiin on syytä varautua yötuuletuksella ja kasvattamalla myös kuormittamattomien luokkahuoneiden ilmavirtaa päättäjäisten aikana.

Luokkahuoneen virtauslaskelmat osoittivat, että hiilidioksidipitoisuuden jakautuma on varsin tasainen. Ilman nopeudet oleskeluvyöhykkeellä olivat hieman pienempiä syrjäyttävällä ilmanjaolla kuin sekoittavalla ilmanjaolla. Silti ilman nopeudet voivat olla suurilla ilmavirroilla niin korkeita, että ikkunan lähellä istuvat oppilaat voivat joissakin olosuhteissa aistia vetoa.

10. Konseptin 3 elinkaarivertailu

Elinkaarivertailuun valittiin matalapaineinen hybridi-ilmanvaihtokonsepti, jonka toiminta perustuu koneelliseen ilmanvaihtoon lämmitys- ja jäähdytyskaudella. Välikausilla (kevällä ja syksyllä sään salliessa) ulkovyöhykkeen tuloilma voidaan ottaa sisään suoraan ulkoa ulkoseinän tai ikkunan läpi. Tällöin ilmanvaihdon käyttövoimana toimii ikkunatuuletus ja koneellinen poistoilmajärjestelmä. Kuvassa 95 on esitetty konseptin periaatekuva.



Kuva 95. Ilmanvaihtokonseptin 3 periaatekuva [15].

Taulukossa 12 on esitetty tämän ilmanvaihtokonseptin suunnittelunäkökohtia. Käytännössä ilmanvaihto toimii suurimman ajan vuodesta koneellisesti, jota kautta sisäolosuhteet on helppo hallita. Varsinaisena hybridi-ominaisuutena konseptissa onkin tavanomaista selvästi matalampien painetasojen käyttö. Tällä konseptilla on saavutettavissa nopeampi hybridi-ominaisuuksien yleistyminen kuin muilla tavanomaisesta enemmän poikkeavilla konsepteilla.

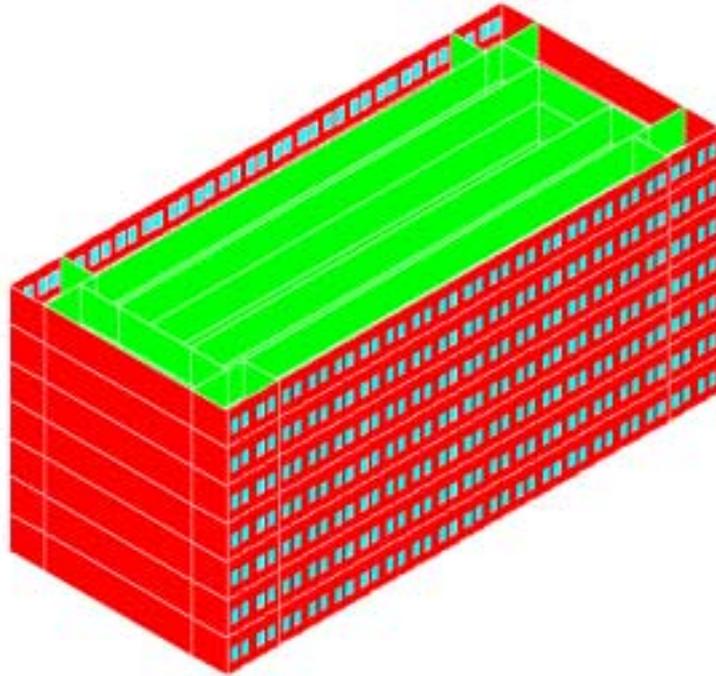
Taulukko 12. Hybridikonseptin 3 suunnittelunäkökohtia.

Rakennus	
Muoto	Ei rajoituksia
Kerrostien lukumäärä	Ei rajoituksia
Huoneiden sijoittelu	Ei rajoituksia
Kaksoisjulkisivu	Valinnainen, tuloilman esilämmitys
Ilmanvaihto	
Painehäviöt	Tavanomaista alhaisemmat, SFP-luku < 1500 W/m ³ /s
Komponenttien koko	Hieman normaalia suuremmat
Komponenttien saatavuus	Normaali
Tekninen toteutettavuus	Melkein normaali
Suunnittelu	Järkevä ohjausjärjestelmä, ilmanvaihdon mitoitus
Tilantarve	Hieman normaalia suurempi
Ilman suodatus	Voidaan käyttää, rajoitettu suodatus painovoimaisena
Energiatehokkuus	Puhaltimet ja lämmitys parempi kuin normaalisti
Ikkunoiden avattavuus	Valinnainen, välikaudella
Sisäilmaston hallittavuus	Erinomainen, mahdollisuus yksilölliseen sisäilmastoon
Investointikustannukset	Normaalia suuremmat
Joustavuus	Hyvä

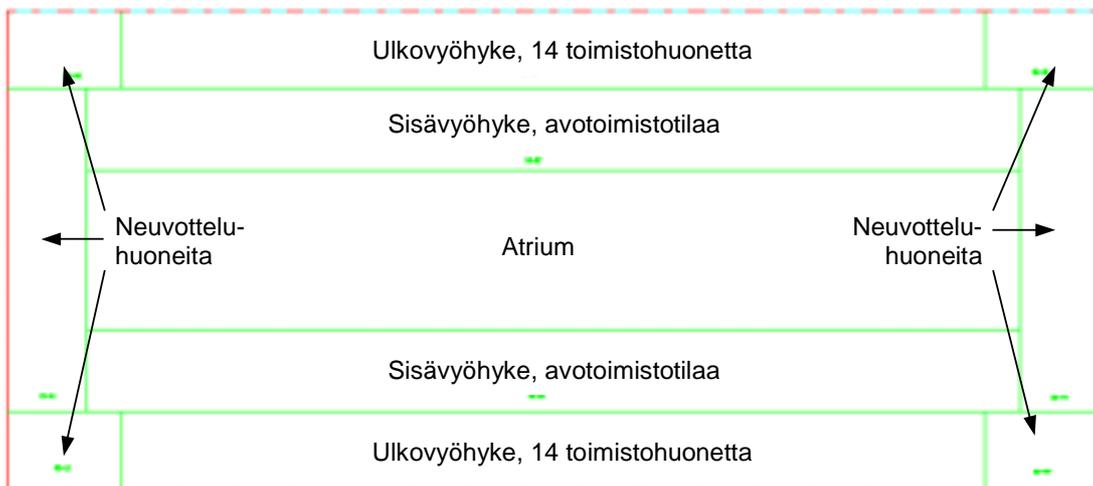
10.1 Tarkasteltava kohde

Laskelmissa käytettiin laajennettua LVIS-2000-mallitoimistorakennusta [20], kuvat 96 ja 97. Alkuperäiseen LVIS-2000-toimistorakennukseen verrattuna kerrosmäärää lisättiin seitsemään, rakennuksen keskelle lisättiin korkea atriumtila ja neuvotteluhuoneiden sijoittelua muutettiin rakennuksen keskeltä päytyyn.

Elinkaarilaskenta tehtiin vain yhdelle toimistoaluetta palvelevalle ilmanvaihtokoneelle, jonka konekoko oli 3,5 m³/s ja sen palveleman alueen mitoitusilmavirta 3,4 m³/s. Ilmanvaihdon normaali käyttöaika oli arkisin kello 7–17. Lisäksi käytettiin tarvittaessa yötuuletusta.



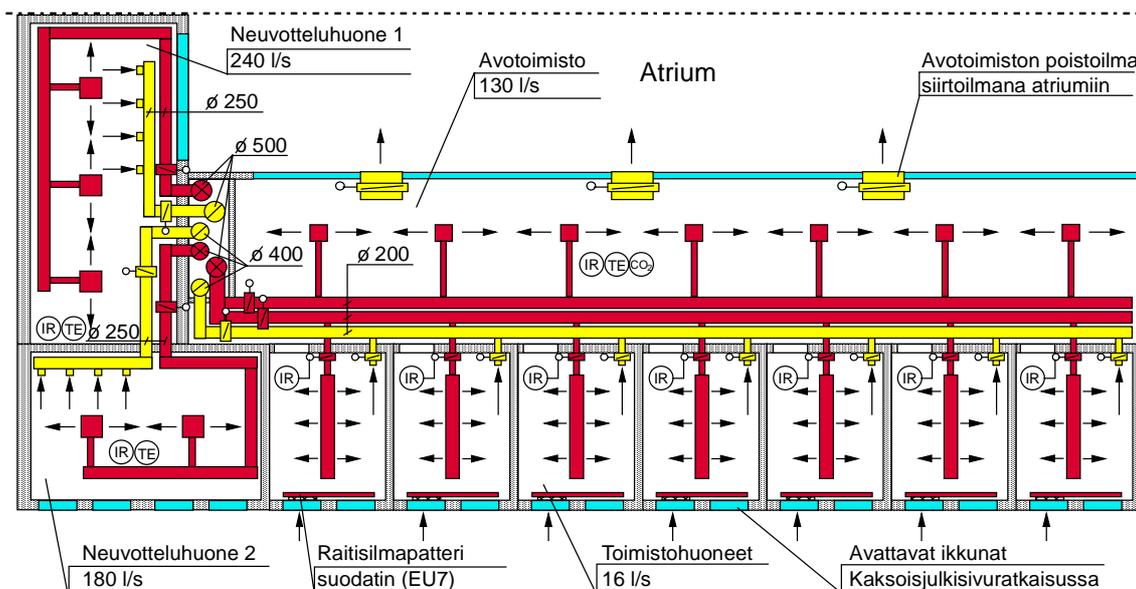
Kuva 96. Laajennetun LVIS-2000-toimistorakennuksen 3-D-malli.



Kuva 97. Laajennetun LVIS-2000-toimistorakennuksen kerroksen tasokuva.

10.2 Ilmanvaihtojärjestelmä

Mallitoimistorakennukseen suunniteltiin valitun ilmanvaihtokonseptin mukainen hybridi-ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvassa 98 on esitetty mallirakennuksen kerroksen ilmanvaihtokanaviston periaatekuva. Kanavisto jatkuu peilikuvana ylöspäin ja oikealle.



Kuva 98. LVIS-2000-mallirakennuksen ilmanvaihdon periaatekuva (normaali tapaus). Kuvassa on esitetty neljännes koko kerroksesta.

Ilmanvaihtokonseptista laadittiin kolme erilaista mitoitusratkaisua. Ilmanvaihtokoneet valittiin erään valmistajan tuotevalintaohjelman avulla mitoituksen yhdenmukaistamiseksi. Vertailtavat ratkaisut olivat:

1. Normaali ratkaisu SFP 3 (SFP-luokka 3, 1 500–2 500 W/m³/s)
2. Matalapaineratkaisu SFP 2 (SFP-luokka 2, 1 000–1 500 W/m³/s)
3. Matalapaineratkaisu SFP 1 (SFP-luokka 1, < 1 000 W/m³/s).

Taulukossa 13 on esitetty ratkaisujen painehäviöt, mitoituksessa käytetyt otsapintanopeudet, ilmavirta, hyötysuhteet sekä SFP-luvut ja taulukossa 14 on esitetty ratkaisujen kanaviston eri osien kanavakoot. Normaaliratkaisussa kanaviston mitoituskriteerinä on käytetty 1 Pa/m, muissa ratkaisuissa on menty aina yhtä kanavakokoa suurempaan.

Taulukko 13. Vertailtavien ratkaisujen painehäviöt, keskimääräinen otsapintanopeus, ilmavirta, hyötysuhteet sekä SFP-luvut.

Painehäviö [Pa]	Normaali paine SFP 3		Matalapaine SFP 2		Matalapaine SFP 1	
	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto
Kanavisto+elimet	230	210	130	100	100	60
Lämmityspatteri	56	–	18	–	7	–
Jäähdytyspatteri	134	–	61	–	23	–
Lämmöntalteenotto	139	139	78	78	52	52
Suodatin	156	156	109	109	82	82
Äänenvaimennin	23	23	10	10	4	4
Ulkosäleikkö	20	20	20	20	20	20
Puhallin	120	87	46	32	18	13
Yhteensä	883	635	475	349	307	231
Otsapintanopeus [m/s]	2,7		1,6		1,0	
Ilmavirta [m ³ /s]	3,5		3,5		3,5	
Hyötysuhteet [%]:						
– lämmöntalteenotto	80		80		80	
– tulopuhallin	65		65		65	
– poistopuhallin	60		60		60	
SFP-luku [W/m³/s]	2429		1314		857	

Taulukko 14. Vertailtavien ratkaisujen kanavakoot. Normaaliratkaisun mitoituskriteerinä oli 1 Pa/m, muissa ratkaisuissa on menty aina yhtä kanavakokoa suurempaan.

Kanavakoko [mm]	Normaali paine SFP 3		Matalapaine SFP 2		Matalapaine SFP 1	
	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto
Kerroshaara	200	200	250	250	315	315
Nousu	500	400	630	500	800	630
Runko	500	400	630	500	800	630
Kone	630	630	800	800	1000	1000

10.3 Elinkaarilaskelma

Elinkaarilaskelmassa laskettiin yhden toimistovyöhykettä palvelevan ilmanvaihtokoneen elinkaarikustannukset kaikille vertailutapauksille kahdella eri ilmanvaihdon ohjaustavalla: vakioilmanvaihdolla ja tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla. Laskelmassa huomioitiin vain ne kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa. Tilantarpeen vaikutusta kustannuksiin ei huomioitu.

Elinkaarilaskelmassa nykyarvon laskenta-aikana oli vaihtoehtoisesti 15 tai 30 vuotta, nimelliskorko oli 5 %, inflaatio 2 % ja energian hinnan suhteellinen nousu 3 %. Lämpöenergian hinta oli 28,39 €/MWh ja sähköenergian hinta 75,68 €/MWh.

10.4 Tulokset

Vakioilmanvaihdolla matalapaineratkaisu 1 oli edullisin sekä 15 vuoden että 30 vuoden laskenta-ajalla:

Taulukko 15. Elinkaarikustannukset verrattuna normaaliratkaisuun vakioilmanvaihdolla. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.

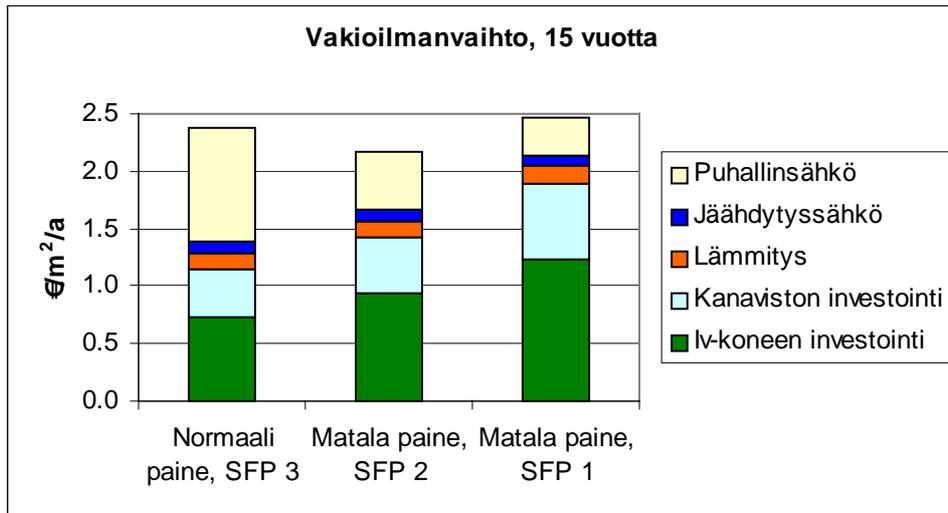
	15 vuotta	30 vuotta
Normaaliratkaisu SFP 3	vertailutaso	vertailutaso
Matalapaineratkaisu SFP 2	– 8,6 %	– 19,1 %
Matalapaineratkaisu SFP 1	+ 4,1 %	– 15,8 %

Tarpeenmukainen ilmanvaihto on jo itsessään energiataloudellinen ratkaisu, jolloin matalapaineratkaisujen vaikutus elinkaarikustannuksiin on pienempi. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla normaaliratkaisu oli edullisin 15 vuoden laskenta-ajalla ja matalapaineratkaisu SFP 2 oli edullisin 30 vuoden laskenta-ajalla:

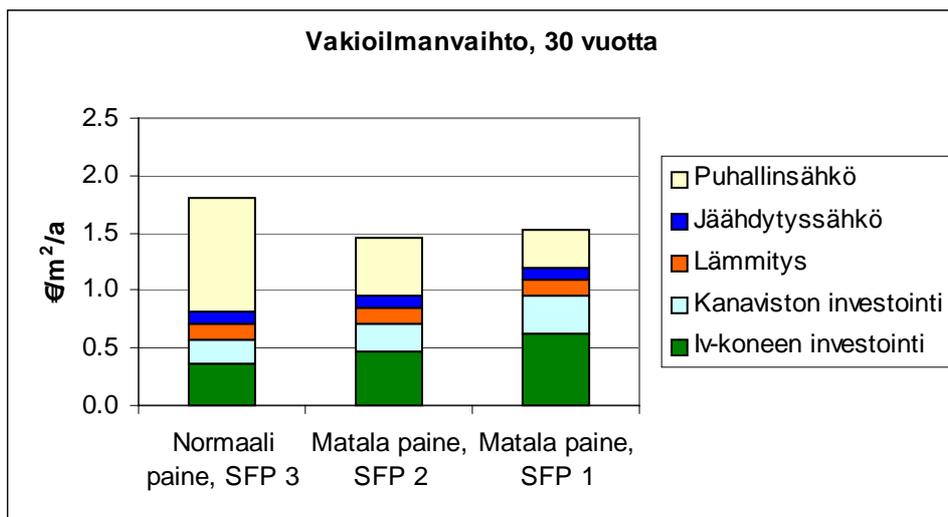
Taulukko 16. Elinkaarikustannukset verrattuna normaaliratkaisuun tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.

	15 vuotta	30 vuotta
Normaaliratkaisu SFP 3	vertailutaso	vertailutaso
Matalapaineratkaisu SFP 2	+ 1,5 %	– 9,6 %
Matalapaineratkaisu SFP 1	+ 24,2 %	+ 3,8 %

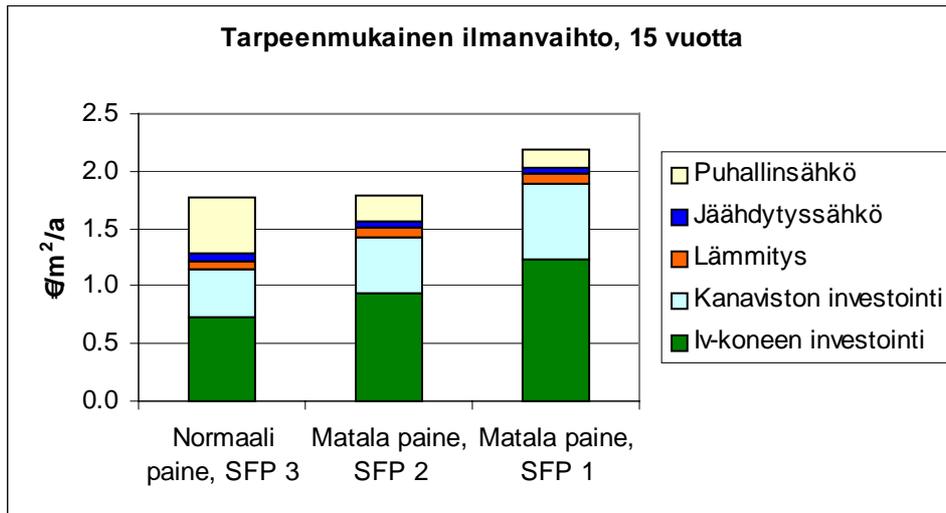
Tarkemmat tulokset on esitetty taulukoissa 17 ja 18 sekä kuvissa 99–102.



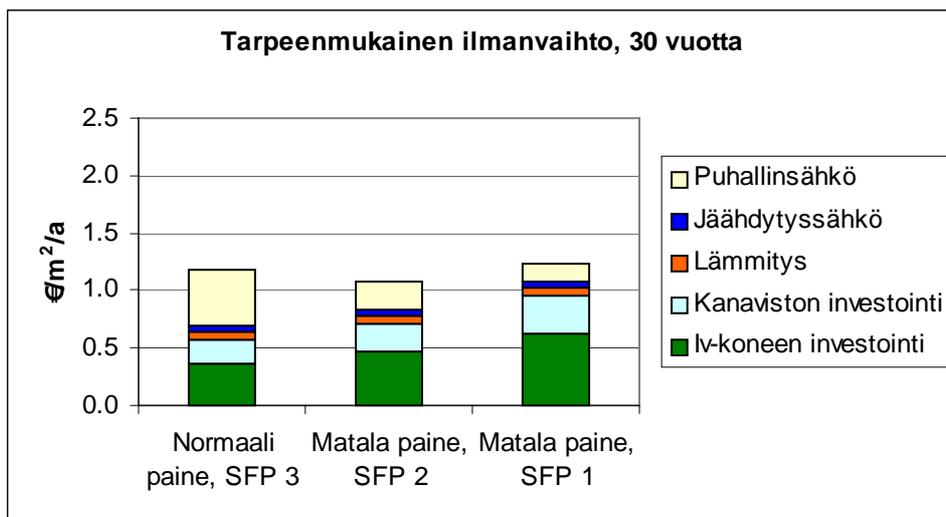
Kuva 99. Vakioilmanvaihdon kustannukset vuotta ja lattianeliömetriä kohti 15 vuoden tarkasteluvälillä. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.



Kuva 100. Vakioilmanvaihdon kustannukset vuotta ja lattianeliömetriä kohti 30 vuoden tarkasteluvälillä. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.



Kuva 101. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon kustannukset vuotta ja lattianeliömetriä kohti 15 vuoden tarkasteluvälillä. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.



Kuva 102. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon kustannukset vuotta ja lattianeliömetriä kohti 30 vuoden tarkasteluvälillä. Elinkaarikustannuksiin on huomioitu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.

Taulukko 17. Vertailtavien ratkaisujen (vakio ilmanvaihto) elinkaarikustannukset. Elin-
kaarikustannuksiin on otettu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauksissa on eroa.

Elinkaarikustannus [€/15a] Vakio	Järjestelmä		
	Normaali paine SFP 3	Matalapaine SFP 2	Matalapaine SFP 1
Investointikustannukset			
* ilmanvaihtokone	23 710	30 950	40 700
* ilmanvaihtokanavisto	13 620	15 640	21 530
Energiakustannukset			
* lämmitysenergia	4 790	4 830	4 830
* jäähdytyssähkö	3 420	3 310	3 190
* puhallinsähkö	32 250	16 410	10 720
Yhteensä	77 790	71 140	80 970
Elinkaarikustannus [€/30a] Vakio	Järjestelmä		
	Normaali paine SFP 3	Matalapaine SFP 2	Matalapaine SFP 1
Investointikustannukset			
* ilmanvaihtokone	23 710	30 950	40 700
* ilmanvaihtokanavisto	13 620	15 640	21 530
Energiakustannukset			
* lämmitysenergia	9 630	9 710	9 710
* jäähdytyssähkö	6 870	6 640	6 420
* puhallinsähkö	64 770	32 960	21 530
Yhteensä	118 600	95 900	99 890

Taulukko 18. Vertailtavien ratkaisujen (tarpeenmukainen ilmanvaihto) elinkaarikustan-
nukset. Elinkaarikustannuksiin on otettu vain kustannusosuudet, joissa vertailutapauk-
sissa on eroa.

Elinkaarikustannus [€/15a] Tarpeenmukainen	Järjestelmä		
	Normaali paine SFP 3	Matalapaine SFP 2	Matalapaine SFP 1
Investointikustannukset			
* ilmanvaihtokone	23 710	30 950	40 700
* ilmanvaihtokanavisto	13 620	15 640	21 530
Energiakustannukset			
* lämmitysenergia	2 690	2 740	2 740
* jäähdytyssähkö	1 940	1 940	1 940
* puhallinsähkö	15 900	7 480	4 940
Yhteensä	57 860	58 750	71 850
Elinkaarikustannus [€/30a] Tarpeenmukainen	Järjestelmä		
	Normaali paine SFP 3	Matalapaine SFP 2	Matalapaine SFP 1
Investointikustannukset			
* ilmanvaihtokone	23 710	30 950	40 700
* ilmanvaihtokanavisto	13 620	15 640	21 530
Energiakustannukset			
* lämmitysenergia	5 410	5 500	5 500
* jäähdytyssähkö	3 900	3 900	3 900
* puhallinsähkö	31 930	15 020	9 920
Yhteensä	78 570	71 010	81 550

10.5 Johtopäätökset

Elinkaarivertailun perusteella voidaan sanoa, että elinkaarikustannukset ovat pienimmät nykyistä käytäntöä hieman matalammilla painetasoilla (SFP-luokassa 2). Todella matalilla painetasoilla (SFP-luokassa 1) elinkaarikustannukset ovat nykyistä käytäntöä pienemmät siinä tapauksessa, että ilmanvaihdon käyntiaika on pitkä, jolloin energiakustannusten osuus nousee ja siitä saatava säästö kasvaa.

Suunnittelussa kannattaisikin siirtyä väljempään mitoitukseen. Väljempi mitoitus saattaa kuitenkin vaatia enemmän tilaa konehuoneessa, kuiluissa ja alakatossa, mistä aiheutuvat kustannusvaikutukset tulee huomioida projektikohtaisissa vertailuissa. Väljempi mitoitus vaikuttaa positiivisesti rakennuksen muuntojoustoon, jolloin mahdollisten laajennusten toteutus helpottuu.

11. Yhteenveto

Monet suomalaisista rakennus- ja ilmanvaihtoalan vaikuttajista pitivät haastattelussa hybridi-ilmanvaihtoa tervetulleena vaihtoehtona vakiintuneelle koneelliselle ilmanvaihdolle. Hybridi-ilmanvaihtoon liitettiin käyttäjän kannalta positiivisia tekijöitä kuten luonnonvalon hyödyntäminen, mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihtoon sekä luonnonmukaiseksi koettava meluton ympäristö. Haastattelun mukaan järjestelmän laajaan käyttöön ottoon tarvitaan toimivia demonstraatorakennuksia sekä avainkomponenttien kuten ilman sisäänoton laitteiden tuotekehitystä.

Keski-Euroopassa ja muissa Pohjoismaissa ollaan Suomea pidemmällä luonnonvoimien hyväksi käytössä ilmanvaihdossa. Ruotsalaiset ja norjalaiset koulut sekä tanskalaiset toimistorakennukset ovat olleet edelläkävijöitä. Niistä sekä suomalaisista kouluista saatavat seurantalulokset tulevat osaltaan näyttämään, mihin suuntaan hybridi-ilmanvaihtoa on Suomessakin syytä kehittää.

Tässä projektissa on kehitetty hybridi-ilmanvaihdon malliratkaisuja mukana olevien yritysten ja suunnittelijoiden kanssa. Syntyneet kolme ilmanvaihtokonseptia perustuvat matalapaineiseen koneelliseen ilmanvaihtoon ja tarpeen mukaan muuttuviin ilmavirtoihin ja pääosin koneelliseen jäähdytykseen.

Kehitetty konsepti 1 on periaatteessa koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, johon on liitetty koneellinen jäähdytys, tuloilman esilämmitys sekä ilmavirran ohjaus tarpeen mukaan. Konseptin 1 energiakustannukset ovat pienemmät kuin poistoilman lämmön talteenoton sisältävässä referenssitapauksissa Tämä johtuu siitä, että puhaltimien energiankulutus on pienempi ja samanaikaista lämmitystä ja jäähdytystä ei tarvita niin paljon kuin referenssitapauksissa. Toimistossa työskentelevien kannalta tämä voi johtaa siihen, että lämpöviihtyisyys on paikallisesti referenssijärjestelmää huonompi matalamman sisänpuhalluslämpötilan takia.

Mahdolliset ongelmat konseptissa 1 liittyvät ilmanjakoon, tuloilman suureen alilämpötilaan, ulkoilmavirran ja sen lämpötilan säätöön sekä koko rakennuksen painetason hallintaan. Painetason hallintaan vaikuttavat ulkovaipan ilmatiiviys sekä ovien ja ikkunoiden avaus. Konseptissa 1 tarvitaan ulkoilman sisäänottoon lämmittävä ja äänenvaimennettu tuloilmalaite, esimerkiksi raitisilmaradiaattori, joka säätää ilmavirtaa hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Konseptia 1 voidaan suositella ennen kaikkea mataliin rakennuksiin.

Konseptin 2 lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon energiakustannukset olivat simulointien pienimmät. Myös ulkoilmavirtojen herkkyys säähäiriöille on pienempi

kuin konseptissa 1. Haittapuolena konseptissa 2 on, että sen investointikustannukset kaksoisjärjestelmänä voivat olla korkeat.

Konseptin 3 elinkaaritarkastelun mukaan matalapaineinen kanavisto on lähes poikkeuksetta normaaliratkaisua edullisempi ja siten nykyinen kanavistomitoitus liian tiukka; nykyään valitaan vielä liian pieniä ilmanvaihtokoneita ja ilmanvaihtokanavia. Vakioilmavirran järjestelmässä matalapaineratkaisu on selvästi normaaliratkaisua edullisempi jo 15 vuoden laskenta-ajalla, ja kustannushyöty vain lisääntyy 30 vuoden jaksoa tarkasteltaessa. Muuttuvan ilmavirran järjestelmässä 15 vuoden jaksolla normaalijärjestelmä ja matalapaineratkaisu ovat lähes samanveroisia, mutta 30 vuoden jaksolla matalapaineratkaisu on jo 9 % edullisempi. Väljempi mitoitus vaikuttaa positiivisesti myös rakennuksen muuntojousto, jolloin mahdollisten laajennusten toteutus helpottuu. Myös kiristyvät energiamääräykset nopeuttavat siirtymistä matalapainejärjestelmiin.

Kaikissa ilmanvaihtokonsepteissa oli mukana koneellinen jäähdytys. Jäähdytys ulkoilmalla yöaikana joko painovoimaisesti tai koneellisesti voisi olla myös mahdollista. Tällä tavalla voitaisiin säästää jäähdytysenergiaa.

Konseptia 3 on sovellettu ilman jäähdytysominaisuutta Poikkilaakson koulurakennukseen, joka valmistui kesällä 2001. Tässä raportissa esitetään laskentatulokset päiväkotija kouluhuoneiden lämpötiloista, hiilidioksidipitoisuuksista ja suhteellisesta kosteudesta sekä ilmanvaihdon energiankulutuksesta. Laskelmien mukaan matalapaineinen ilmamääräsäätöinen ilmanvaihtojärjestelmä takaa hyvän sisäilmaston ja on energiatehokas. Ilmanvaihdon lämmitysenergiantarve on alle 60 % vertailujärjestelmään verrattuna. Puhallinenergia on vain 23 % – 45 % vertailujärjestelmän puhallinenergiakulutuksesta riippuen vertailujärjestelmän painetasosta. Järjestelmän toimintaa tullaan seuraamaan ja mittaamaan.

Lähdeluettelo

1. Kukadia, V. & Perera, E. 1998. NatVent: Aims and Vision. 19th Annual AIVC Conference, Oslo, Norway, 28–30 September 1998, s. 398–406.
2. LVI 05-10318 Sisäilmastoluokitus 2000. Rakennustietosäätiö, 2001.
3. Ripatti, H. 2001. Luonnollinen ilmanvaihto – Natural Ventilation. Eurooppalaiset luonnollisen ilmanvaihdon konseptit. Climaconsult Finland, 29 s.
4. Heiselberg, P. (editor). 2002. Principles of Hybrid Ventilation. Kirjaan liittyy myös CD-ROM IEA Annex-35-projektista. Projektin kotisivu on: <http://hybvent.civil.auc.dk/>.
5. IEA Annex 35, 6th Expert Meeting Minutes, Den Haag, The Netherlands, May 14–17, 2001.
6. Venelampi, M., Kurnitski, J., Enberg, S. & Seppänen, O. 1998. Passiivinen ilmanvaihto koulurakennuksessa. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. LVI-tekniikan laboratorio, B54, Espoo 1998.
7. Tjelflaat, P. O. 2000. Hybrid ventilation at Mediå school, Grong. IEA Annex 35, 4th Expert Meeting, Athens, Greece, April 11–14, 2000.
8. ProPaulig. Delfiini, uuden vuosituhatosen työympäristö. Esite. Helsinki 1998.
9. Aggerholm, S. 1998. Perceived barriers to natural ventilation design of office buildings. 19th Annual AIVC Conference, Oslo, Norway, 28–30 September 1998, s. 398–406.
10. Wouters, P., Hejmans, N., Delmotte, C. & Vandale, L. 1999. Classification of Hybrid Ventilation Concepts. Technical paper presented at the First International One day Forum on Natural and Hybrid ventilation, HybVent Forum'99, 09/1999, Sydney, Australia.
11. Heikkinen, J., Kovanen, K., Ojanen, T., Pallari, M-L. Piira, K. & Siitonen, V. 1993. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet. VTT Tiedotteita 1468. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus 1993.
12. Friden, R. 2001. Självdrag i Ludvika – ett misslyckat experiment med skattebetalarnas pengar. Energi & Miljö 6–7/2000, s. 49–52.

13. Vuolle, M. & Heinonen, J. 2000. Hybrid ventilation simulations in IDA modular simulation environment. Proceedings of Healthy Buildings 2000, August 6–10, Espoo, Finland, Vol. 2, s. 481–486.
15. Heinonen, J. & Kosonen, R. 2000. Hybrid ventilation concepts in commercial buildings – Indoor air quality and Energy Economy Perspective 6 p. Proceedings of Healthy Buildings 2000, August 6–10, Espoo, Finland, Vol. 2, s. 517–522.
16. Delsante, A. & Vik, T.-A. 2000. State-of-the-art Review of Hybrid Ventilation. IEA Annex 35 Report. Raportti on lähteen [4] CD:llä.
19. DuBois, D. & DuBois, E., 1915. A Formula to Estimate the Approximate Surface Area if Height and Weight be Known. Arch. Intern. Med., 17, s. 863–871.
20. LVIS-2000 Tyyppirakennukset. VTT, LVI-tekniikan laboratorio, raportti 17, Espoo 1992. 51 s.
21. Schild, P. An Overview of Norwegian Buildings with Hybrid Ventilation. In Cauberg, H., Aa Ad van der, Gids, W. de. 2001. Hybrid ventilation – An Intergral Solution for Ventilation, Health and Energy. TU-Delft, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, s. 49–68. Katso myös <http://www.byggforsk.no/hybvent/>
22. Allen, C. 1981. Airgloss: Air infiltration glossary. Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note AIC 5. Bracknell Berkshire, Great Britain.
23. Herrlin, J. K. 1985. A Static-Multicell-Airflow-Model. ASHRAE Transactions 1985, V. 91.



Tekijä(t) Heikkinen, Jorma, Heinonen, Jarkko, Vuolle, Mika, Laine, Tuomas & Liljeström, Kimmo			
Nimeke Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto			
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa kehitettiin toimisto- ja koulurakennusten hybridi-ilmanvaihtojärjestelmiä, jotka toteuttavat korkeat suomalaiset sisäilmasto- ja energiavaatimukset. Raportti antaa ensin yleiskuvan hybridi-ilmanvaihdosta, esittelee kehitetyt ilmanvaihtokonseptit sekä niiden toimintalaskelmien tulokset. Järjestelmien toimivuus käytännössä selviää myöhemmin koerakennusten myötä.</p> <p>Hybridi-ilmanvaihdossa koneellisen ja painovoimaisen ilmanvaihdon tekniikka yhdistyvät eri tavoin. Tyypillinen esimerkki on apupuhaltimen käyttö painovoimaisessa ilmanvaihdossa lämpimänä vuodenaikana. Nimitys hybridi-ilmanvaihto on otettu käyttöön kansainvälisessä projektissa, johon myös tämä tutkimus kuuluu. Haastatellut rakentamisen asiantuntijat pitivät hybridi-ilmanvaihtoa tervetulleena vaihtoehtona vakiintuneelle koneelliselle ilmanvaihdolle. Hybridi-ilmanvaihtoon liitettiin käyttäjän kannalta positiivisia tekijöitä kuten mahdollisuus vaikuttaa ilmanvaihtoon sekä luonnonmukaiseksi koettava meluton ympäristö.</p> <p>Hybridi-ilmanvaihdon malliratkaisuja kehitettiin mukana olevien yritysten ja suunnittelijoiden kanssa. Syntyneet kolme ilmanvaihtokonseptia perustuvat matalapaineiseen koneelliseen ilmanvaihtoon ja tarpeen mukaan muuttuviin ilmavirtoihin ja pääosin koneelliseen jäähdytykseen.</p> <p>Poistoilmanvaihtoon perustuva hybridijärjestelmä on simulointien mukaan energiakustannuksiltaan vertailujärjestelmää edullisempi pienen puhallinenergian kulutuksen ansiosta. Vertailujärjestelmänä oli poistoilman lämmön talteenotolla varustettu tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Hybridijärjestelmään tarvitaan lämmittävä huonekohtainen tuloilmalaite, joka säätelee ilmavirtaa hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Poistoilman lämmön talteenoton sisältävä toinen hybridijärjestelmä on energiakustannuksiltaan vieläkin edullisempi, mutta vaatii suuremmat investoinnit. Kanaviston elinkaaritarkastelun mukaan matalapaineinen kanavisto on normaalipaineista edullisempi, ja siten nykyään valitaan liian pieniä ilmanvaihtokoneita ja ilmanvaihtokanavia. Koulurakennuksen matalapaineinen ilmamääräsäätöinen ilmanvaihto takaa laskelmien mukaan hyvän sisäilmaston ja on energiatehokas. Ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus oli alle 60 % ja puhallinenergian kulutus oli alle 45 % vertailujärjestelmän kulutuksesta.</p>			
Avainsanat ventilation, hybrid ventilation, office buildings, simulation, indoor air, air quality, energy consumption, school buildings, indoor climate, costs, economic analyses			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6109-0 (nid.) 951-38-6110-4 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R1SU00861	
Julkaisu-aika Joulukuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 113 s.	Hinta C
Projektin nimi HYB-IV3		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Fläkt Woods Oy, Halton Oy, Insinööritoimisto Olof Granlund Oy, Rettig Lämpö Oy, Helsingin kaupungin rakennusvirasto (HKR), VTT	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2179
VTT-TIED-2179

Author(s) Heikkinen, Jorma, Heinonen, Jarkko, Vuolle, Mika, Laine, Tuomas & Liljeström, Kimmo			
Title Hybrid ventilation of office buildings			
Abstract <p>The report summarises the Finnish hybrid ventilation development performed in the international project "IEA Annex 35, Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings". An overview of hybrid ventilation in office and school buildings in Nordic countries is given in the first part of the report. An interview survey carried out among Finnish designers and decision-makers shows that an increase of using natural forces in ventilation is expected. Three ventilation concepts for office buildings have been created to provide an alternative for the mechanical ventilation system with air-to-air heat recovery. The concepts are based on a low-pressure mechanical system and demand control of ventilation airflows. These concepts are relatively conservative because the role of the natural driving forces is small and the mechanical cooling is mostly used. This is a conscious choice, which is based on the Finnish climate and the strict requirements for indoor climate and energy use. The simulation results for the office and for the school building indicate that the ventilation rate can be controlled and energy costs reduced with the hybrid ventilation concepts. The life cycle cost comparison shows that lower pressure losses should be taken into use in the mechanical ventilation design practise.</p>			
Keywords ventilation, hybrid ventilation, office buildings, simulation, indoor air, air quality, energy consumption, school buildings, indoor climate, costs, economic analyses			
Activity unit VTT Building Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38- (soft back ed.) 951-38- (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R1SU00861	
Date December 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 113 p.	Price C
Name of project HYB-IV3		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes), Fläkt Woods Oy, Halton Oy, Insinööritoimisto Olof Granlund Oy, Rettig Lämpö Oy, Building Regulation Department of Helsinki (HKR), VTT	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Hybridi-ilmanvaihdossa yhdistyvät sopivalla tavalla koneellisen ja painovoimaisen ilmanvaihdon tekniikka. Tyypillinen esimerkki on apupuhallin painovoimaisessa ilmanvaihdossa lämmintä vuodenaikaa tai kuormitus-huippuja varten. Hybridi-ilmanvaihto on Pohjoismaissa yleistynyt lähinnä koulurakennuksissa. Itse nimitys hybridi-ilmanvaihto on otettu käyttöön kansainvälisessä projektissa, johon myös tämä tutkimus kuului.

Tutkitut toimistorakennuksen ilmanvaihtokonseptit perustuvat matalapaineiseen koneelliseen ilmanvaihtoon ja tarpeen mukaan muuttuviin ilmavirtoihin. Simulointilaskelmien mukaan hybridi-ilmanvaihto voi olla energiakustannuksiltaan edullisempi kuin tavanomainen ilmanvaihto. Järjestelmien toimivuus käytännössä selviää kuitenkin vasta koerakennusten myötä.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374