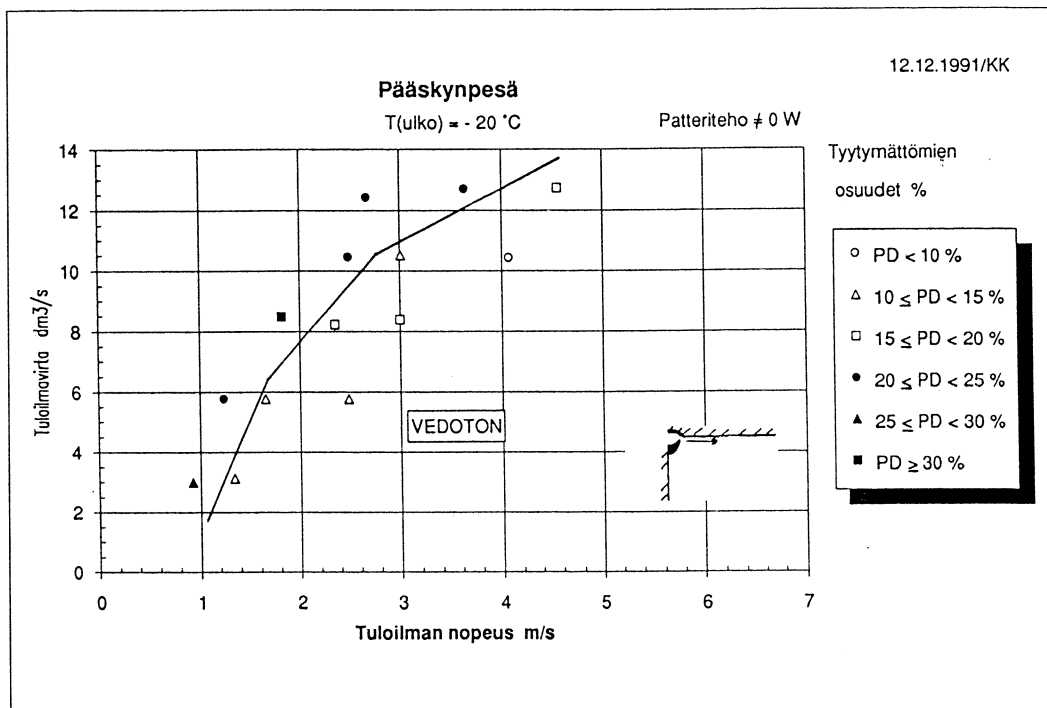


Jorma Heikkinen, Keijo Kovanen, Tuomo Ojanen,
Marja-Liisa Pallari, Kalevi Piira & Veijo Siitonen

Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet



Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet

Jorma Heikkinen, Keijo Kovanen, Tuomo Ojanen,
Marja-Liisa Pallari, Kalevi Piira & Veijo Siitonen

LVI-tekniikan laboratorio



ISBN 951-38-4362-9
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1993

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 42, 02151 ESPOO
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374, teleksi 125175 vttin sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 42, 02151 ESBO
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374, telex 125175 vttin sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374, telex 125175 vttin sf

VTT, LVI-tekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 3, PL 206, 02151 ESPOO
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 455 2408

VTT, VVS-tekniska laboratoriet, Värmemansgränden 3, PB 206, 02151 ESBO
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 455 2408

VTT, Laboratory of Heating and Ventilation, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 206, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 455 2408

Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet [Development of draughtless outdoor air inlets]. Espoo 1993, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1468. 104 s.

UDK 697.92:697.97:628.86
621.646.2

Avainsanat residential buildings, rooms, air intakes, ducts, draught, product development, air heaters, indoor air, exhaust diffusers, exhaust systems, ventilation, design, temperature, calculations, utilization, tests, structures, seasons

TIIVISTELMÄ

Koneellisella poistolla toimivissa ilmanvaihtojärjestelmissä korvausilman otto asuinhuoneisiin ulkoseinään asennettujen venttiilien kautta on yleisesti aiheuttanut vetoisuutta. Tässä tutkimuksessa etsittiin ulkoilmaventtiilien tuotekehitykseen tähtäviä keinoja vedon välttämiseksi.

Työhypoteesina oli periaate, että kylmä tuloilma on ensin saatava lämpenemään huoneen yläosassa ennen sen tuloa oleskelualueelle. Tämän periaatteen toimivuutta testattiin ensin laskelmin suihkuteorian ja huonevirtausten laskentamallin perusteella ja sitten mittauksin koehuoneessa. Tutkimuksessa parannettiin kattopintaan kiinnittyvien suihkujen teoriaa, jolla voidaan määrittää hyvän tuloilmaelimen ominaisuudet. Tutkittavana oli ikkunan päältä ylöspäin puhaltava rako, katon rajasta säteittäin vaakasuuntaan puhaltava rakosuutin ja seinältä säteittäisesti yläviistoon puhaltava monireikäinen suutin.

Vedottomuuskokeet tehtiin 0 °C:n ja -20 °C:n ulkolämpötiloissa, jotka olivat myös tuloilman lämpötiloja. Ensin mainitussa tapauksessa ikkunan alla olevan konvektiivisen lämmityspatterin teho oli nolla ja jälkimmäisessä se asetettiin tuloilmavirran lämmönkulutuksen suuruiseksi. Sisälämpötila pidettiin vakiona 21 °C:ssa hajautetun lattia- tai seinälämmityksen avulla. Oleskelualueen vedottomuus arvioitiin turbulenssin huomioon ottavalla Fangerin vetoyhtälöllä ja Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 vetokäyrästä.

Koetulokset osoittavat, että edullisesti sijoitetuilla ja suunnatuilla tuloilmaelimillä voidaan molemmissa ulkolämpötiloissa johtaa ilmaa huoneeseen ainakin $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, kun vetokriteerinä pidetään vetoyhtälöllä laskettua tyytymättömien osuutta 20 % tai vetokäyrästä käyvä 2. Tällöin tuloilmasuihkun nopeuden tulee olla vähintään 2 - 3 m/s. Tämä voidaan myös käytännössä saavuttaa sisäänpuhallusaukkojen ja muiden virtausteiden oikealla muotoilulla, ulko- ja sisäilman välisen paine-eron ollessa noin 10 Pa.

Ilman esilämmityskeinoina tarkasteltiin kirjallisuuden perusteella tuloilmaikkunan käyttömahdollisuutta ja laskelmin ulkoilman johtamista sisään seinän tai katon eristysrakenteen kautta. Molemmat keinot ovat periaatteessa toimivia ja jopa energiaa säästäviä, mutta käytännössä niiden yhteydessä tarvittavalle ilmavirran säädölle ja takaisinvirtauksen estolle ei ole vielä tyydyttävää ratkaisua.

Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet [Development of draughtless outdoor air inlets]. Espoo 1993, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1468. 104 p.

UDC 697.92:697.97:628.86
621.646.2

Keywords residential buildings, rooms, air intakes, ducts, draught, product development, air heaters, indoor air, exhaust diffusers, exhaust systems, ventilation, design, temperature, calculations, utilization, tests, structures, seasons

ABSTRACT

The fresh air inlets installed in bedrooms and living rooms commonly cause complaints about draught in residential buildings with exhaust ventilation systems. The aim of this study was to find draughtless solutions for the product development of outdoor air inlets.

The working hypothesis was the idea that cold inlet air must first be heated in the upper part of the room space before it is distributed into the occupied zone. The applicability of this principle was first tested by doing calculations with a jet penetration method and a Computational Fluid Dynamics method and then by means of measurements in the test rooms. The theory of ceiling jets was improved to specify the favourable properties of the air diffuser. The inlet designs to be tested were a slot diffuser located above the window and directed towards the ceiling, a radial diffuser located and a multinozzle radial diffuser, both installed below the ceiling.

The draught tests were performed at outdoor temperatures of 0 °C and -20 °C, which also were the supply air temperatures, respectively. At 0 °C the convective heater below the window was off and at -20 °C its heating power was equal to the supply air heat loss. The room temperature was kept constant at 21 °C by distributed floor or wall heating. The draught risk was evaluated by Fanger's equation taking into account the turbulence intensity, and by draught curves presented in the National Building Code of Finland, Section D2.

The results show that by using well placed and directed air inlets it is possible to bring at least 8 dm³/s of outdoor air draughtlessly into the room, adhering to the draught limit defined as 20 % of dissatisfied occupants or as draught curve 2. In this case a minimum inlet velocity of 2 - 3 m/s should be used. This can be achieved in practice through good design of the inlet openings and other parts of the flow path if the pressure difference between the outdoor and indoor air is about 10 Pa.

The ideas behind the preheating of intake air by channelling it via the so-called supply air window or through insulated constructions were studied based on the literature and calculations, respectively. In principle, both systems appear to be usable and also energy-saving, but in practice the solutions required for controlling the flow rate and preventing back flow have so far not been presented.

ESIPUHE

Tämän tutkimuksen käynnisti havainto, että markkinoilla ei ollut ulkoilmaventtiilejä, joilla asuinhuoneisiin saataisiin määräysten mukaiset ulkoilmavirrat vedottomasti koneellisella poistolla toimivassa järjestelmässä. Oli tarpeen antaa alkusysäys ja perusteet parempien venttiilien kehittämiseksi.

Tutkimus tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) LVI-tekniikan laboratoriossa. Sen rahoittivat Teknologian tutkimuskeskus (TEKES) ja kuusi ulkoilmaventtiilien kehittämisestä kiinnostunutta yritystä. Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat rahoittajien edustajina ja työn valvojina diplomi-insinööri Sakari Oksa Paloheimo Oy:stä, diplomi-insinööri Isto Rantanen Ercel Oy:stä, insinööri Timo Saarikko Multitek Oy:stä, diplomi-insinööri Heikki Stenberg Lapinleimu Oy:stä, arkkitehti Markku Tarkiainen Ilmark Oy:stä, valtiotieteiden kandidaatti Jarmo Vesanen Ekovilla Oy:stä ja erikoistutkija Esko Virtanen TEKESistä. Lisäksi johtoryhmään oli kutsuttu ylitarkastaja Pekka Kalliomäki ympäristöministeriöstä.

VTT:n LVI-tekniikan laboratoriossa projektipäällikkönä ja tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi diplomi-insinööri Veijo Siitonen. Alilämpöisen tuloilman käyttäytymistä koskevat teoreettiset tarkastelut suoritti diplomi-insinööri Jorma Heikkinen ja näihin liittyvät tietokonelaskelmat diplomi-insinööri Kalevi Piira. Vedottomuuskokeista vastasi filosofian kandidaatti Keijo Kovanen avustajinaan teknikot Jarmo Laamanen ja Antti Mäkelä. Laskelmat rakenteiden toiminnasta tuloilman esilämmittimenä teki diplomi-insinööri Tuomo Ojanen. Lähdeaineiston tuloilmaikkunaa koskevaan tarkasteluun keräsi diplomi-insinööri Marja-Liisa Pallari.

Tutkimuksen tuloksia on esitelty johtoryhmälle jo työn aikana väliraporteissa. Tämän julkaisun tarkoituksena on tuoda projektin lopputulokset suosituksineen laajempaan käyttöön, palvelemaan ulkoilmaventtiilien tuotekehitystä.

Espoo, marraskuu 1992

Veijo Siitonen

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ESIPUHE	7
1 JOHDANTO	11
2 ALILÄMPÖISEN TULOILMAN KÄYTTÄYTYMINEN	12
2.1 Suihkuteoria	12
2.1.1 Johdanto	12
2.1.2 Suurin mahdollinen jäähdysteho	13
2.1.3 Suihkun irtoaminen katosta	15
2.1.4 Irtoavan kattosuihkun nopeus ja lämpötila	20
2.1.5 Tuloilmalaitteen sekoitusominaisuudet	21
2.1.6 Esimerkkejä kattosuihkun irtoamisesta	22
2.1.7 Pintalämmönsiirron vaikutus kattosuihkun irtoamiseen	25
2.1.8 Nostesuihkut	26
2.2 Säteissuihkun mittaukset	28
2.2.1 Suihkun nopeuden alenema	29
2.2.2 Suihkun irtoaminen katosta	31
2.2.3 Patterivirtauksen ja tuloilmasuihkun vuorovaikutus	32
2.2.4 Päätelmät suihkumittauksista	36
2.3 Huonevirtauskentän laskenta	36
2.3.1 Laskentaperiaate	36
2.3.2 Vedottomuuslaskelmat	38
Lähdeluettelo	41
3 VEDOTTOMUUSKOKEET	42
3.1 Johdanto	42
3.2 Koehuoneet ja mittalaitteet	42
3.2.1 Koehuone I	42
3.2.2 Koehuone II	47

3.3	Vetokriteerit	51
3.4	Mittaukset	53
3.5	Tulokset	54
3.5.1	Rakolista	55
3.5.1.1	Talvitilanne	55
3.5.1.2	Kevättilanne	56
3.5.1.3	Patterilämmityksen vaikutus	57
3.5.2	Säteispuhallus katonrajasta	58
3.5.2.1	Talvitilanne	58
3.5.2.2	Kevättilanne	61
3.5.2.3	Patterilämmityksen vaikutus	64
3.5.3	Suutinpuhallus seinältä	65
3.5.3.1	Talvitilanne	65
3.5.3.2	Kevättilanne	69
3.6	Tulosten tarkastelu D2:n vetokäyrien mukaan	70
3.7	Kehittämisenäkökohtia	75
	Lähdeluettelo	76
4	TULOILMAIKKUNA ILMAN ESILÄMMITTIMENÄ	77
4.1	Toimintaperiaate	77
4.2	Koetuloksia	78
4.3	Käyttömahdollisuuksien arviointi	82
	Lähdeluettelo	86
5	KORVAUSILMAN SISÄÄNOTTO ERISTYSRAKENTEEN LÄPI	87
5.1	Toimintaperiaate	87
5.2	Numeeriset simulointimallit	87
5.3	Lämmön talteenotto ja lämpötilat tasan jakautuneessa läpivirtauksessa	88
5.4	Korvausilman sisäänotto kattoelementin kautta	90
5.5	Korvausilman sisäänotto betoniseinän kautta	94
5.6	Kosteusriskit ilman ulosvirtauksessa	96
5.7	Yhteenvedo laskennallisesta tarkastelusta	98

Lähdeluettelo	99
6 YHTEENVETO	101
6.1 Kylmän ilman sisäänpuhalluksen periaatteet	101
6.2 Huoneen lämmityslaitteiden hyväksikäyttö	102
6.3 Tuloilmaelimen ominaisuudet	103

1 JOHDANTO

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa korvausilma johdetaan sisään pääasiassa ikkunan rakojen tai ulkoseinään asennetun venttiilin kautta. Tuloilman aiheuttama veto on tällöin ollut yleinen ongelma. Tavallisin syy vetoisuuteen näyttää olevan kylmän ilmapirran suuntautuminen suoraan huoneen oleskelualueelle tai putoaminen lattialle heti venttiilin jälkeen.

Tässä tutkimuksessa etsitään keinoja, joilla tuloilma saataisiin lämpenemään ja hidastumaan riittävästi jo oleskelualueen ulkopuolella, niin että varsinaisella oleskelualueella ei esiintyisi liian suuria nopeuksia tai alhaisia lämpötiloja.

Ilmaa voidaan esilämmittää ennen sisäänpuhallusta johtamalla se esim. ikkunan lasivälin tai muun rakenteen kautta. Sisäänpuhalluksen jälkeen mahdollisia lämmönluovuttajia ovat huoneilma ja rakenteiden sisäpinnat oleskelualueen ulkopuolella. Näiden tavoittamiseksi tuloilma kannattaa suunnata pitkin seinä- ja kattopintoja huoneen yläosaan, jossa on yleensä lämpimin ilmassa. Suuri lähtönopeus luonnollisesti auttaa tuloilmasuihkun sekoittumista ja pysymistä ohjaavan pinnan lähellä. Sen vuoksi mahdollisimman suuri osa koneellisella poistolla saavutetusta ulko- ja sisäilman välisestä paine-erosta käytetään tuloilmasuihkun vauhdittamiseen.

Näiden periaatteiden soveltumista tavallisen asuinhuoneen korvausilman ottoon tutkitaan teorettisesti, kokeellisesti ja lähdeaineiston perusteella. Tavoitteena on löytää perusratkaisuja, joilla huoneeseen saataisiin vedottomasti ulkoilmaa vähintään kahden henkilön tarve eli $8 \text{ dm}^3/\text{s}$. Toissijaisesti pyritään selvittämään tuloilman esilämmityksen tarve vedon välttämiseksi. Ikkunoiden ja eristysrakenteiden käyttöä ilman esilämmittiminä tarkastellaan lähdetietojen ja laskelmien pohjalta.

2 ALILÄMPÖISEN TULOILMAN KÄYTTÄYTYMINEN

2.1 SUIHKUTEORIA

2.1.1 Johdanto

Ilmasuihkujen teoriaa käytetään laajalti ilmanjakotekniikassa. Suihkuteorian avulla voidaan valita oikeat ilmanjakolaitteet sekoitustyyppiseen ilmanjakoon käyttämällä tärkeimpiä ilmanjakolaitteen tuotetietoja, esimerkiksi tuloilma-aukon tehollista pinta-alaa.

Suihkujen perustapaukset ovat akselisymmetrinen suihku, tasosuihku ja radiaalisuihku. Suihkut voivat olla vapaita tai rajoittua seinämiin, jolloin puhutaan seinämäsuihkuista. Perussuihkujen teoria hallitaan hyvin seuraavilla edellytyksillä:

- ilmanjakolaitteen suihku on luokiteltavissa joksikin perussuihkuksi
- suihkussa on ns. samanmuotoisuusvyöhyke (vyöhyke 3 standardissa ISO 5219 /7/) ja tarkastelussa keskitytään siihen
- ei-isotermisessä suihkussa on tietty puhallussuunta:
 - aksiaali- ja tasosuihkussa hallitaan puhallus suoraan ylöspäin tai suoraan alaspäin ja jossain määrin myös vaakasuora puhallus
 - radiaalisuihkussa vain vaakasuora puhallus esim. katosta

Suihkuteoria ei perusmuodossaan voi ottaa huoneen kokoa, kalustusta ja lämmönlähteitä huomioon. Sen sijaan puoliempiirisiä menetelmiä edellä mainittujen seikkojen huomioon ottamiseksi on käytössä. Suihkuteoria on osa ns. rajakerrosteoriata, jonka soveltaminen on mahdollista, kun suihku on pitkä, kapea ja suhteellisen suora. Nämä edellytykset eivät aina päde tuloilmasuihkuissa, esimerkiksi syrjäytysilmanvaihtolaitteiden suihkuja ei voida käsitellä hyvin rajakerrosteorialla.

Seuraavassa keskitytään lähinnä kattopintaan kiinnittyviin suihkuihin ja niiden irtoamiseen katosta. Periaatteena on saada kylmä ulkoilma sekoittumaan huoneilmaan oleskeluvyöhykkeen ulkopuolella. Samaa teoriaa voidaan osittain soveltaa myös seinäpintoihin kiinnittyviin suihkuihin.

2.1.2 Suurin mahdollinen jäähdytysteho

Kylmän ulkoilman sisäänotto vastaa ilmastoinnin jäähdytystä, jossa ilmanjaon suunnittelun lähtökohtana on jäähdytysteho lattiapinta-alaa kohti (W/m^2). Taulukossa 1 on erään laitevalmistajan suosittelemia ratkaisuja eri jäähdytystehoille.

Taulukko 1. Jäähdytysteho erilaisilla ilmanjakotavoilla, kun suurin sallittu nopeus oleskeluvyöhykkeellä on 0,15 - 0,20 m/s [2].

ILMANJAKOTAPA	JÄÄHDYTYSTEHO, W/m^2							
	0	20	40	60	80	100	120	140
Radiaalipuhallus katosta								
Aksiaali- tai tasopuhallus ikkunaseinältä								
Aksiaali- tai tasopuhallus käytäväseinältä								
Aksiaalipuhallus ikkunapenkistä								
Tasopuhallus ikkunapenkistä								
Syrjäyttävä ilmanjako								

— = Normaalitapaus □ = Vaatii tarkan mitoituksen ■ = Vaikeasti toteutettava

Kylmän ulkoilman sisäänpuhalluksessa asuinhuoneisiin jäähdytysteho on suuruusluokkaa $35 W/m^2$ (ilmavirta $8 dm^3/s$, alilämpötila $41 K$, jäähdytysteho $394 W$, huoneen pinta-ala $11,5 m^2$). Taulukon 1 mukaan tälle teholle löytyy toimivia ratkaisuja, joista paras on radiaalinen puhallus katosta.

Taulukon 1 alkuosa perustuu E. Skåretin [10, 2] johtamiin kaavoihin, joita on seuraavassa kehitetty edelleen siten, että tuloilmalaitteen konstruktiosta riippuva suihkun tehollisen origon paikka x_0 sekä lämpötilakorjaus C_t otetaan huomioon. Kaavoissa tarkastellaan samanaikaisesti jäähdytystilannetta ja isotermistä tilannetta ja oletetaan tuloilman massavirrat samoiksi kummassakin tilanteissa. Tällöin kattoon kiinnittyvän aksiaalisen suihkun suurin jäähdytysteho on

$$P_{\max} = \frac{22000}{KBC_t} Ar_{xa} v_l^3 \left(\frac{v_a}{v_l} \right)^2 \left(1 + \frac{x_0}{x_l} \right), \quad (1)$$

kattoon kiinnittyvän tasosuihkun suurin jäähdytysteho on

$$P_{\max} = \frac{13200}{x_l C_t^2} Ar_{xa} v_l^3 \left(\frac{v_a}{v_l} \right)^3, \quad (2)$$

ja kattoon kiinnittyvän radiaalisen suihkun suurin jäähdytysteho on

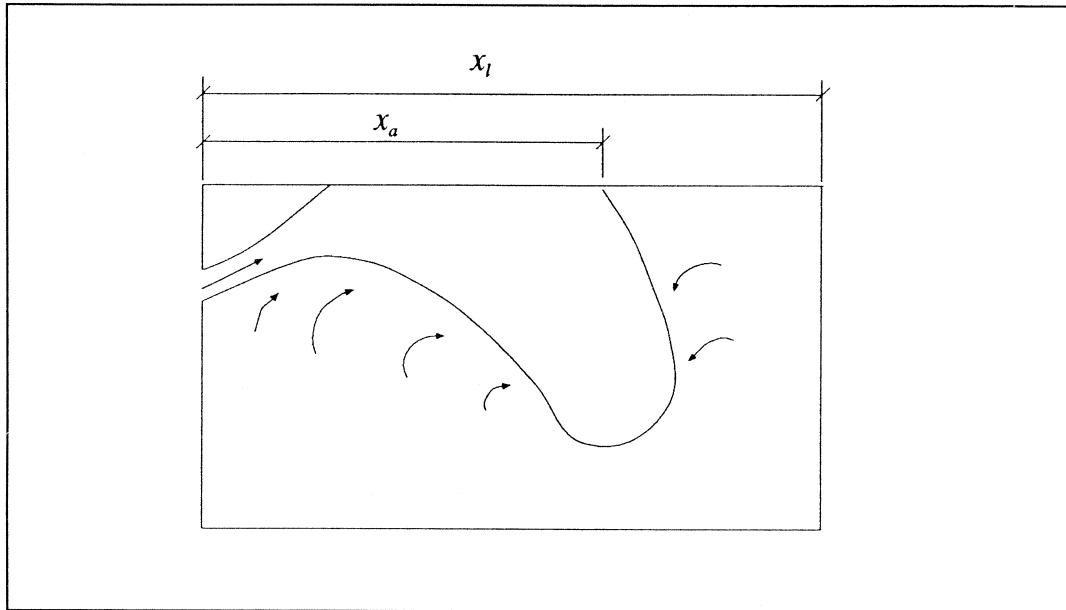
$$P_{\max} = \frac{41600}{2x_l C_t} Ar_{xa} v_l^3 \left(\frac{v_a}{v_l} \right)^2 \left(\frac{1+x_0/x_l}{1+x_0/x_a} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

jossa	P_{\max}	on	suurin jäähdytysteho [W/m ²],
	Ar_{xa}		Arkimedeen luku irtoamiskohdassa, ks. kohta 2.1.3,
	x_l		toimintapituus [m], eli etäisyys vastakkaiseen seinään (jos tuloilmalaitteita on useampia, niille voidaan kuvitella omat "huoneensa" (ks. kuva 1),
	v_l		isotermisen suihkun nopeus etäisyydellä x_l [m/s],
	x_a		etäisyys tuloilmalaitteesta suihkun irtoamiskohtaan [m],
	x_0		suihkun origon siirtymä, ks. kaavat 9 - 11 [m],
	v_a		suihkun nopeus irtoamiskohdassa x_a [m/s],
	K		aksaalisuihkun nopeuskerroin, kaava 4,
	B		huoneen leveys [m]
	C_t		tiheyskorjaus, kaava 7.

Jos nopeussuhde v_a/v_l käsitetään vakioksi, on jäähdytysteho verrannollinen isotermisen suihkun loppunopeuden v_l kolmanteen potenssiin eli nopeuden tulisi olla suuri. Isotermisen suihkun nopeus ei saa kuitenkaan aiheuttaa vetoa. Tämä varmistetaan valitsemalla nopeus v_l enintään 1,5 - 2,5 kertaa suuremmaksi kuin suurin sallittu nopeus oleskelualueella. Kerroin perustuu isotermisen tilanteen mittauksiin ja sen arvo riippuu huoneen mitoista ja suihkun tyypistä.

Kaavojen mukaan on edullista antaa suihkun irrota katosta suurella nopeudella eli nopeussuhteen v_a/v_l tulisi olla suuri. Katosta putoava suihku aiheuttaa kuitenkin vetoriskin, joka vältetään valitsemalla nopeussuhde riittävän pieneksi, jolloin irtoavan suihkun lämpötilakin on lähellä huonelämpötilaa. Kirjallisuudessa kaavat 1 - 3 esitetään muodossa, jossa suhteen v_a/v_l tilalla on suhde x_l/x_a , jolloin

vedottomuus varmistetaan valitsemalla suihkun irtoamiskohta riittävän suureksi. Skåret /10/ suosittelee irtoamisetäisyyttä $x_a/x_l > 0,5$ samoin kuin Nielsen /9/. Tätä mitoitusmenetelmää tarkastellaan vielä tarkemmin kohdassa 2.1.4, jossa annetaan kaavat irtoamiskohdan nopeudelle ja lämpötilalle sekä vaihtoehtoiset kaavat suurimmalle jäädytysteholle.



Kuva 1. Suihkun irtoamiskohdan x_a ja toimintapituuden x_l määrittely.

2.1.3 Suihkun irtoaminen katosta

Edellä olevan perusteella radiaalinen puhallus katosta näyttäisi lupaavalta myös ulkoilmaventtiileissä. Keskeinen ratkaistava ongelma on se, miten ilmasuihku saadaan pysymään riittävän pitkään katossa. Rajoittavana tekijänä on käytettävissä oleva paine-ero, jonka takia lähtönopeus ei voi olla juuri suurempi kuin 4 m/s.

Aksiaalisuihkulle irtoamiskohta x_a on

$$x_a = 4,3 \frac{Ar_{xa}^{1/2} K q_0 i^{1/4} C_t^{1/2}}{\Delta t_0^{1/2} A_{eff}^{3/4}} - x_0, \quad (4)$$

tasosuihkulle irtoamiskohta on

$$x_a = 5,0 \frac{Ar_{xa}^{2/3} K^2 q_0^{4/3} C_t^{2/3}}{\Delta t_0^{2/3} B^{1/3} A_{eff}} - x_0, \quad (5)$$

ja radiaalisuihkulle irtoamiskohta on

$$x_a = 8,3 \frac{Ar_{xa}^{1/2} K^{3/2} q_0 C_t^{1/2}}{\Delta t_0^{1/2} A_{eff}^{3/4}} \left(1 + \frac{x_0}{x_a}\right)^{1/4} - x_0, \quad (6)$$

jossa Ar_{xa} on Arkimedeen luku irtoamiskohdassa,
 K kattoon kiinnittyvän suihkun nopeuskerroin, jonka arvo riippuu x_0 :n valinnasta. Jos puhallusaukko on katon lähellä ja valitaan $x_0 = 0$, on aksiaalisuihkulle $K \approx 7$, tasosuihkulle $K \approx 3,5$ ja radiaalisuihkulle $K \approx 1,3$.

A_{eff} tuloilma-aukon tehollinen pinta-ala = q_0/v_0 [m^2],
 q_0 tuloilmavirta tuloilman tiheydessä [m^3/s],
 v_0 tehollinen nopeus tuloilma-aukossa [m/s] = $F/(\rho_0 q_0 i)$
 F suihkun impulssivoima, [N]
 ρ_0 tuloilman tiheys [kg/m^3]
 i impulssikerroin /5/, joka on pienempi kuin yksi reikälevyyillä,
 x_0 suihkun tehollisen origon siirtymä [m],
 x_a etäisyys tuloilmalaitteesta irtoamiskohtaan [m],
 B raon tai huoneen leveys [m],
 C_t tiheyskorjaus ja
 Δt_0 tuloilman alilämpötila [K].

Tiheyskorjaus C_t yhtälöissä 1 - 6 on muotoa

$$C_t = \sqrt{\frac{T_{huone}}{T_0}}, \quad (7)$$

jossa T_{huone} on huonelämpötila [K] ja
 T_0 tuloilman lämpötila [K].

Edellä olevat kaavat on johdettu tässä tutkimuksessa lähteen /10/ peruskaavoista lähtien, koska kirjallisuudessa olevissa kaavoissa on eroja. Esimerkiksi radiaalisuihkun kaavassa 6 on kirjallisuudessa kertoimen 8,3 paikalla ilmeisesti virheelliset kertoimet 7,0 /6/ tai 9,1 /2/. Kirjallisuuden kaavoista on lisäksi jätetty tehollisen origon siirtymä x_0 pois.

Lämmönlähteen sijainti vaikuttaa suihkun irtoamiseen ilman lämmönlähteen vaikutusta lasketun irtoamiskohdan Arkimedeen luvun Ar_{xa} kautta. Tyypillisiä arvoja ovat $Ar_{xa} = 0,17$, kun lämmönlähteet jakautuvat tasaisesti, $Ar_{xa} = 0,1$, kun suihku ja lämmönlähteiden ilmavirta törmäävät katossa (käytäväseinäpuhallus) ja $Ar_{xa} = 0,25$, kun lämmönlähteiden ilmavirta on samansuuntainen suihkun kanssa (kuva 2).

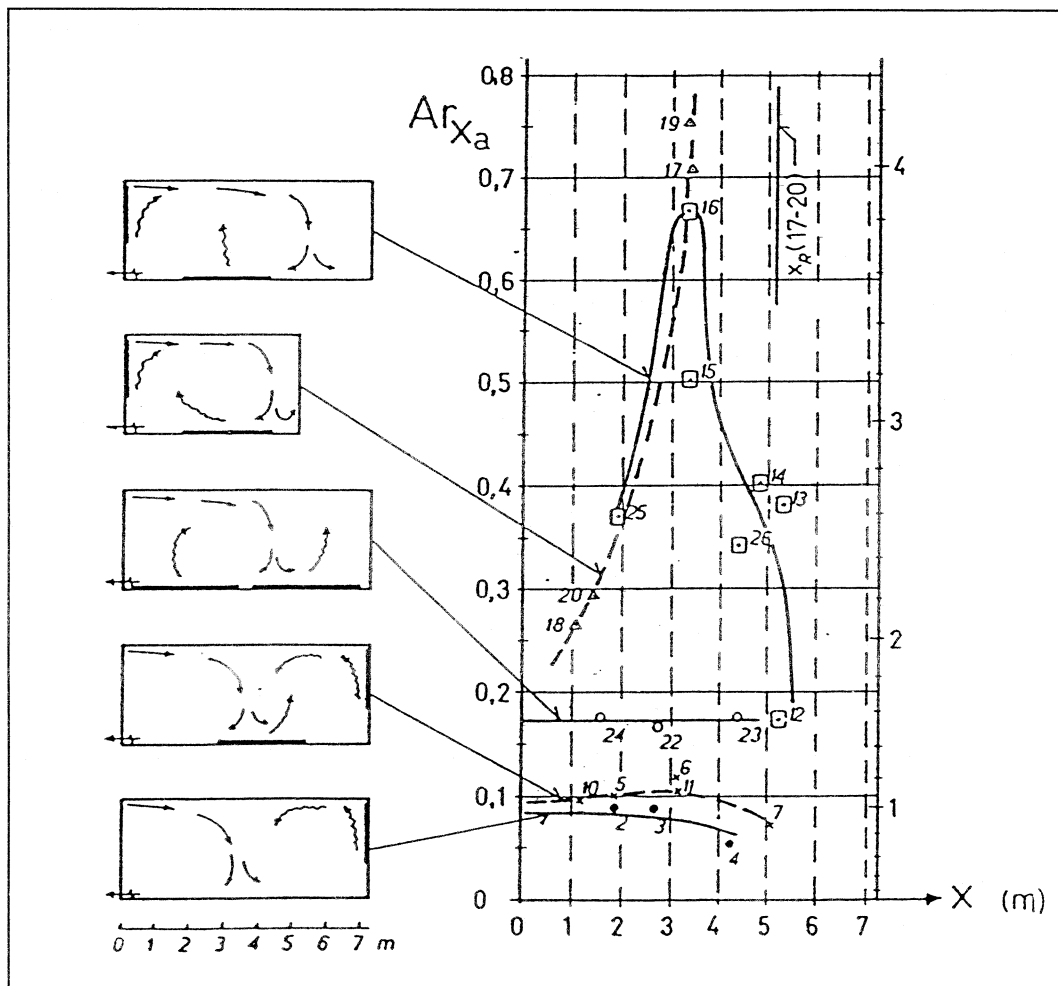
Paljon suurempiakin irtoamiskohdan Arkimedeen lukuja voidaan saada aikaan sijoittamalla puhallus sopivasti lämmönlähteen yläpuolelle. Ulkoilmaventtiilien kannalta on kiinnostavaa, että puhaltamalla tuloilma lämmönlähteen yläpuolelta (kuvan 2 ylin vaihtoehto) voidaan käyttää jopa kahdeksankertaista alilämpötilaa verrattuna puhallukseen lämmönlähdettä vastaan (kuvan 2 alin vaihtoehto).

Irtoamiskohta voidaan laskea myös suoraan paikallisen Arkimedeen luvun määritelmästä

$$Ar_x = \frac{gb\Delta t_x}{T_h v_x^2}, \quad (8)$$

jossa v_x on suihkun maksiminopeus kohdassa x [m/s],
 b suihkun korkeus [m], etäisyys katosta lähes nollanopeuden kohtaan = $C_b(x + x_0)$, missä C_b on aksiaalisuihkulle $2,18i^{1/2}/K$, tasosuihkulle $3,16i/K^2$, ja radiaalisuihkulle $0,504i/K^2$,
 Δt_x suihkun ja huoneen maksimilämpötilaero [K],
 T_h huonelämpötila [K] ja
 g gravitaatiokiihtyvyyden $= 9,8 \text{ m/s}^2$.

Kaavasta 8 nähdään, että irtoamisen estämiseksi pitäisi suihkun nopeus pitää suurena, lämpötilaero pienenä ja suihku matalana.



Kuva 2. Tasosuihkun irtoamiskohta katosta lämmönlähteen sijainnin mukaan. Pisteet kuvaavat irtoamiskohtaa eri kokeissa. Vasen pystyasteikko on tietyllä x -arvolla verrannollinen lähtevän suihkun alilämpötilaan jaettuna lähtönopeuden neliöllä $|6|$.

Suihkun maksiminopeus kohdassa x kaavassa 8 on kattoon kiinnittyvällä aksiaalisiin suihkulla muotoa

$$v_x = \frac{v_0 K C_r}{x + x_0} \sqrt{A_{eff}}, \quad (9)$$

kattoon kiinnittyvällä tasosuihkulla

$$v_x = v_0 K C_t \sqrt{\frac{A_{eff}}{B(x+x_0)}} \quad , \quad (10)$$

ja kattoon kiinnittyvällä radiaalisella suihkulla

$$v_x = v_0 K C_t \sqrt{\frac{A_{eff}}{x(x+x_0)}} \quad , \quad (11)$$

jossa v_x on suihkun maksiminopeus kohdassa x [m/s],
 v_0 tehollinen nopeus tuloilma-aukossa [m/s],
 x etäisyys tuloaukosta/radiaalisen suihkun keskipisteestä [m],
 A_{eff} tuloaukon tehollinen pinta-ala = q_0/v_0 [m²],
 q_0 tuloilmavirta [m³/s],
 B tasosuihkun leveys [m],
 x_0 suihkun tehollisen origon siirtymä [m],
 K kattoon kiinnittyvän suihkun nopeuskerroin, yhtälöt 4 - 6
 ja
 C_t tiheyskorjaus, yhtälö 7.

Paikallinen lämpötilaero Δt_x suihkussa on muotoa

$$\Delta t_x = \frac{I_t \Delta t_0 v_x}{i v_0} \quad , \quad (12)$$

jossa I_t on 0,86 taso- ja radiaalisuihkulle ja 0,75 aksiaalisuihkulle,
 i impulssihäviökerroin, joka poikkeaa yhdestä reikälevyillä,
 Δt_0 tuloilman alilämpötila [K],
 v_x suihkun maksiminopeus kohdassa x [m/s] ja
 v_0 tehollinen nopeus tuloilma-aukossa [m/s].

2.1.4 Irtoavan kattosuihkun nopeus ja lämpötila

Jäähdytystilantessa vedottomuuden arviointi perustuu kohdan 2.1.2 mukaan siihen, että oletetaan maksiminopeus oleskeluvyöhykkeellä verrannolliseksi suihkun irtoamisnopeuteen. Nopeudelle saadaan kaavat sijoittamalla kaavoihin 9 - 11 irtoamisetäisyys x kaavoista 4 - 6. Aksiaalisuihkun irtoamiskohdan nopeus v_a on

$$v_a = 0,23 \frac{C_t^{1/2} A_{eff}^{1/4} \Delta t_0^{1/2}}{Ar_{xa}^{1/2} i^{1/4}} = 0,23 \frac{C_t^{1/2} (q_0 \Delta t_0)^{1/4} \Delta t_0^{1/4}}{Ar_{xa}^{1/2} v_0^{1/4} i^{1/4}}. \quad (13)$$

Tasosuihkun irtoamiskohdan nopeus v_a on

$$v_a = 0,45 \frac{C_t^{2/3} q_0^{1/3} \Delta t_0^{1/3}}{Ar_{xa}^{1/3} B^{1/3}} = 0,45 \frac{C_t^{2/3} (q_0 \Delta t_0)^{1/3}}{Ar_{xa}^{1/3} B^{1/3}}. \quad (14)$$

Radiaalisuihkun irtoamiskohdan nopeus v_a on

$$v_a = 0,12 \frac{C_t^{1/2} A_{eff}^{1/4} \Delta t_0^{1/2}}{Ar_{xa}^{1/2} K^{1/2}} \left(1 + \frac{x_0}{x_a}\right)^{1/4} = 0,12 \frac{C_t^{1/2} (q_0 \Delta t_0)^{1/4} \Delta t_0^{1/4}}{Ar_{xa}^{1/2} v_0^{1/4} K^{1/2}} \left(1 + \frac{x_0}{x_a}\right)^{1/4}, \quad (15)$$

jossa sulkulauseke jää pois, jos K kaavassa 11 määritellään siten, että $x_0 = 0$.

Näitä kaavoja ei ole esitetty aikaisemmin kirjallisuudessa. Vastaava lämpötila saadaan kaavasta 12, jonka mukaan suuri lähtönopeus pienentää suihkun irtoamiskohdan alilämpötilaa.

Aksiaali- ja radiaalisuihkuilla irtoamisnopeus riippuu tuloilma-aukon koosta mutta ei ilmavirrasta tai lähtönopeudesta erikseen. Käytännössä tämä ominaisuus on tärkeä, koska ilmavirran muuttuessa vetoisuus ei saisi vaihdella. Tämä suuntaus näkyy luvun 3 koetuloksissa, esimerkiksi kuvassa 17. Tasosuihkuilla irtoamisnopeus riippuu vain ilmavirrasta leveyttä kohti eikä aukon pinta-alasta. Tämä riippuvuus selittää luvun 3 kuvan 10 muodon. Edelleen luvun 3 kuvien 18 ja 19 vetokäyrien vaakasuorat osat selittynevät virtauksen muuttumisella kaksiulotteiseksi, koska suurella lähtönopeudella ja ilmavirralla suihkuilla ei ole tilaa levitä radiaalisesti. Leveämmässä huoneessa saataisiin siten suurempia vedottomia ilmavirtoja.

Irtoamisnopeuden riippuvuudet alilämpötilasta Δt_0 tukevat luvun 3 kuvien 12 ja 20 mittauksia tilanteessa, jolloin patteriteho on nolla. Irtoamiskohdan lämpötila vaikuttaa lisäksi suoraan vedon tunteeseen vetokriteerien mukaisesti, ks. luku 3.3. Kaavasta 12 nähdään, että lähtönopeuden on oltava selvästi suurempi kuin irtoamiskohdan nopeus, jotta alilämpötila ei jäisi irtoamiskohdassa suureksi. Tämä ominaisuus tekee hyvin pienten lähtönopeuksien tilanteet vetoisiksi ilmavirrasta riippumatta. Se näkyy esimerkiksi kuvan 31 koetuloksista sivulla 73.

2.1.5 Tuloilmalaitteen sekoitusominaisuudet

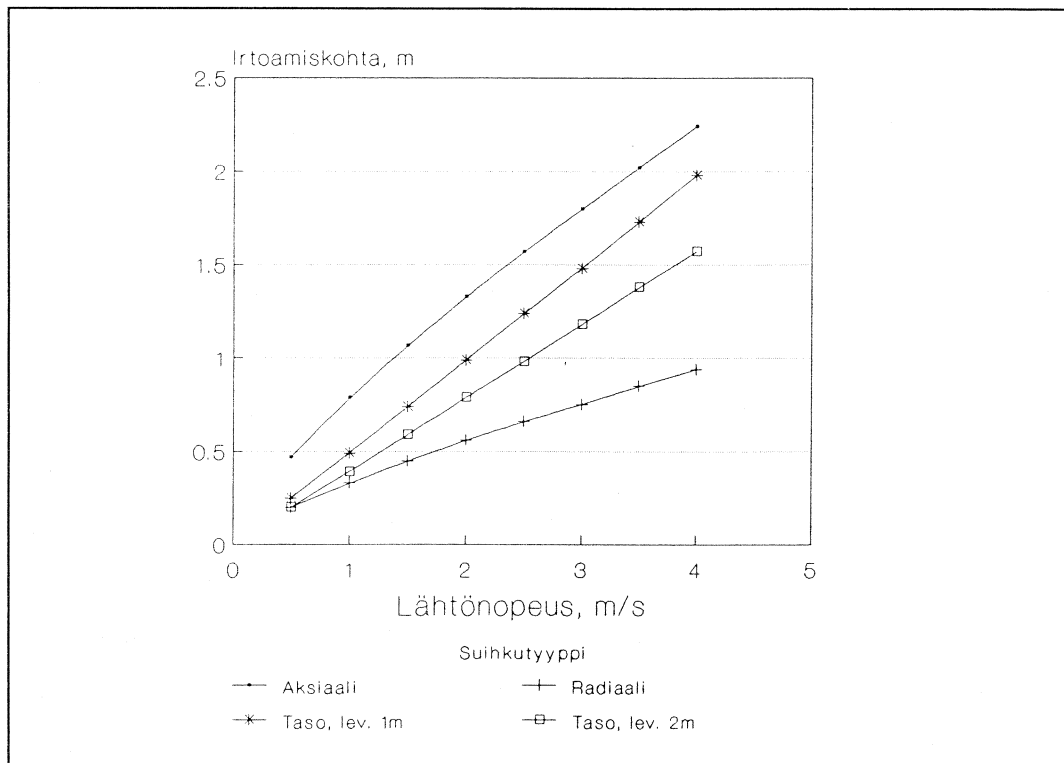
Jos suihku lähtee esimerkiksi reikälevystä tai se puhalletaan hieman viistosti katon alapuolelta, voidaan lisäsekoittuminen ottaa huomioon suihkun nopeusyhtälöissä nopeuskertoimella K tai suihkun tehollisen origon siirtymällä x_0 . Kaavojen 13 - 15 mukaan irtoamisnopeus on aksiaali- ja tasosuihkuilla yllättäen riippumaton tuloilmalaitteen vakioista K ja x_0 . Radiaalisuihkulla sen sijaan ovat suuri K eli vähäinen sekoitus ja negatiivinen x_0 edullisia. Tämä lienee syy siihen, että useista suuttimista muodostuva sekoittava tuloilmalaitte osoittautuu huonommaksi kuin yksinkertainen lautasventtiili luvun 3 kokeissa. Suuremmalla lautasella suihkun tehollinen origo siirtyisi ehkä vielä kauemmas venttiilin eteen ja siten saataisiin pienempi irtoamisnopeus.

Jos tuloilmalaitteen sekoitusominaisuuksilla tarkoitetaan laitteen ottamaa induktiota, joka sekoittuu tuloilmaan laitteen sisällä ennen sisäänpuhallusta, voidaan sen merkitystä tarkastella paremmin kaavojen 13 - 15 jälkimmäisistä muodoista. Tasosuihkulla induktiolla ei ole vaikutusta, koska irtoamisnopeus on verrannollinen tuloon $\Delta t_0 q_0$ eli vakiona pysyvään jäähdytystehoon. Aksiaali- ja radiaalisuihkuilla voidaan induktion avulla pienentää alilämpötilaa Δt_0 , jolloin irtoamisnopeus saadaan pienemmäksi, jos lähtönopeus v_0 ei vastaavasti pienene. Induktioilmavirtaa käytetäänkin hyväksi monien ilmanjakolaitteiden konstruktioidissa. Ulkoilmaventtiileissä induktiota ei voi kuitenkaan käyttää samalla tavalla hyväksi, koska suihkun impulssia rajoittaa käytettävissä oleva paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Tällöin induktio-ilmavirta pienentää lähtönopeutta v_0 vähintäänkin samassa suhteessa kuin alilämpötilaa Δt_0 ja pienentävää vaikutusta irtoamisnopeuteen ei ole.

Jäähdytystehokaavat 1 - 3 ovat yhtäpitäviä kaavojen 13 - 15 kanssa, mutta kaavat 1 - 3 tarkoittavat tehoa lattiapinta-alaa kohti ja ne ottavat huonekoon huomioon silloin kun suihku ei irtoa katosta. Kaavat 13 - 15 sopivat yhden venttiilin jäähdytystehon mitoittamiseen kun jäähdytystilanne on tärkein vedon kannalta. Isotermisen tilanteen vedottomuus on tällöin varmistettava erikseen riittävän suurella huonekoolla tai pienentämällä ilmavirtaa alilämpötilan mukaan. Kaavojen 13 - 15 muoto vastaa laitevalmistajien tapaa antaa tuloilmalaitteilleen suurin pinta-ala (avaus) ja suurin mahdollinen alilämpötila.

2.1.6 Esimerkkejä kattosuihkun irtoamisesta

Kuvissa 3 - 5 esitetään eri suihkujen irtoamisen ja lähtönopeuden välistä riippuvuutta. Ilmavirta on $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, tuloilman lämpötila $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja huoneen lämpötila $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämmönlähteet on jaettu huoneessa tasaisesti ($Ar_{xa} = 0,17$). Suihkuille on annettu kaavojen 4 - 6 yhteydessä mainitut nopeuskertoimien K arvot.



Kuva 3. Kattoon kiinnittyvän suihkun irtoamiskohta. Tuloilmavirta on $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, sen lämpötila $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja huonelämpötila $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuvasta 3 nähdään, että radiaalisuihku irtoaa katosta helpoiten. Suuri lähtönopeus on suotavaa, koska tällöin suihku irtoaa kauempana ja nopeus irtoamiskohdassa ehtii laskea alemmaksi kuin pienillä lähtönopeuksilla (kuva 4 ja kaava 15). Myös irtoamiskohdan lämpötila on korkeampi suuremmilla lähtönopeuksilla (kuva 5).

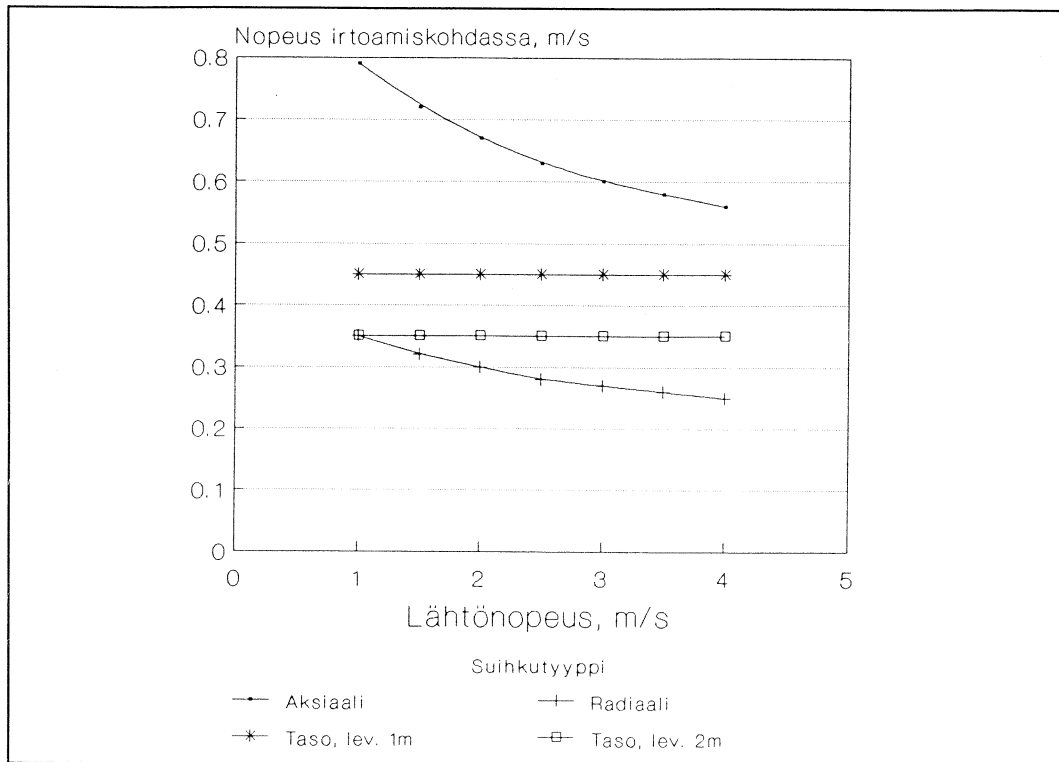
Tasosuihku on laskettu yhden metrin ja kahden metrin levyisenä. Se saadaan pysymään katossa verrattain pitkään, kun lähtönopeus on suuri (kuva 3). Irtoamiskohdan nopeuteen lähtönopeus sen sijaan ei vaikuta (kuva 4 ja kaava 14), mutta suuri lähtönopeus on edullinen lämpötilan kannalta (kuva 5).

Aksiaalisuihku irtoaa kaukana (kuva 3), mutta nopeus irtoamiskohdassa on suuri (kuva 4 ja kaava 13) ja lämpötila matala (kuva 5).

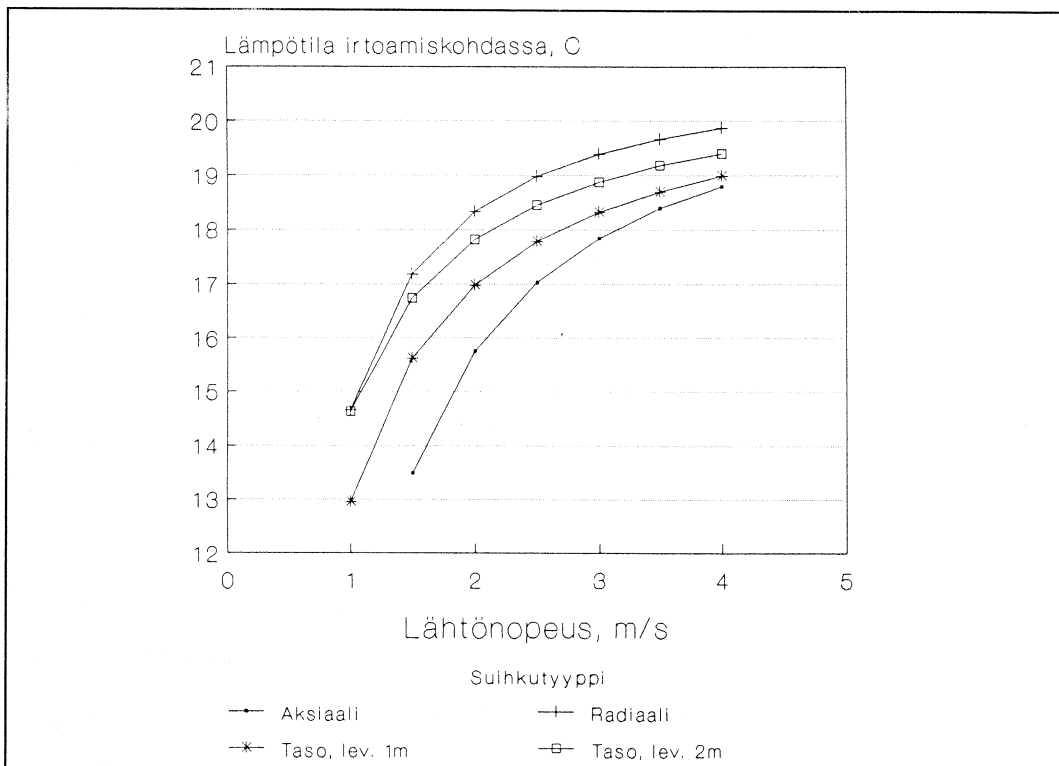
Kaikissa tapauksissa suihkun nopeus irtoamiskohdassa on suuri vedon kannalta. Irtoamisen jälkeen suihku joko hidastuu tai kiihtyy alas tullessaan. Irtoamiskohtaa voidaan siirtää kauemmaksi sijoittamalla puhallus lämmönlähteen yläpuolelle, jolloin irtoamiskohdan Arkimedeen luku on suurempi kuin tasaiselle lämmönlähteen sijainnille pätevä arvo 0,17.

Lähes isotermisessä tilanteessa, jolloin suihku ei irtoa katosta, vedottomuus on varmistettava mitoittamalla suihkun heittopituus riittävän pieneksi huoneen mittoihin verrattuna. Lasketaan sitä varten kaavoista 8 - 11 eri suihkujen heittopituudet loppunopeuteen 0,15 m/s saakka lähtönopeudella 4 m/s. Jos suihkun katossa kulkema matka on saatua heittopituutta suurempi ja kaavojen 1 - 3 yhteydessä mainittu kerroin on 1,5, ei oleskeluvyöhykkeen nopeus ole suurempi kuin 0,1 m/s.

Heittopituudet ovat radiaalisuihkulle 1,6 m, tasosuihkulle (3 m leveässä huoneessa) 5,8 m ja aksiaalisuihkulle 8,3 m. Isotermisessä tilanteessa radiaalisuihku ei siis aiheuta tälläkään lähtönopeudella vetoa normaalikokoisessa huoneessa. Tasosuihkulla voi pienempi lähtönopeus olla parempi, tosin se laskee irtoavan suihkun lämpötilaa. Aksiaalisuihkulla voisi käyttää useampaa tuloilmalaitetta tai yhtä sekoitusominaisuuksiltaan parempaa laitetta.



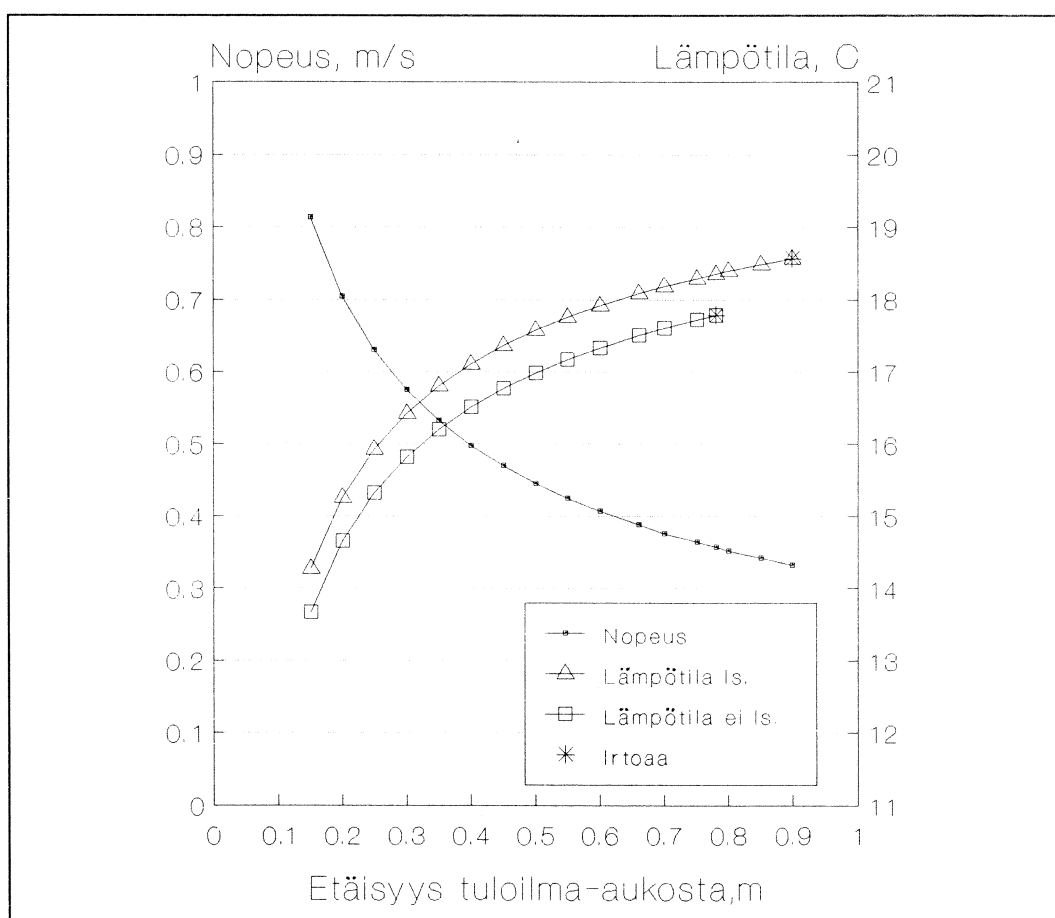
Kuva 4. Kattoon kiinnittyvän suihkun nopeus irtoamiskohdassa. Tuloilmavirta on $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, sen lämpötila $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja huonelämpötila $21 \text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 5. Kattoon kiinnittyvän suihkun lämpötila irtoamiskohdassa. Tuloilmavirta on $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, sen lämpötila $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja huonelämpötila $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1.7 Pintalämmönsiirron vaikutus kattosuihkun irtoamiseen

Edellä on oletettu, että suihkun jäähdytysteho pysyy vakiona suihkun edetessä; lämpötila suihkussa tosin nousee sekoittumisen takia. Pintaan kiinnittyvä suihku saa kuitenkin lämpöä itseään lämpimämmistä pinnoista konvektiivisen lämmönsiirron avulla. Kuvassa 6 tarkastellaan tilannetta, jossa lämpöä siirtyy säteilemällä huoneen muista pinnoista (21 °C) kattoon ja siitä edelleen konvektiivisesti suihkuun. Kyseessä on kohdassa 2.1.6 laskettu 2 m:n levyinen tasosuihku.



Kuva 6. Pintalämmönsiirron (ls.) vaikutus kattoon kiinnittyvän tasosuihkun (leveus 2 m) lämpötilaan ja irtoamiseen. Tuloilmavirta on 8 dm³/s, lämpötila 0 °C, lähtönopeus 2 m/s, huonelämpötila 21 °C ja huoneen muiden pintojen lämpötila 21 °C.

Kuvasta 6 käy ilmi, että pintalämmönsiirto nostaa suihkun loppuosan lämpötilaa vajaan asteen ja siirtää irtoamiskohtaa 0,12 m kauemmaksi. Suihkuun oli ehtinyt siirtyä tässä tapauksessa pinnasta noin 40 W:n lämpöteho ennen suihkun irtoamista, mikä on noin 20 % suihkun alkuperäisestä 200 W:n lämpötehostä. Puolet lämpötehostä siirtyy jo ensimmäisen 0,2 m:n matkalla, jossa lämpötilaero

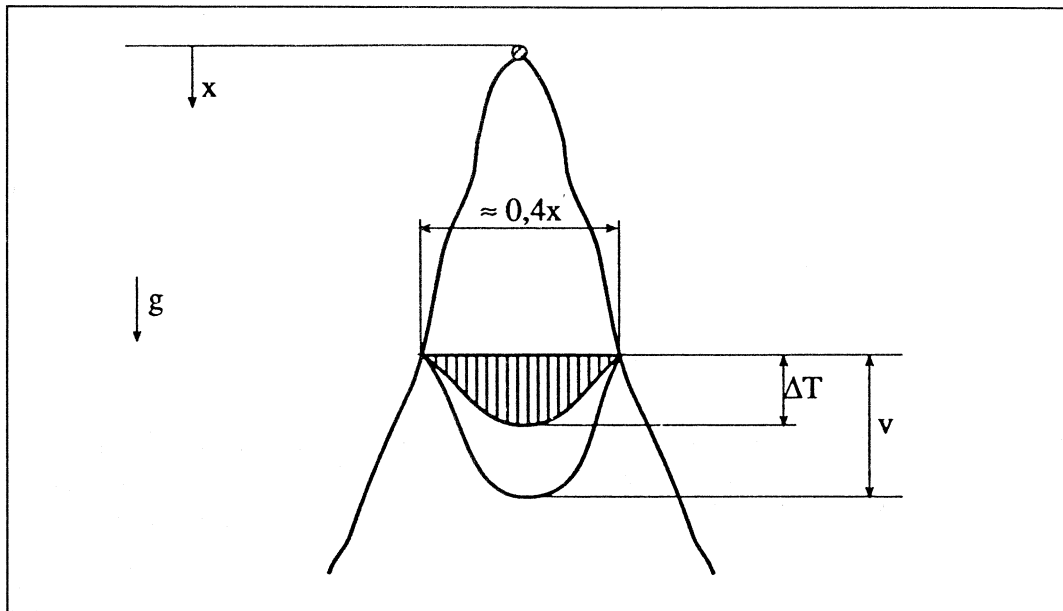
suihkun ja pinnan välillä on suuri. Tehokkaampi lämmönsiirto saataisiin aikaan lämmittämällä suihkun kanssa kosketuksissa olevaa pintaa läheltä tuloilma-aukkoa.

Lämmönsiirron vaikutusta radiaalisuihkun irtoamiseen on tarkasteltu lisäksi kohdan 2.2.2 kuvassa 10.

2.1.8 Nostesuihkut

Alilämpöinen suihku muuttuu nostevoimien hallitsemaksi, jos sen lähtönopeus on pieni tai kun se irtoaa katosta. Suihkuteoriassa tunnetaan viivamaisen ja pistemäisen lämmönlähteen aiheuttamat nostesuihkut /1/, joiden nopeuksia ja lämpötilaeroja (kuva 7) ympäristöön nähden on taulukoissa 2 ja 3.

Tarkastellaan esimerkiksi katosta irtoavaa radiaalisuihkua, jonka lähtönopeus on 3,4 m/s, lämpötila 0°C , ilmavirta $16 \text{ dm}^3/\text{s}$, nopeuskerroin $K = 1,62$ ja origon siirtymä $x_0 = -0,05 \text{ m}$. Irtoamiskohdan säde on kaavan 6 mukaan 1,4 m ja halkaisija 2,8 m. Oletetaan, että irtoava rengasmaisen suihku voidaan muuttaa viivamaisesta kylmänlähteestä lähteväksi vapaaksi nostesuihkuksi, jonka pituus on renkaan kehän pituus eli 6 m.



Kuva 7. Kylmänlähteen aiheuttama turbulентtinen suihku. Ympäristön lämpötila on vakio.

Taulukko 2. Viivamaisen lämmön/kylmänlähteen aiheuttaman turbulenttisen suihkun nopeus ja lämpötilaero ympäristöön nähden suihkun keskellä eri etäisyyksillä lämmön/kylmänlähteestä. Ympäristön lämpötila oletetaan vakioksi.

etäisyys, m	0,5		1,0		2,0		5,0		10,0	
	m/s	K	m/s	K	m/s	K	m/s	K	m/s	K
10	0,12	0,5	0,12	0,3	0,12	0,1	0,12	0,1	0,12	0,0
20	0,15	0,8	0,15	0,4	0,15	0,2	0,15	0,1	0,15	0,0
50	0,20	1,5	0,20	0,7	0,20	0,4	0,20	0,1	0,20	0,1
100	0,25	2,3	0,25	1,2	0,25	0,6	0,25	0,2	0,25	0,1
200	0,32	3,7	0,32	1,9	0,32	0,9	0,32	0,4	0,32	0,2
300	0,37	4,9	0,37	2,4	0,37	1,2	0,37	0,5	0,37	0,2
500	0,43	6,8	0,43	3,4	0,43	1,7	0,43	0,7	0,43	0,3
1000	0,55	10,8	0,55	5,4	0,55	2,7	0,55	1,1	0,55	0,5

Taulukko 3. Pistemäisen lämmön/kylmänlähteen aiheuttaman turbulenttisen suihkun nopeus ja lämpötilaero ympäristöön nähden suihkun keskellä eri etäisyyksillä lämmön/kylmänlähteestä. Ympäristön lämpötila oletetaan vakioksi.

etäisyys, m	0,5		1,0		2,0		5,0		10,0	
	m/s	K	m/s	K	m/s	K	m/s	K	m/s	K
10	0,39	4,5	0,31	1,4	0,24	0,4	0,18	0,1	0,14	0,0
20	0,49	7,1	0,39	2,2	0,31	0,7	0,23	0,2	0,18	0,0
50	0,66	13,0	0,53	4,1	0,42	1,3	0,31	0,3	0,24	0,1
100	0,83	20,7	0,66	6,5	0,53	2,1	0,39	0,4	0,31	0,1
200	1,05	32,8	0,83	10	0,66	3,3	0,49	0,7	0,39	0,2
300	1,20	43,0	0,95	14	0,76	4,3	0,56	0,9	0,44	0,3
500	1,43	60,4	1,13	19	0,90	6,0	0,66	1,3	0,53	0,4

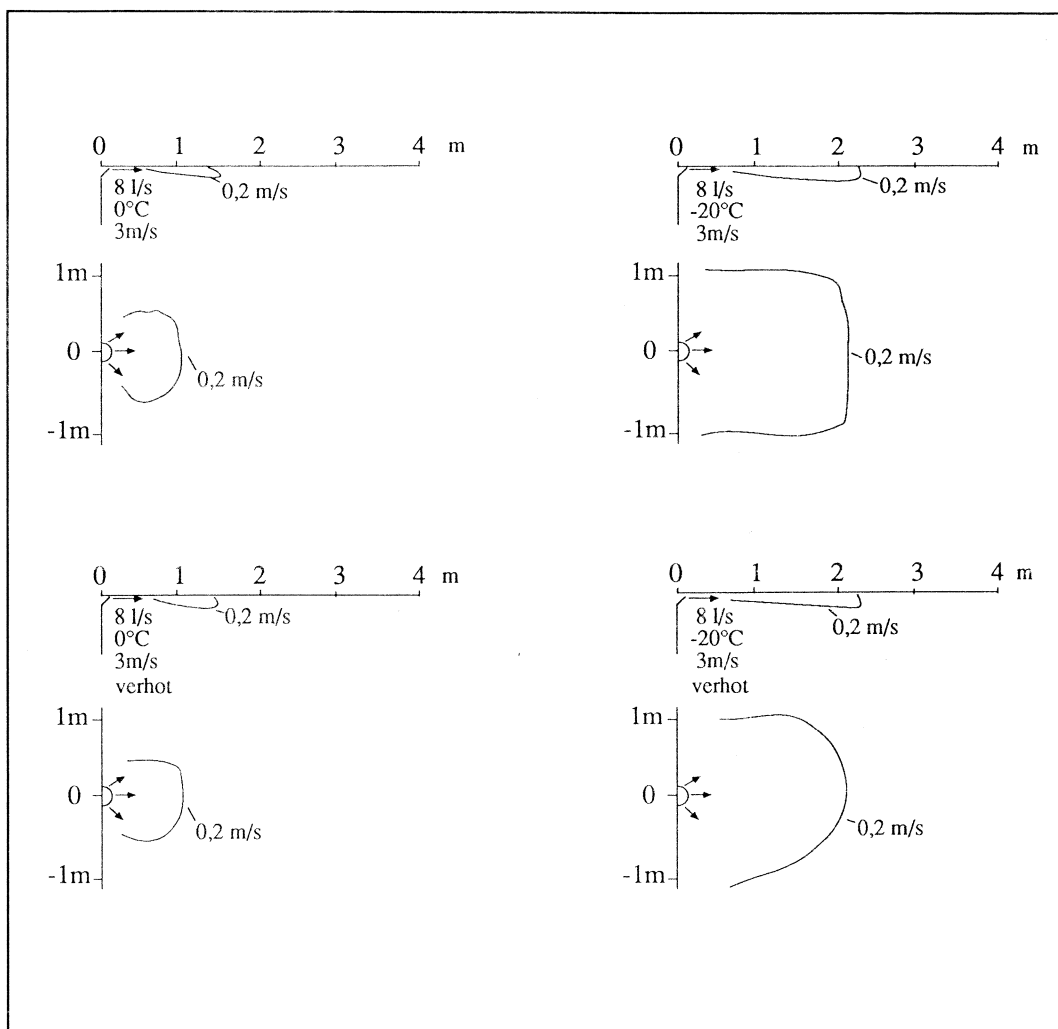
Kun kylmänlähteen teho tunnetaan ($0,016 \text{ m}^3\text{s}^{-1} * 1200 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1} * 21 \text{ K}/6\text{m} = 67 \text{ W/m}$), saadaan taulukosta 2 nostesuihkun nopeus $0,22 \text{ m/s}$. Voidaan siis päätellä, että putoava suihku tulee hidastumaan irtoamisen jälkeen irtoamiskohdan nopeudesta $0,29 \text{ m/s}$ (kaava 15). Vastaava irtoamiskohdan alilämpötila on $1,7 \text{ K}$, joka vastaa taulukon 2 mukaan etäisyyttä $0,5 \text{ m}$.

Edellä mainittu tilanne myös mitattiin (sitä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2, keskimääräinen lähtönopeus on 3 m/s). Irtoamiskohdassa etäisyydellä $1,4 \text{ m}$ venttiilistä nopeus oli $0,30 \text{ m/s}$ ja alilämpötila $2,1 \text{ °C}$. Suihku hidastui pudotessaan siten, että $0,5 - 1,5 \text{ metriä}$ katon alapuolella suihkun nopeus oli $0,14 - 0,16 \text{ m/s}$. Suurin nopeus mitattiin $0,6 \text{ m}$ katon alapuolelta, jossa alilämpötila oli 1 °C . Suihku siis hidastuu enemmän kuin nostesuihkujen teorian perusteella voidaan arvioida.

Pienestä alilämpötilasta voidaan päätellä, että suihkua voidaan merkittävästi hidastaa, jos suihkuun sekoittuvan ilman lämpötila on edes hieman korkeampi kuin keskimääräinen huonelämpötila. Tässä tapauksessa olisi siis edullista, jos huoneen lämpötila olisi lähellä kattoa korkeampi. Tehokkaasti sekoittavilla tuloilmalaitteilla, kuten erilaiset reikä- tai suutinputket, saatavat suuret vedottomat jäähdytystehot perustuvatkin juuri paikallisten lämpötilaerojen hyväksi käyttöön.

2.2 SÄTEISSUIHKUN MITTAUKSET

Mittauksin tarkasteltiin radiaalista suihkua, joka puhallettiin ikkunan yläpuolelta katon pintaa pitkin 180 asteen sektoriin. Tavoitteena oli saada yksityiskohtaisempaa tietoa tuloilmasuuhkun ja patterivirtauksen käyttäytymisestä kuin vedottomuusmittauksissa (luku 3) saadaan. Tuloilmalaitte oli vedottomuuskokeissa käytetty "pääskynpesä", jonka konstruktio on esitetty luvun 3 kuvassa 4. Mittaukset tehtiin samassa koehuoneessa ja samoilla mittauslaitteilla kuin luvussa 3.5.2 esitettävät vedottomuuskokeetkin. Tuloilmavirta huoneilman tiheydessä oli $8 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja tuloilman lämpötila 0 °C tai -20 °C . Kuten vedottomuuskokeissakin, patterilämmitysteho vastasi tuloilman lämmitystarvetta -20 °C :n lämpötilalla, kun taas 0 °C :n lämpötilalla patteriteho oli nolla. Ilman lähtönopeudella tarkoitetaan tässä keskimääräistä lähtönopeutta isotermisessä tilanteessa, kuten myös luvussa 3.



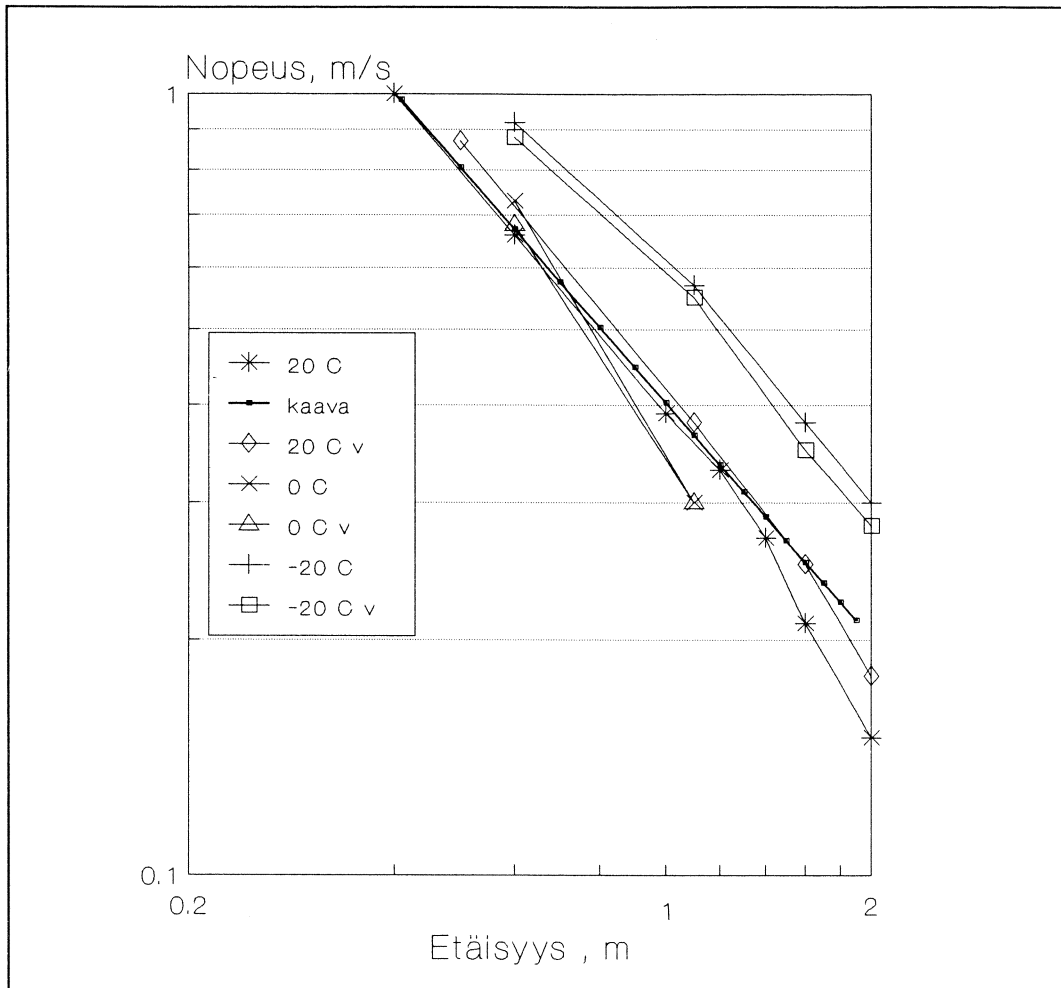
Kuva 8. Säteittäisesti katon rajasta puhaltavan tuloilmalaitteen muodostama virtauskuvio huoneen keskitasossa ja katon rajassa, kun tuloilmavirta on $8 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja ilman lähtönopeus 3 m/s . Oikeanpuoleisissa kuvissa tuloilmalaitteen alla oleva patteri on käytössä ja se lisää suihkun heittopituutta. Alimmissa kuvissa on käytössä verholautta ja verhot, jotka on vedetty ikkunan sivuille. Koehuone on esitetty tarkemmin luvussa 3.

Kuvassa 8 on esitetty tuloilmasuihkujen virtauskuviot ilman lähtönopeudella 3 m/s . Nähdään, että patterin konvektiovirtaus lisää selvästi tuloilmasuihkun nopeutta ja heittopituutta. Verholautta ei näytä vaikuttavan merkittävästi tuloilmasuihkun muotoon. Kuvan 8 vasemmanpuolisista kuvista näkyy, että tuloilmasuihku ei leviä katossa radiaalisesti, vaan suuntautuu enemmän huoneen pituussuuntaan.

2.2.1 Suihkun nopeuden alenema

Kuvassa 9 on esitetty tuloilmasuihkun maksiminopeus seinästä mitatun etäisyyden

funktiona kuvan 8 tilanteissa ja lisäksi tuloilman lämpötilalla 20 °C.

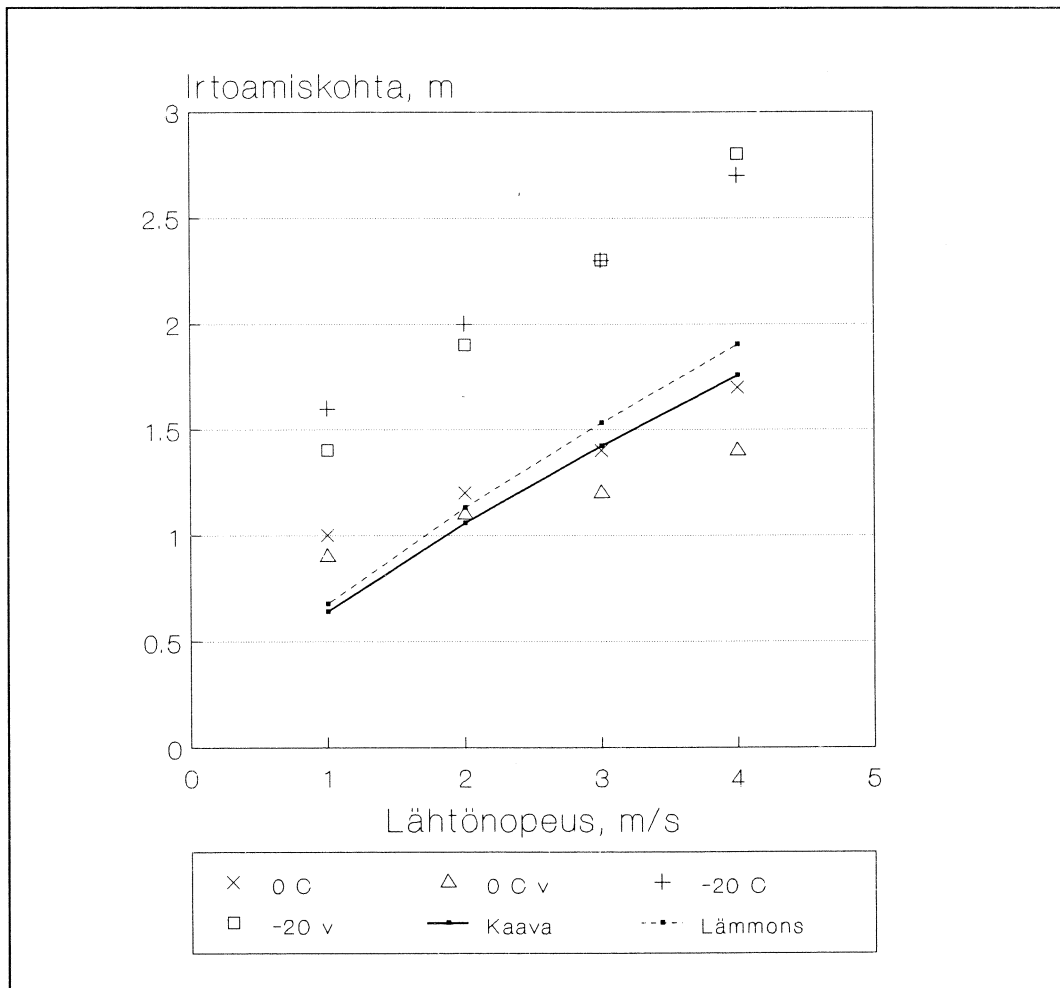


Kuva 9. Säteittäisen tuloilmasuihkun mitatut nopeudet huoneen keskitasossa tuloilman lämpötiloilla 20 °C, 0 °C ja -20 °C verhoja ja verholautaa käytettäessä (merkintä v) ja ilman niitä. Suihkun alla oleva patteri oli käytössä -20 °C lämpötilassa. Ilmavirta on 8 dm³/s, tuloilma-aukko on asetettu 20 °C lämpötilassa siten, että keskimääräinen tuloilman lähtönopeus aukossa on 3 m/s. Kuvassa on myös kaavan 11 mukainen käyrä, jossa $K = 1,62$, $x_0 = -0,05$ m, tulolämpötila 20 °C ja $v_0 = 3,7$ m/s.

Patterin suihkua vauhdittava vaikutus näkyy selvästi (-20 °C:n lämpötila). Kuvasta näkyy myös, että isoterminen suihkun (20 °C) nopeus on hyvin kuvattavissa nopeuteen 0,3 m/s saakka kaavalla 11. Kaavassa 11 on käytetty ilmavirtaa 16 dm³/s eikä 8 dm³/s, koska puhalluskulma on puolet radiaalisuihkun 360 asteesta.

2.2.2 Suihkun irtoaminen katosta

Kuvassa 10 on kuvan 8 suihkujen irtoamiskohdat lähtönopeuden funktiona. Verhot ja verholauta vaikuttavat $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa siten, että suihku pysyy katossa $0,1 - 0,3\text{ m}$ lyhyemmän matkan kuin ilman verholautaa ja verhoja. Täsmällistä syytä tähän ei saatu selville: suihkun nopeus, korkeus ja lämpötila olivat lähes samat molemmissa tapauksissa.



Kuva 10. Säteiläisen tuloilmasuihkun katosta irtoamiskohta tuloilman lämpötiloille $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ verhoja ja verholautoja käytettäessä (merkintä v) ja ilman niitä. Ilmavirta $8\text{ dm}^3/\text{s}$. Tilanne vastaa kuvaa 8. Kuvassa on myös kaavasta 6 lasketut irtoamiskohdat, kun $K = 1,62$, $x_0 = -0,05\text{ m}$, tulolämpötila $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja v_0 on 23 % suurempi kuin keskimääräinen lähtönopeus. Katkoviivoin merkitty käyrä on laskettu ottaen huomioon lämmönsiirto kattopinnasta.

Irtoamisetäisyyden kaava 6 antaa kuvan 10 mukaan oikean irtoamisetäisyyden läh-

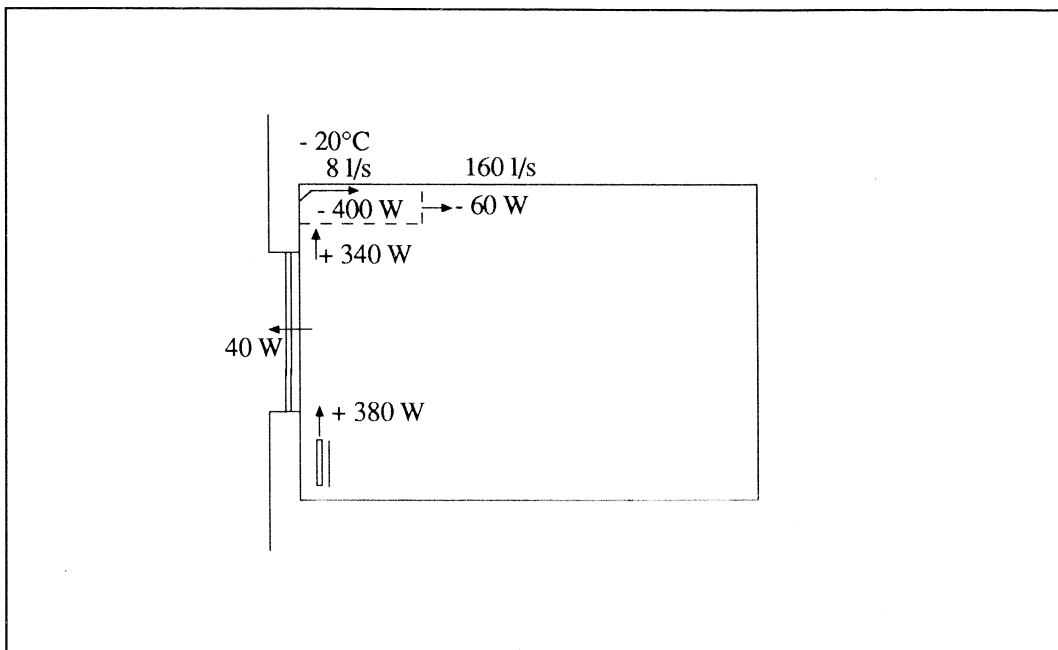
tönopeudella 3 m/s vapaassa asennuksessa ilman verholautaa. Sen sijaan kaava antaa liian jyrkän riippuvuuden lähtönopeudesta. Mittaustulosten vähäisemmän lähtönopeusriippuvuuden syynä lienee se, että suihku suuntautuu pienillä lähtönopeuksilla (suurilla tuloilma-aukon avauksilla) enemmän huoneen pituussuuntaan kuin nopeudella 3 m/s, jonka nopeuskerrointa kaavoissa on käytetty. Kuvassa 10 on esitetty myös katosta tulevan konvektiivisen lämpövirran vaikutus irtoamisetäisyyteen. Lämmönsiirto jyrkentää lähtönopeuden vaikutusta, koska lämmönsiirtopinta kasvaa irtoamisetäisyyden mukana.

Patterilämmitystä käytettäessä (tuloilman lämpötila $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) irtoamisetäisyys on selvästi suurempi kuin lattialämmitystä käytettäessä ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jos lattialämmityksen yhteydessä käytettäisiin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tulolämpötilaa, olisi irtoamisetäisyys kaavan 6 mukaan 30 % pienempi kuin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Lämmityspatteri vaikuttaa tuloilmasuihkuun kahdella tavalla. Ensinnäkin patterin voimakas konvektiovirtaus antaa suihkulle lisäimpulssin ja lisää siten suihkun nopeutta, ks. kuva 9. Toiseksi patterivirtaus tuo tuloilmasuihkuun huoneilmaa lämpimämpää ilmaa ja pienentää siten suihkussa liikkuvaa lämpötehoa.

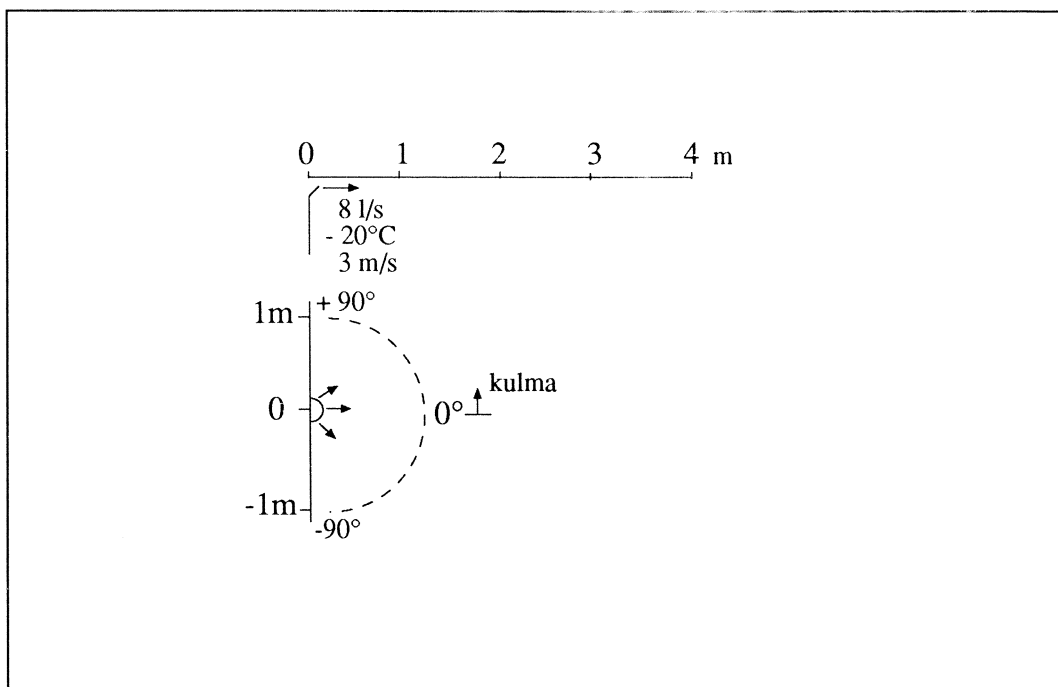
2.2.3 Patterivirtauksen ja tuloilmasuihkun vuorovaikutus

Jos patterin konvektiovirtaus saataisiin sekoittumaan täydellisesti tuloilmasuihkuun, olisivat suihkujen lämpövirrät kuvan 11 mukaiset. Tuloilman lämmitystarve on 400 W, jonka kanssa yhtä suureksi asetetaan myös patteriteho tämän tutkimuksen kokeissa. Patteritehosta noin 380 W siirtyy konvektiosuihkuun, josta taas 40 W siirtyy konvektiivisesti ikkunapintaan. Patterisuihkun ja tuloilmasuihkun sekoittumisen jälkeen yhdistelmäsuikussa on siten noin 60 W:n jäädytysteho.

Edellä arvioidun energiataseen yksityiskohtaista toteutumista tarkasteltiin mittaamalla patterisuihkun sekä yhdistelmäsuikun nopeus- ja lämpötilaprofiilit (kuva 12). Tulokset mittauksista on esitetty kuvissa 13 - 16. Patterisuihku on varsin voimakas: sen maksiminopeus 1,9 m korkeudella on 0,7 m (kuva 13), sen ilmavirta noin $160\text{ dm}^3/\text{s}$ ja lämpöteho 340 W.

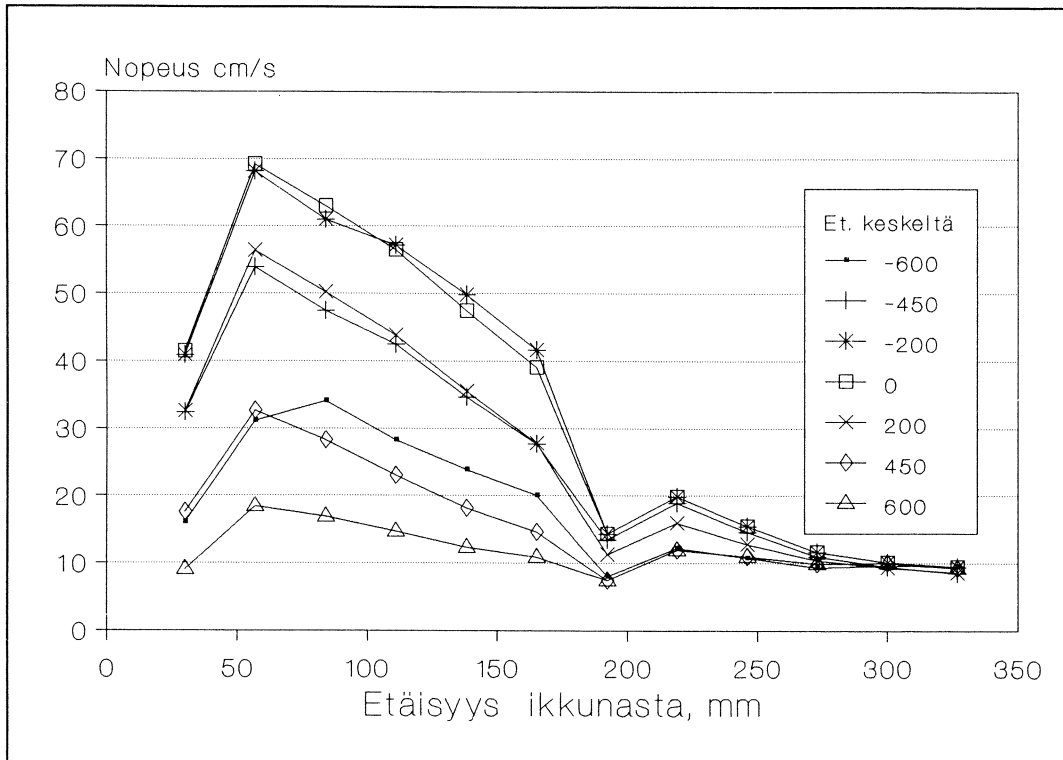


Kuva 11. Patterisuihkun ja tuloilmasuihkun sekä niiden yhdistelmäsuihkun lämpövirrat.

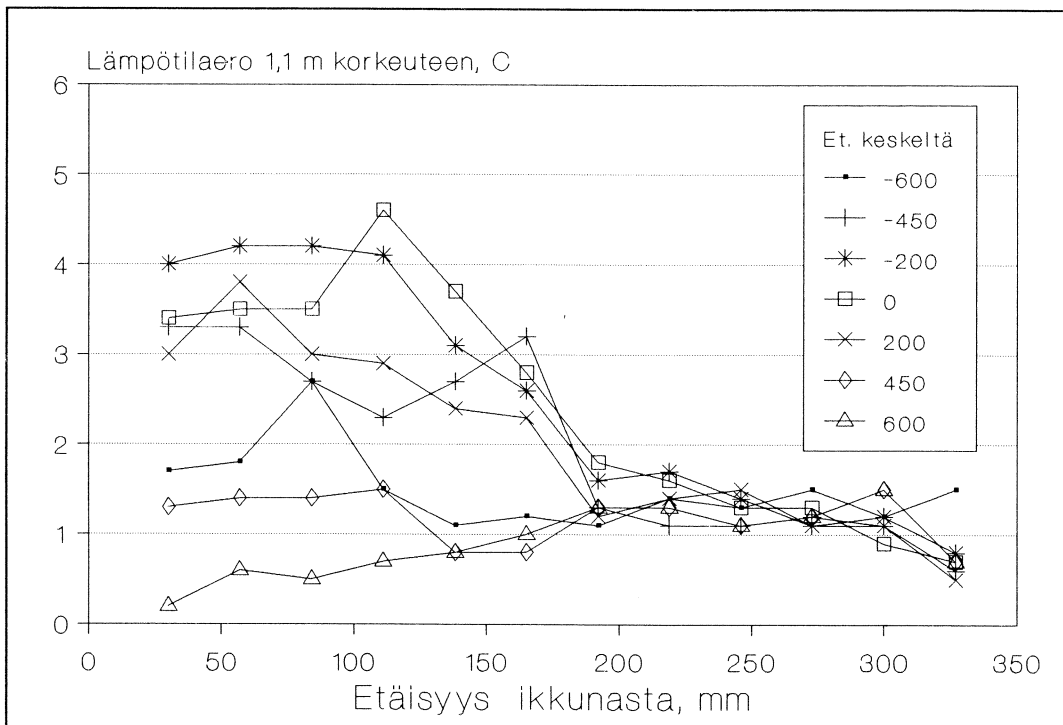


Kuva 12. Tuloilmasuihkun mittauspaikka yhden metrin säteellä tuloilmalaitteesta.

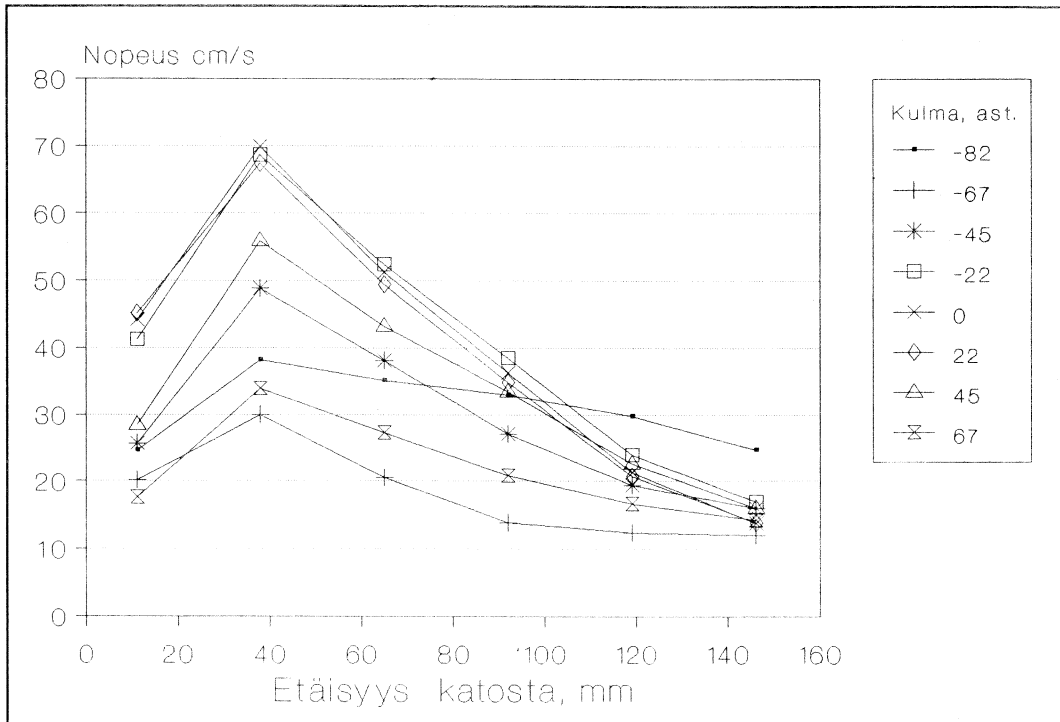
Nopeusjakautuma patterin sivusuunnassa on epäsymmetrinen: kuvien 13 ja 14 negatiivisilla etäisyyksillä nopeudet ja lämpötilaerot ovat suurempia kuin positiivisilla etäisyyksillä.



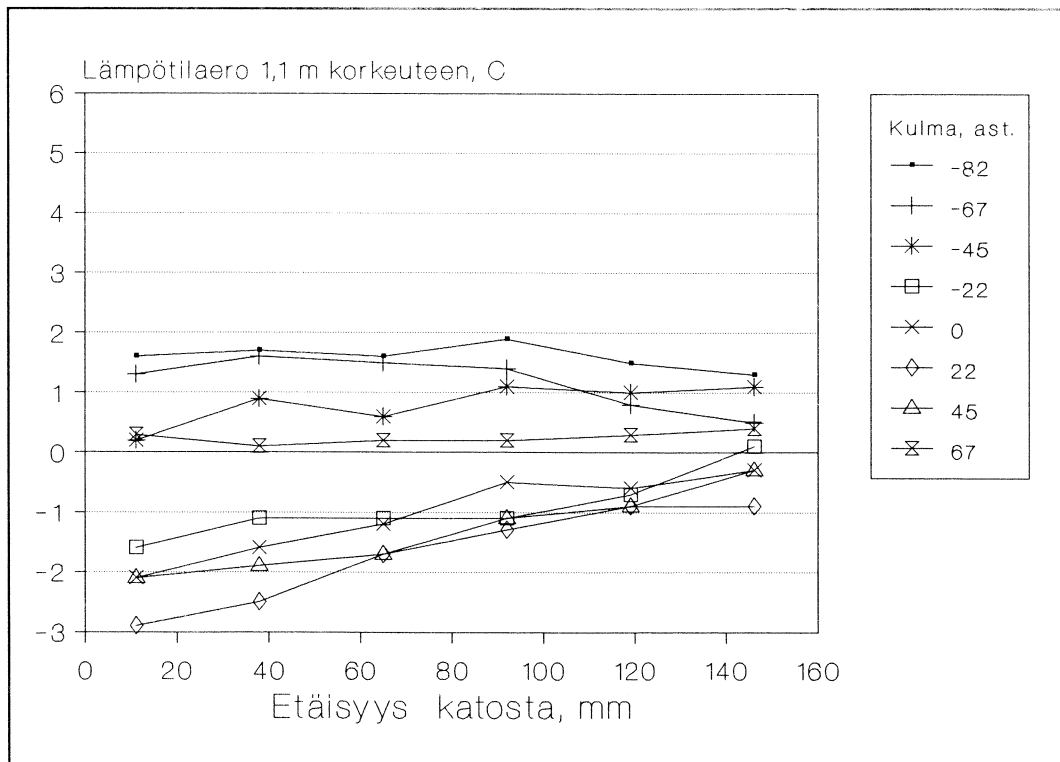
Kuva 13. Patterista nousevan konvektiosuihkun nopeusprofiili 1,9 m:n korkeudella lattiasta (1,4 m patterin yläpinnasta). Parametrina etäisyys patterin keskeltä sivusuunnassa. Patteriteho 400 W.



Kuva 14. Patterista nousevan konvektiosuihkun lämpötilaprofiili 1,9 m:n korkeudella lattiasta. Parametrina etäisyys patterin keskeltä sivusuunnassa. Patteriteho 400 W. Referenssilämpötila on huoneen keskellä 1,1 m:n korkeudella.



Kuva 15. Patterivirtauksen ja tuloilmasuihkun yhdistelmän nopeusprofiili yhden metrin säteellä tuloilmalaitteesta. Parametrina on kulma huoneen keskitasosta. Tuloilmavirta $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, sen lämpötila $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, patteriteho 400 W .



Kuva 16. Patterivirtauksen ja tuloilmasuihkun yhdistelmän lämpötilaprofiili yhden metrin säteellä tuloilmalaitteesta. Parametrina on kulma huoneen keskitasosta. Tuloilmavirta $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, sen lämpötila $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, patteriteho 400 W .

Patterisuihkun epäsymmetria näkyy myös tuloilmasuihkun ja patterisuihkun sekoittuessa. Kuvan 16 lämpötilaprofiileista nähdään, että yli 45 asteen negatiivisilla suuntakulmilla yhdistelmäsuihku on ylitlämpöinen ja vain keskeltä (suuntakulmat -22...+45 astetta) alilämpöinen. Näyttää siis siltä, että patterin lämmin ilmavirtaus osittain ohittaa tuloilmasuihkun sivuilta sekoittumatta kylmään tuloilmaan. Yhdistelmäsuihkun ilmavirraksi saatiin mittaustuloksista $160 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja lämpövirraksi -100 W.

2.2.4 Päätelmät suihkumittauksista

Puoliradiaalisen tuloilmasuihkun irtoaminen katosta vastasi hyvin suihkuteorian antamia arvoja, kun huoneessa oli lattialämmitys. Suihkuteorian avulla saadaan esille hyödyllisiä riippuvuuksia, mutta sen soveltaminen vaatii teorian syvällistä tuntemusta ja tuloilmalaitteen ominaisuuksien huomioon ottamista. Patterilämmitystilanteessa suihkun irtoamisetäisyys oli 50 - 80 % suurempi, vaikka suihkun alilämpötila oli kaksinkertainen. Patterin konvektiovirtaus vauhdittaa tuloilmasuihkua ja pienentää ylitlämpötilallaan tuloilmasuihkun jäähdystystehoa. Ulkoilman vedottoman sisäänoton kannalta konvektiivisesti lämpöä luovuttava patteri on edullinen. Patterin konvektiovirtaus on saatava sekoittumaan tuloilmasuihkuun mahdollisimman hyvin.

2.3 HUONEVIRTAUSKENTÄN LASKENTA

2.3.1 Laskentaperiaate

Huoneilman paikalliset lämpötilat ja ilman nopeudet voidaan laskea jakamalla huone pieniin alkioihin ja ratkaisemalla niille kirjoitetut ns. Navier-Stokesin yhtälöt tietokoneella. Tuloksena saatava informaatio on jopa yksityiskohtaisempaa kuin täysmittakaavamittauksista voidaan saada.

Laskenta ottaa huomioon huoneen geometrian, seinämien lämmönsiirron, lämmönlähteiden, esteiden ja suihkujen yhteisvaikutuksen. Turbulenssi kuvataan yleensä turbulenssimallilla, joista k-epsilon-malli on tavallisin. Ulkoilmaventtiilien

aiheuttamassa virtauskentässä tämä malli ei pysty täysin kuvaamaan turbulenssia, koska kyseeseen tulevilla ilmavirroilla (ilmanvaihtokerroin pienempi kuin 1 h^{-1}) ns. pienten Reynoldsin lukujen vaikutukset ovat merkittäviä /4/. Tässä tutkimuksessa on päädytty käyttämään tavallista k-epsilon-mallia, jolla saatavia tuloksia voitaneen käyttää eri sisäänpuhallusvaihtoehtojen vertailuun. Laskennalla saatavat oleskeluvyöhykkeen nopeudet ovat todennäköisesti suurempia kuin todellisuudessa, koska pienten Reynoldsin lukujen efekti vaikuttaa niihin pienentävästi.

Laskennassa on käytetty Wish-tietokoneohjelmaa /8/, jossa ratkaistaan jatkuvuusyhtälö ($\phi = 1$), liikemääräyhtälö ($\phi = \text{nopeuskomponentti } u_i$), energiayhtälö ($\phi = \text{entalpia } h$), turbulenssienergian yhtälö ($\phi = k$) ja dissipaatioyhtälö ($\phi = \epsilon$). Kaikki edellä mainitut yhtälöt ovat muotoa

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho v\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S_\phi, \quad (16)$$

jossa eri taseyhtälöitä vastaavat termit Γ_ϕ ja S_ϕ ovat taulukossa 4.

Taulukko 4. Virtauksen laskentayhtälöt.

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x}$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + (\rho - \rho_0) g_i$
k	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_k$	$G_1 - \rho\epsilon + G_2$
ϵ	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_\epsilon$	$G_1 C_1 \epsilon/k - C_2 \rho \epsilon^2/k + C_3 \epsilon/k G_2$
h	$\mu_{\text{eff}}/\sigma_h$	0

$$G_1 = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$$

$$G_2 = - \frac{g_i}{\rho} \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu$$

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2/\epsilon$$

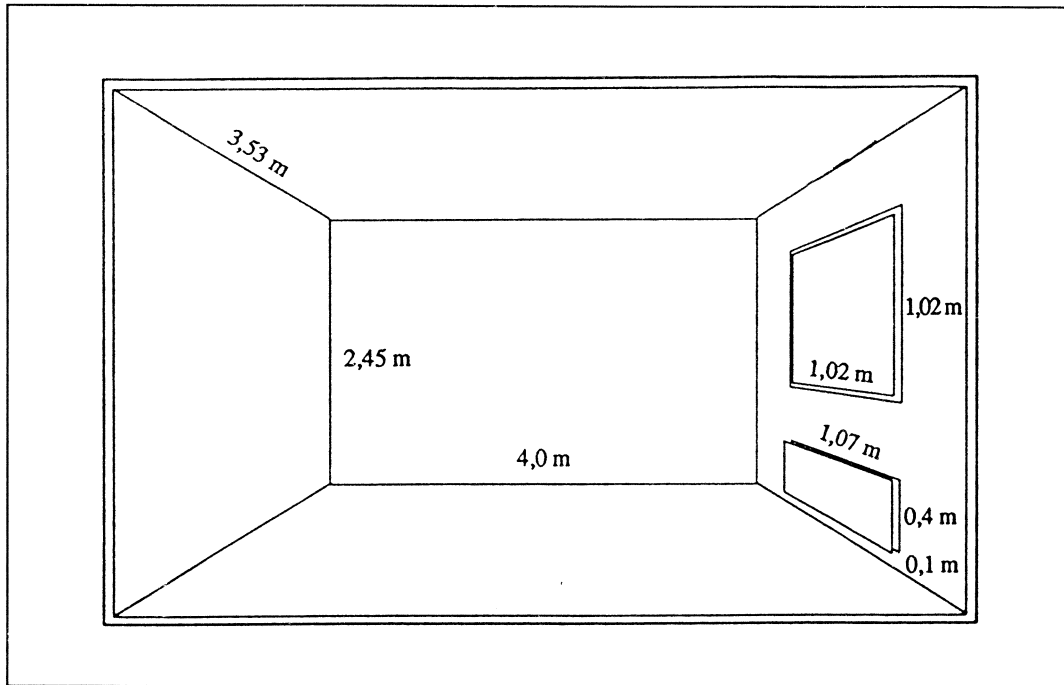
$$C_1 = 1,44, C_2 = 1,92, C_3 = 1,44, C_\mu = 0,09$$

$$\sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,3, \sigma_h = 0,9$$

Huone jaetaan noin 10 000 laskentakoppiin, joille edellä mainitut yhtälöt ratkaistaan. Ratkaisu on iteratiivinen ja vie tyypillisesti tunnin CRAY-supertietokoneen keskusyksikköaikaa. Tässä tapauksessa nopeus- ja entalpiayhtälöiden vahva kytkentä lisää laskenta-aikaa.

2.3.2 Vedottomuuslaskelmat

Laskelmien tarkoituksena oli vähentää koehuoneissa tehtäviä mittauksia. Puhallus tapahtui ikkunan yläpuolella olevasta raosta ylöspäin tai radiaalisesti katon rajasta, jolloin puhalluskulma oli 180° ja venttiililautasen halkaisija 150 mm. Laskenta-huoneen geometria on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Laskennassa kuvatun huoneen geometria.

Lasketut tapaukset ja oleskelualueen suurin vetoon tyytymättömien määrä on esitetty taulukossa 5. Vedon todennäköisyys sisältää ilman nopeuden, lämpötilan ja turbulenssin yhteisvaikutuksen Fangerin vetokriteerin mukaan, joka esitetään tarkemmin luvussa 3.3.

Taulukosta 5 havaitaan, että ikkunan päältä ylös puhallettaessa ei vedottomuutta

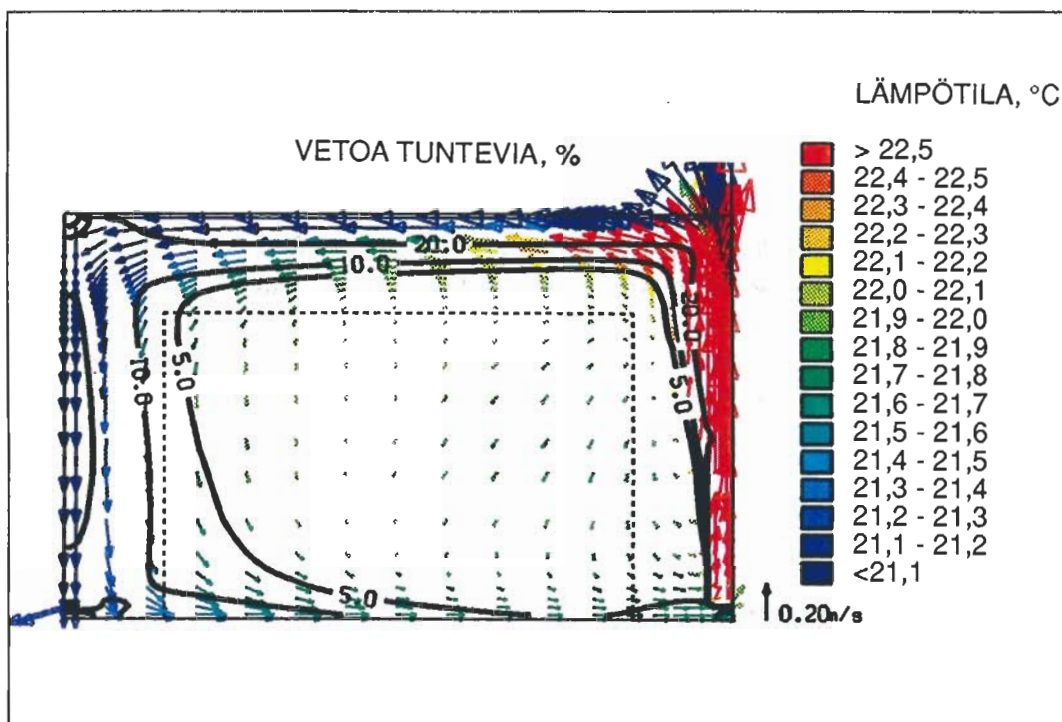
saavuteta, kun tuloilman lämpötila on 0 °C ja patteria ei käytetä. Lisäksi havaitaan, että -20 °C tilanteessa suurella ilman tulonopeudella ja leveällä tuloilma-aukolla on selvästi vetoa vähentävä vaikutus.

Taulukko 5. Oleskelualueen suurin vedon tunteen todennäköisyys eri laskentatapauksissa, kun kylmää ulkoilmaa puhallettiin huonetilaan 8 dm³/s. Tapauksissa 1 - 8 ilma puhallettiin ikkunan yläpuolelta ylöspäin ja tapauksessa 9 puhallus tapahtui radiaalisesti (puhalluskulma 180° ja halkaisija 150 mm) katon pintaa pitkin huonetilaan. Ikkunan k-arvona käytettiin arvoa 1,8 W/m²K. Lämmitysteho säädettiin samaksi kuin ilmanvaihdon tuoma jäähdytysteho.

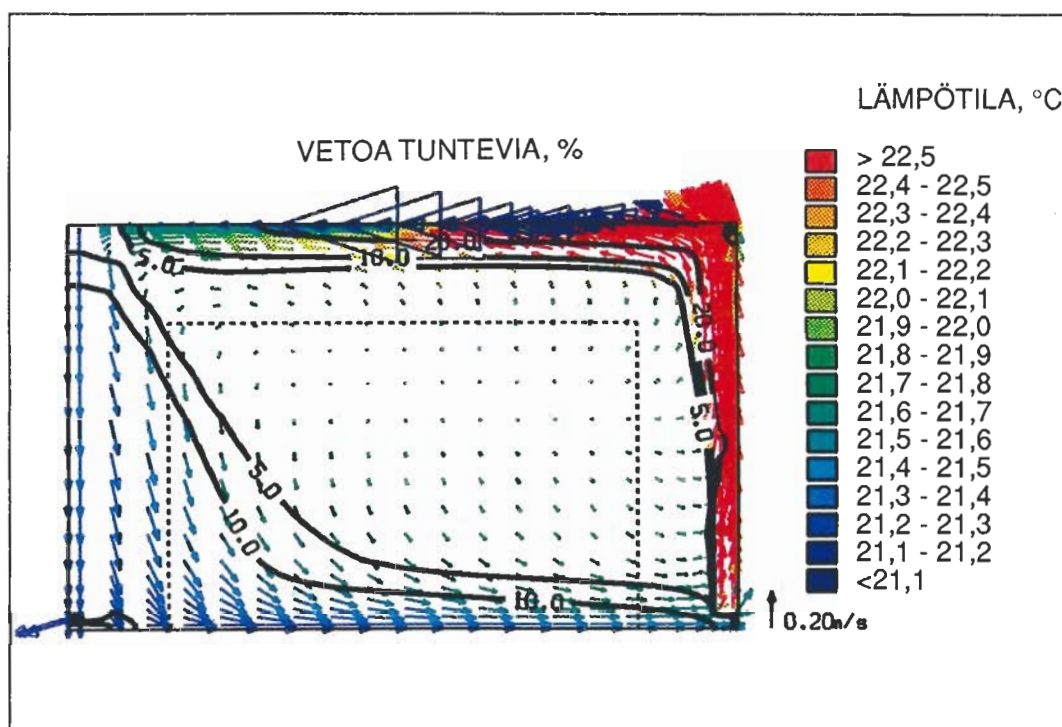
Laskenta- tapaus	Tuloaukon leveys tai halkaisija m	v m/s	T _{sp} °C	Lämmitys- tapa	Oleskelualueen suurin vedon tunteen toden- näköisyys, %
1	0,15	3	-20	patteri	11
2	0,15	1	-20	patteri	40
3	1,00	1	-20	patteri	25
4	0,15	2	-20	patteri	18
5	0,15	2	0	lattia	100
6	1,00	2	-20	patteri	16
7	1,00	1,6	0	lattia	100
8	1,00	3,3	0	lattia	100
9	0,15	3	-20	patteri	19

Laskentatapauksen 1 ja 9 tulokset huoneen keskitasossa on esitetty kuvissa 18 ja 19. Laskelmien perusteella puhallus leveästä raosta ikkunan päältä ylöspäin näyttää suotuisalta, kun ikkunan alla on konvektiivisesti lämmittävä patteri. Patteritehon ollessa nolla vetoa on vaikea välttää. Vaakasuora säteittäinen puhallus katon rajasta on huoneen yläosassa vedottomampi kuin edellä mainittu seinää pitkin ylöspäin suunnattu puhallus, mutta huoneen alaosassa molemmilla sivuilla se on vetoisampi.

Laskelmista saatuja tuloksia on käytetty suunniteltaessa täysmittakaavakokeita. Täysmittakaavakokeiden tulokset, joita esitetään luvussa 3, tukevat edellä mainittuja, laskelmien pohjalta tehtyjä johtopäätöksiä.



Kuva 18. Vedon tunteen todennäköisyys, nopeus ja lämpötila huoneen keskitasossa, kun ikkunan yläpuolelta ylöspäin puhaltavan tuloaukon leveys on 0,15 m. Tuloilman nopeus on 3 m/s, lämpötila -20 °C ja tilavuusvirta 8 dm³/s.



Kuva 19. Vedon tunteen todennäköisyys, nopeus ja lämpötila huoneen keskitasossa radiaalisessa puhalluksessa katon pintaa pitkin. Tuloilman nopeus on 3 m/s, lämpötila -20 °C ja tilavuusvirta 8 dm³/s.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Chen, C.J. & Rodi W. Vertical turbulent buoyant jets. A review of experimental data. Oxford 1980. Pergamon Press. 83 s.
- /2/ Farex A/S. Luftfördelning, dimensionering av tilluft. 1989, 43 s.
- /3/ Grititlin, M. Zuluftverteilung in Räumen. Luft- und Kältetechnik, 1970:5, s. 247 - 257.
- /4/ Heikkinen J. Huonevirtauskentän laskennan perusteita. Espoo 1990. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 705. 83 s. + liitt. 2 s.
- /5/ Heikkinen J. Ilmanjako ja virtaukset huonetilassa. Ilmastointilaskelmat, 29.-31.1.1991. Helsinki 1991. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, INSKO. Julkaisu 11-91 V. 33 s.
- /6/ Hestad T. Dimensjonering av innblåsventiler, kaldluft-nedfall. Norsk VVS. 1976:6, s. 380 - 392.
- /7/ ISO 5219. Air distribution and air diffusion - Laboratory aerodynamic testing and rating of air terminal devices. International Organization for Standardization, 1984. 38 s.
- /8/ Lemaire T. User manual WISH. Delft 1990. TNO - Institute of Applied Physics.
- /9/ Nielsen P.V. Models for the prediction of room air distribution. 12th AIVC Conference on Air Movement and Ventilation Control within Buildings, Ottawa, 1991. Vol. 1, s. 55 - 71.
- /10/ Skåret E. Luftbevegelse i ventilerte rom. Trondheim 1976. Inst. for VVS, NTH, Tapir. 85 s.

3 VEDOTTOMUUSKOKEET

3.1 JOHDANTO

Vedottomuuslaskelmien perusteella päätettiin täysmittakaavakokein tarkastella kahta puhallustilannetta. Ensimmäisessä tapauksessa kylmä tuloilma puhalletaan pitkästä raosta ikkunan päältä ylöspäin. Toisessa tapauksessa puhallus tapahtuu katon rajasta vaakasuoraan säteittäisesti. Kolmantena tapauksena päätettiin tutkia säteittäistä monisuutinpuhallusta seinästä ikkunan yläpuolelta.

Vetoisuuteen tai vedottomuuteen vaikuttavat paitsi itse tuloilmasuihkun ominaisuudet myös virtausta ohjaavat rakenteet, kuten verholauta ja patterin konvektiovirtauksen esteet, kuten verhot. Kokeissa on tarkasteltu myös näiden tekijöiden vaikutusta.

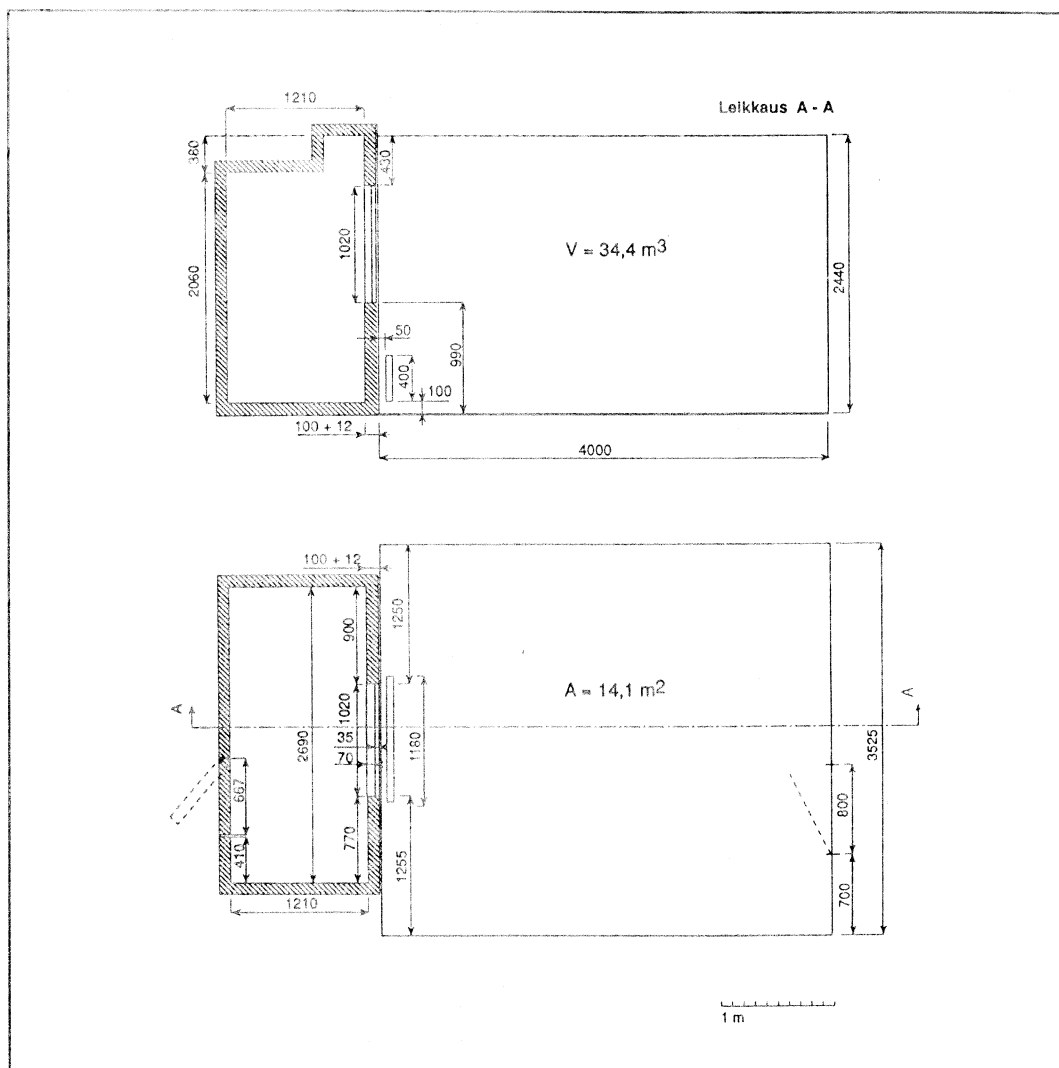
3.2 KOEHUONEET JA MITTALAITTEET

Mittaukset tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen LVI-tekniikan laboratorioon rakennetuissa koehuoneissa. Puhallusta ikkunan päältä ylös ja säteispuhallusta katonrajasta tutkittiin koehuoneessa I. Säteittäistä suutinpuhallusta ikkunaseinältä tutkittiin koehuoneessa II.

3.2.1 Koehuone I

Laboratoriahalliin rakennetun koehuoneen I tilavuus oli 34,4 m³, lattiapinta-ala 14,1 m² ja korkeus 2,44 m (kuva 1).

Koehuoneessa oli kaksi ikkunaa, joista toinen rajoittui kylmäkammioon ja toinen laboratoriahalliin, jonka lämpötila oli likimain sama kuin koehuoneessa. Kylmäkammioon rajoittui puupuitteinen, kolmikertainen ikkuna, jonka lämmönläpäisykerroin oli noin 1,9 W/m²K. Lasipinta oli kooltaan 1,02 x 1,02 m². Laboratoriahalliin rajoittuva ikkuna oli 1,2 x 2,4 m²:n kokoinen akryylilevy.

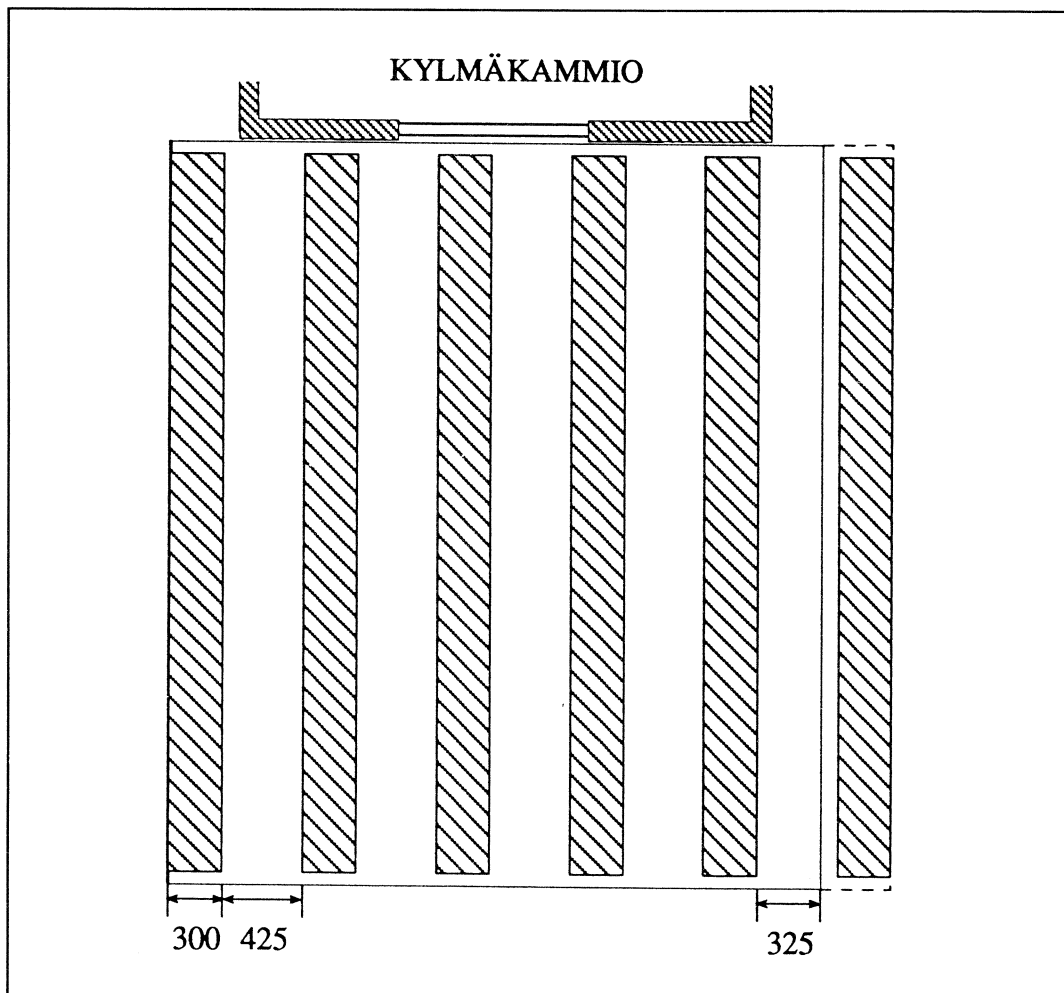


Kuva 1. Mittauksissa käytetty koehuone I, jossa tutkittiin puhallusta ikkunan päältä ylös ja säteispuhallusta katonrajasta.

Seinät oli rakennettu 12 mm lastulevystä, minkä lisäksi kylmäkammion kohdalla oli alumiinipintainen 100 mm:n solupolyuretaanilevy. Lattia koostui sisältä lukien muovimatosta, 19 mm:n lastulevyistä ja 50 mm:n solupolystyreenilevyistä, jonka alla oli betonilattia. Sisäkatto oli rakennettu 50 mm:n solupolystyreenilevyistä. Valaisimien kohdalla oli 20 mm:n kasvihuonekennokate. Lisäksi seinät, lattia ja katto oli maalattu mattamustalla maalilla.

Tuloilma johdettiin huoneeseen kylmäkammiosta, jonka lämpötila oli säädettävissä samoin kuin tuloilmaelimeen johdetun ilman tilavuusvirta.

Talvitilanteessa, jolloin tuloilman lämpötila oli $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämmönlähteenä käytettiin ikkunan alle asennettua $0,40 \times 1,18\text{ m}^2$:n kokoista sähköpatteria, jonka etäisyys ikkunaseinästä oli 50 mm. Patterin teho säädettiin samaksi kuin ilmanvaihdon tuoma jäähdysteho. Sähköpatteri luovutti valmistajan ilmoituksen mukaan vain noin 15 % lämmöstä säteilynä ja loput konvektion avulla. Säteilyn osuutta pienennettiin vielä asettamalla patterin eteen 50 mm:n etäisyydelle patterin kokoinen alumiinilevy. Huoneilman lämpötila pidettiin asetusarvossaan, $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, säätimellä, joka ohjasi lattiapinnan alle asennettuja kalvomaisia lämmityselementtejä (kuva 2).



Kuva 2. Koehuoneen I lämmityselementtien sijainti lattialla.

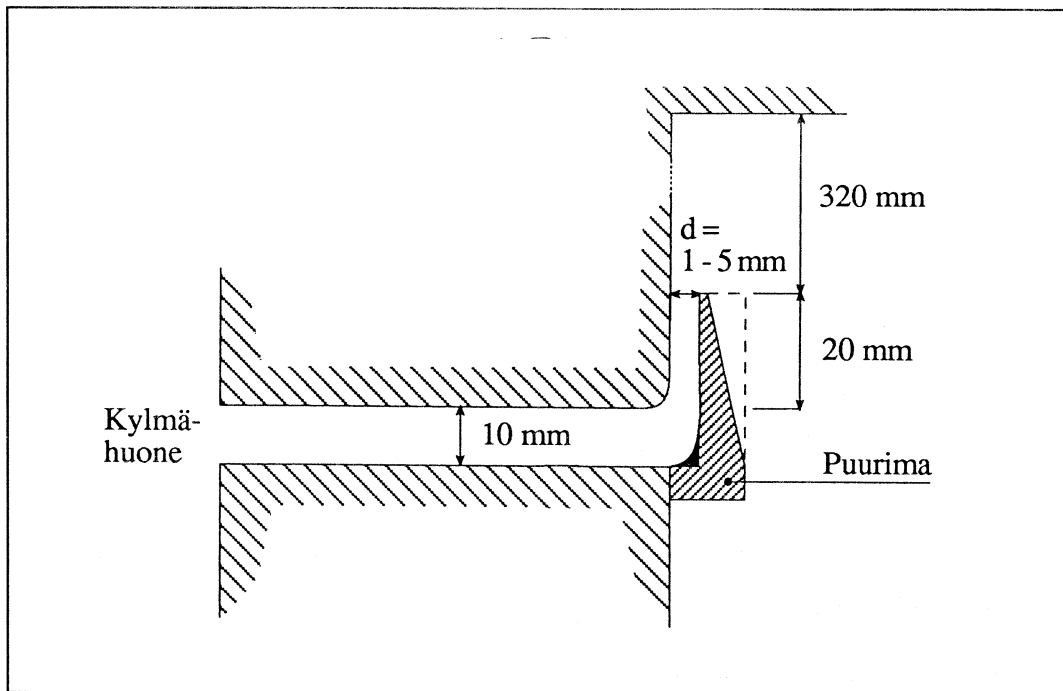
Kevätilanteessa, jolloin tuloilman lämpötila oli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, patterilämmitystä ei käytetty ja lämmön lähteenä käytettiin yksinomaan lattialämmitystä.

On huomattava, että koehuone oli alun perin leveämpi kuin kuvassa 1 on esitetty. Huoneen kaventamisen seurauksena kuvassa 2 oleva oikeanpuoleinen lämmityselementti jäi huoneen ulkopuolelle.

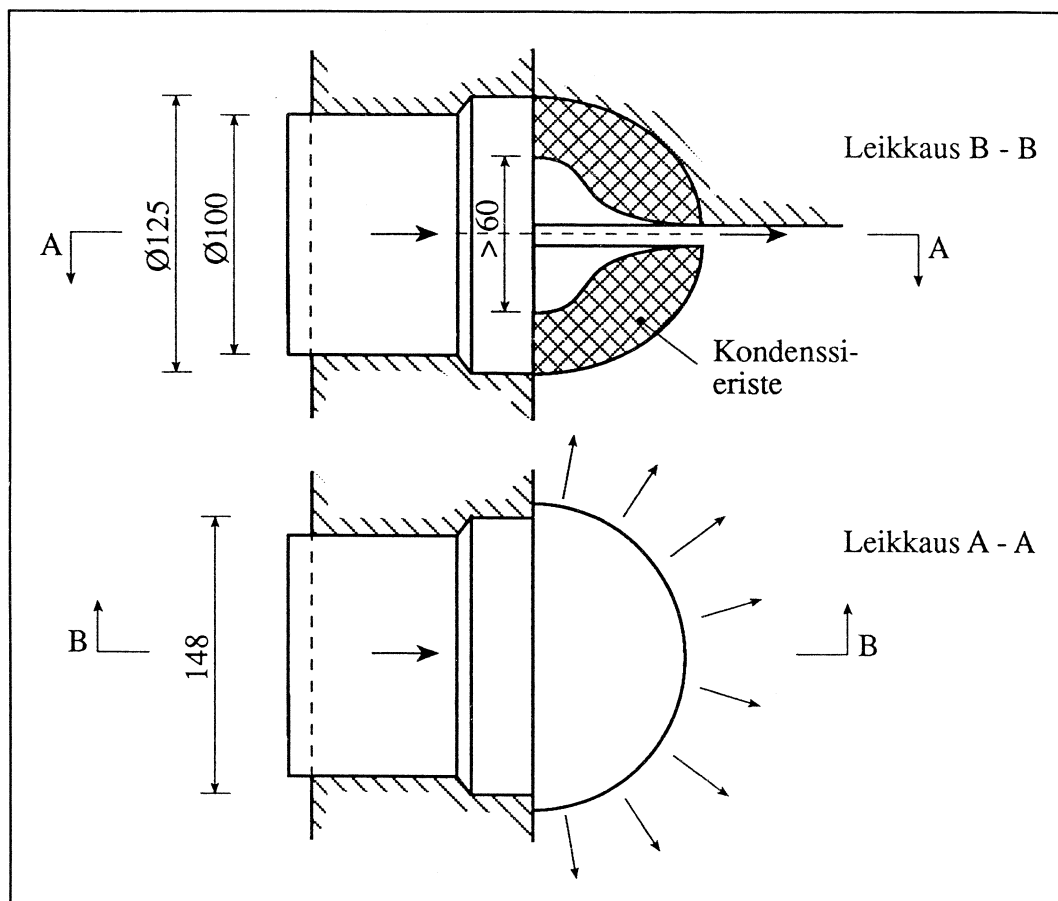
Koehuoneen valaistuksena oli neljä koehuoneen sisäkaton yläpuolella, kasvihuonekennokatteen takana olevaa 36 W:n loistelamppua.

Koehuoneessa on tutkittu kahta erilaista tuloilmaelintä: ikkunan yläpuolelle asennettua, metrin pituista puhallusrakoa, joka suuntaa ilmavirran seinää pitkin ylöspäin (kuva 3) ja katon rajasta säteittäisesti puhaltavaa elintä, "pääskynpesää" (kuva 4).

Tuloilmaelimelle tulevan ilman tilavuusvirta mitattiin laippaputkella kylmäkammiossa. Tilavuusvirta muunnettiin laskennallisesti ilman tiheyteen $1,2 \text{ kg/m}^3$. Tuloilmakanava laajeni tasauskammioiksi ennen tuloilmaelintä. Paine-ero elimen yli mitattiin mikromanometrillä. Poistoilmaelin sijaitsi oviseinän yläosassa, josta ilma johdettiin takaisin kylmäkammioon.



Kuva 3. Ikkunan päälle asennettu 1 m:n pituinen tuloilmarako. Ilmasuihkun lähtönopeutta voidaan säätää raon leveyttä d muuttamalla.



Kuva 4. Säteispuhallus katon rajasta, "pääskynpesä".

Ilman lämpötilaa mitattiin laboratorihallista koehuoneen vierestä 1 m:n korkeudelta, koehuoneen yläpuolelta, kylmäkammiosta, mittalaipasta ylävirran puolelta, ilmavirran tasauskammista, tuloilmaelimen lähtöaukosta, poistoilmakanavasta ja koehuoneen keskeltä eri korkeuksilta (0,1 m, 1,1 m, 1,7 m ja 2,3 m lattiasta). Pintalämpötilaa mitattiin ikkunan sisälasista 1/4-, 1/2- ja 3/4- korkeudelta ikkunan alareunasta lukien, patterista vastaavilta korkeuksilta, patterin säteilysuojan ulkopinnasta (keskeltä), ikkunaseinästä (ikkunan ja sivuseinän puolesta välistä, 1,2 m:n korkeudelta), oviseinästä (keskeltä), laboratorihalliin rajoittuvasta sivuseinästä (sekä seinäosan että akryylilevyn keskeltä), vastakkaisesta sivuseinästä (keskeltä), katosta (keskeltä, huoneen keskilinjalta 1 m ikkunaseinästä ja lamppujen kohdalta) sekä lattiasta (keskeltä ja huoneen keskilinjalta 0,6 m ikkunaseinästä). Ikkunan pintalämpötilat mitattiin termoelementeillä ja muut lämpötilat termistoreilla.

Lisäksi mitattiin kylmät patterin tuloliuoksen lämpötila, paine-ero tuloilmaelimen yli, paine-ero mittalaipan yli ja koehuoneen ilman kosteus. Lämmityspatterin

sähköteho asetettiin säätömuuntajalla ja mitattiin tehomittarilla.

Ilman paikalliset lämpötilat, nopeudet ja keskihajonnat mitattiin DANTEC 54N10 -monikanava-analysaattorilla, johon oli kytketty aluksi kolme ja myöhemmin kuusi DANTEC 54R10 suuntariippumatonta kuumakalvoanturia. Antureista tulevat jännitesignaalit johdettiin väliotolla HP 86B -tietokoneelle, jossa anturikohtaisten kalibrointiyhtälöiden avulla jännitteet muunnettiin ko. mittaussuureiksi. Nopeuksista laskettiin kullekin anturille 3 minuutin keskiarvo ja keskihajonta käyttäen 320 mittaussuureita anturia kohden. Vastaava lämpötila mitattiin kunkin jakson alussa.

Muiden mainittujen mittaussuureiden vasteet johdettiin HP 3497A -tietojenkeruulaitteistolle ja sitä kautta HP 86B-tietokoneelle. Mittausohjelma piirsi kuvaruutuun seuraavien paikkojen lämpötilat ajan funktiona: tuloilman, ikkunapinnan, lämmityspatterin ja lattian pinnan sekä ilman lämpötilan keskeltä huonetta 1,1 m:n korkeudelta. Näiden avulla tarkkailtiin säätimien toimintaa ja koeolojen vakaantumista muutostilanteissa. Edellisen lisäksi mittausohjelma tulosti kuvaruudulle paine-eron tuloilmaelimen yli, tilavuusvirran ilman tiheydessä $1,2 \text{ kg/m}^3$, ilmanvaihdon jäähdytystehon ja asetetun patteritehon. Mittaustulokset tallennettiin levykkeille ja tulostettiin kirjoittimella.

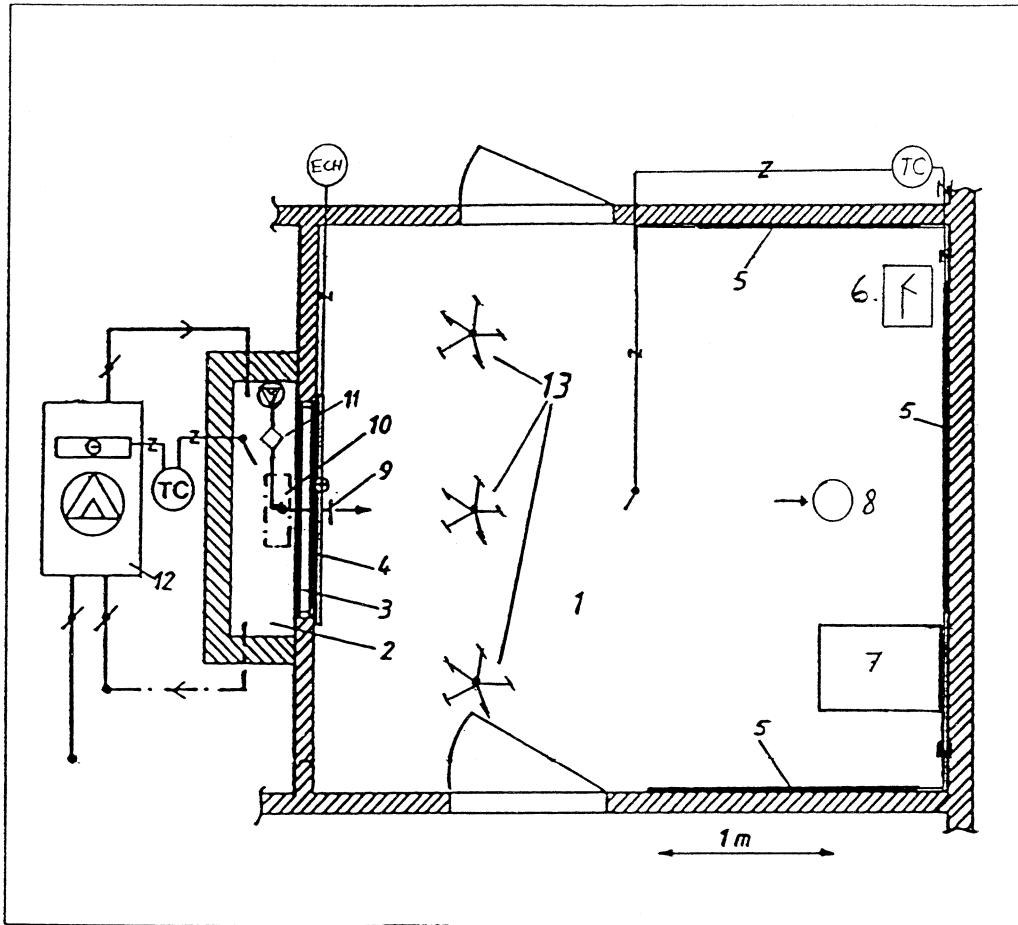
Erikseen mitattiin ilman paine barometrillä sekä paine-ero laboratoriohallin ja koehuoneen välillä mikromanometrillä.

3.2.2 Koehuone II

Laboratoriohalliin rakennetun koehuoneen II tilavuus oli $31,6 \text{ m}^3$, lattiapinta-ala $12,6 \text{ m}^2$ ja korkeus $2,5 \text{ m}$ (kuva 5).

Koehuoneessa oli yksi puupuitteinen, kolminkertainen ikkuna, joka rajoittui kylmäkammioon ja kaksi ovea, jotka rajoittuivat laboratoriohalliin. Ikkunan lämmönläpäisykerroin oli noin $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lasipinta oli kooltaan $1,02 \times 1,02 \text{ m}^2$. Laboratoriohalliin rajoittuvissa ovissa oli $0,6 \times 0,8 \text{ m}^2$:n akryylilevyt. Sivuseinät olivat rapattua tiiltä. Päätyseinät oli rakennettu lastulevystä, minkä lisäksi kylmäkammion kohdalla oli alumiinipintainen 100 mm :n solupolyuretaanilevy. Lattia

koostui sisältä lukien muovimatosta, 19 mm:n lastulevyistä ja lämmöneristeestä, jonka alla oli betonilattia. Sisäkatto oli rakennettu 50 mm:n solupolystyreenilevyistä. Valaisimien kohdalla oli 20 mm:n kasvihuonekennokate. Lisäksi seinät, lattia ja katto oli maalattu mattamustalla maalilla.



Kuva 5. Mittauksissa käytetty koehuone II, jossa tutkittiin säteittäistä suutinpuhallusta seinästä ikkunan yläpuolelta.

1. koehuone
 2. kylmäkammio
 3. ikkuna, aukko 1200 x 1200
 4. levy patteri 600 x 1300
 5. lämmityselementti seinissä
 6. ilmankostutin
 7. työpöytä
 8. poistoventiili katossa
 9. ulkoilmaventtiili
 10. ilmavirran tasauskotelo
 11. tilavuusvirran mittari (laippaputki)
 12. kylmäilmakoje
 13. siirrettävät jalustat lämpötila- ja nopeusantureille
- TC lämpötilan säädin
ECH säätömuuntaja.

Kylmäkammion lämpötila ja paine koehuoneeseen nähden olivat säädettävissä samoin kuin tuloilmaelimeen johdetun ilman lämpötila ja tilavuusvirta.

Talvitilanteessa, jolloin tuloilman lämpötila oli $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämmönlähteenä käytettiin ikkunan alle asennettua $0,6 \times 1,3\text{ m}^2$:n kokoista sähköpatteria, jonka teho säädettiin samaksi kuin ilmanvaihdon tuoma jäähdysteho. Etäisyys ikkunaseinästä oli 50 mm . Patteri oli rakenteeltaan läpivirtaustyyppinen, kuten koehuoneessa I, mutta sen säteilylämmönsiirron osuutta ei ollut tiedossa: Myös tästä patterista lämmön siirtymistä säteilyn kautta vähennettiin asettamalla patterin eteen 50 mm :n etäisyydelle patterin kokoinen alumiinilevy. Huoneilman lämpötila pidettiin asetusarvoon, $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, säätimellä, joka ohjasi seinäpinnoille asennettuja mustaksi maalattuja, kalvomaisia kattolämmityselementtejä.

Kevätilanteessa, jolloin tuloilman lämpötila oli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämmönlähteenä käytettiin ainoastaan edellä mainittuja lämmityselementtejä. Koehuoneen valaistuksena oli neljä koehuoneen sisäkaton yläpuolella, kasvihuonekennokatteen takana olevaa loistelamppua.

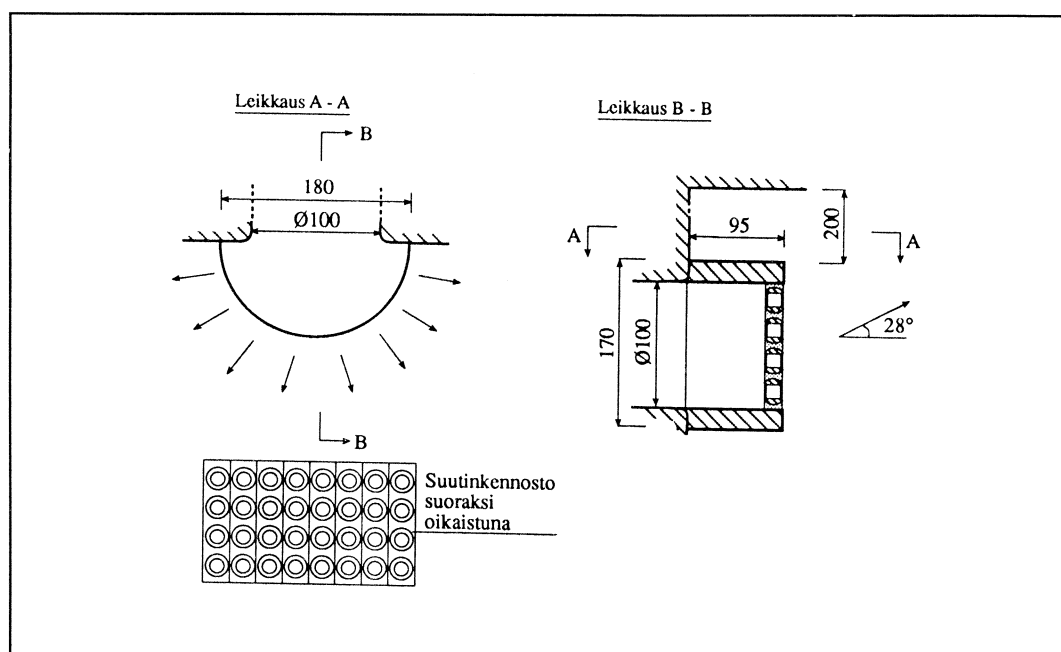
Koehuoneessa on tutkittu säteittäistä monisuutinpuhallusta seinästä ikkunan yläpuolelta, ns. "suutinpönttöä" (kuva 6).

Tuloilmaelimelle tulevan ilman tilavuusvirta mitattiin laippaputkella tulokanavasta. Todellinen tilavuusvirta muunnettiin laskennallisesti vastaamaan tilannetta, jossa ilman tiheys on $1,2\text{ kg/m}^3$. Tuloilmakanava laajeni tasauskammioksi ennen tuloilmaelintä. Paine-ero elimen yli mitattiin mikromanometrillä. Poistoilmaelin sijaitsi katossa huoneen keskilinjalla $0,5\text{ m}$ ikkunan vastaisesta seinästä, josta ilma johdettiin laboratoriohalliin.

Ilman lämpötilaa mitattiin kylmäkammion tulo- ja poistoputkista, mittalaidasta ylävirran puolelta, ilmavirran tasauskotelosta, tuloilmaelimen lähtöaukosta ja koehuoneen keskeltä eri korkeuksilta ($0,1\text{ m}$, $1,1\text{ m}$ ja $1,7\text{ m}$ lattiasta). Pintalämpötilaa mitattiin ikkunan sisälasista 1/4-, 1/2- ja 3/4-korkeudella ikkunan alareunasta lukien, patterista (keskeltä ja molemmilta reunoilta) sekä

lattiasta (0,6 m ikkunaseinästä huoneen keskilinjalla). Kaikki lämpötilat mitattiin termoelementeillä.

Lisäksi mitattiin kylmät patterin tulo- ja poistoliuoksen lämpötilat ja ilman lämpötila kylmät patterin jälkeen.



Kuva 6. Säteispuhallus seinältä, "suutinpönttö".

Ilman paikalliset lämpötilat, nopeudet ja keskihajonnat mitattiin DANTEC 54N10 -monikanava-analysaattorilla, johon oli kytketty yhdeksän DANTEC 54R10 suunta-riippumatonta kuumakalvoanturia. Antureista tulevat jännitesignaalit johdettiin väliotolla HP 86B-tietokoneelle, jossa anturikohtaisten kalibrointiyhtälöiden avulla jännitteet muunnettiin ko. mittaussuureiksi. Nopeuksista laskettiin 3 minuutin keskiarvo ja keskihajonta käyttäen 320 mittaussarvoa anturia kohden. Vastaava lämpötila mitattiin kunkin jakson alussa.

Ilman suhteellinen kosteus mitattiin 1,1 m:n korkeudelta elektronisella anturilla.

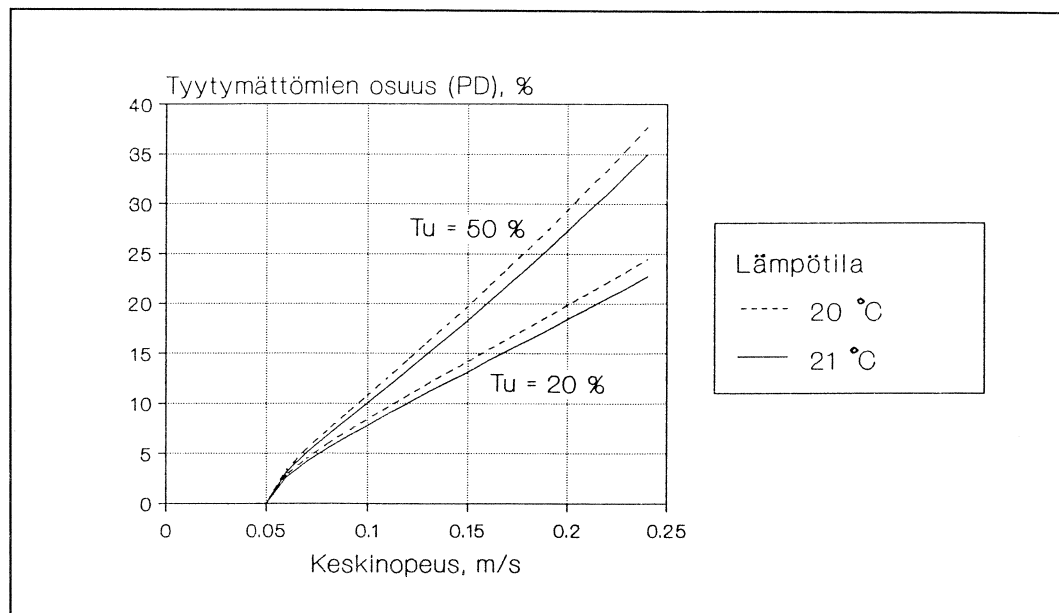
Edellä mainittujen mittaussuureiden vasteet johdettiin HP 3497A -tietojenkeruulaitteistolle ja sitä kautta HP 86B -tietokoneelle. Mittaustulokset tallennettiin levykeille ja tulostettiin kirjoittimella.

Lisäksi seurattiin analogisella monipistepiirturilla huoneilman lämpötilaa koehuoneen keskeltä 1,1 m korkeudelta, ulkoilman lämpötilaa kylmäkammiossa ja ilmapirran tasauskotelossa sekä pintalämpötilaa lämmityspatterista ja ikkunan sisälasista. Näiden lämpötilojen avulla tarkkailtiin säätimien toimintaa ja koeolojen vakaantumista muutostilanteissa.

Erikseen rekisteröitiin huoneilman suhteellinen kosteus mekaanisella kosteuspiirturilla. Lämmityspatterin teho asetettiin säätömuuntajalla ja mitattiin wattimittarilla.

3.3 VETOKRITEERIT

Veto on ilman liikkeen aiheuttamaa jonkin kehon osan jäähtymistä, joka koetaan epämiellyttävänä, vaikka henkilöllä ei muuten varsinaisesti ole kylmä. Vedon tunteminen on yksilöllistä. Sen esiintymistodennäköisyys voidaan ilmaista PD-indeksinä eli tyytymättömien osuutena ($PD = \text{Predicted Percentage of Dissatisfied}$). Tyytymättömien osuus riippuu ilman ajallisen keskinopeuden lisäksi nopeusvaihteluista eli turbulenssiasteesta sekä lämpötilasta, joiden vaikutus nähdään kuvasta 7.



Kuva 7. Tyytymättömien osuus ilman keskinopeuden suhteen tämän julkaisun kokeissa tyypillisillä lämpötiloilla ja turbulenssiasteilla (Tu).

Kuva 7 perustuu niskaan kohdistuvaan ilmasuihkuun, joka on vedon tuntemisen kannalta kehon herkin osa. Mallia voidaan kuitenkin käyttää kaikille kehon osille,

jos ne eivät ole esimerkiksi pitkien hihojen, housujen tai sukkien peitossa. Muussa tapauksessa malli antaa noin 5 %-yksikköä liian suuren PD-indeksin /2/. Mallin matemaattinen muoto on /2/

$$PD = (34 - T_a)(V - 0,05)^{0,6223}(0,369VTu + 3,143) , \quad (1)$$

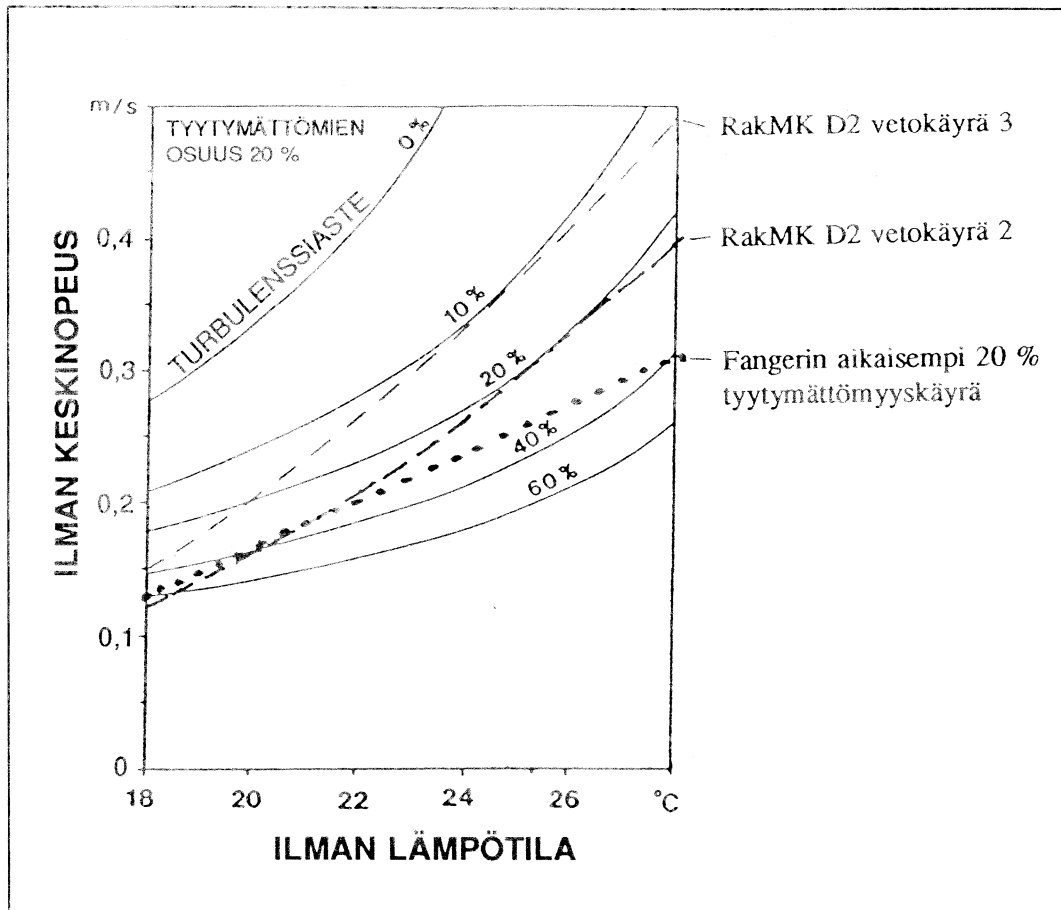
jossa PD on ennakoitu tyytymättömien osuus [%],
T_a ilmvirran lämpötila [°C],
V ilmvirran keskinopeus [m/s] ja
Tu ilmvirran turbulenssiaste [%].

Jos keskinopeus on tuloksia analysoitaessa alle 0,05 m/s, sijoitetaan yhtälöön (1) arvo 0,05 m/s. Yli 100 %:n PD-indeksit tulkitaan 100 %:ksi. Malli pätee vain istuvaan tai lepäävään henkilöön.

Kuvassa 8 on verrattu 20 %:n tyytymättömyyskäyrästä Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 /3/ vetokäyriin ja Fangerin aikaisempaan 20 %-käyrään, joissa turbulenssiaste ei ole muuttujana /1/.

Kuvasta 8 havaitaan, että turbulenssiasteen ollessa 30 - 40 % rakentamismääräyskokoelman vetokäyrä 2 ja Fangerin aikaisempi vetokäyrä ovat lähellä Fangerin uudempaa vetomallia ulkoilmaventtiilien kannalta kiinnostavalla lämpötila-alueella alle 21 °C. Tuotekehityksen kannalta tärkeää on, että pienillä turbulenssiasteilla voidaan kaavan (1) mukaan sallia huomattavan suuria keskinopeuksia. Tässä tutkimuksessa on käytetty vedon arviointiin turbulenssiasteen huomioon ottavaa vetomallia (yhtälö 1).

Vetoisuutta arvioitaessa Fangerin mallilla on tyytymättömien osuudet jaettu osaluokkiin 5 %-yksikön välein. Vetokriteerinä pidetään sitä, että oleskeluvyöhykkeellä tyytymättömien osuuden on oltava alle 20 %. Oleskeluvyöhykkeellä tarkoitetaan sitä huonetilan osaa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 m:n korkeudella lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista /3/.



Kuva 8. Ilman nopeuden, lämpötilan ja turbulenssin yhdistelmät, jotka aiheuttavat 20 %:lle henkilöistä vetoa. Fangerin aikaisempi vetokäyrä [1] on saatu kokeissa, joissa turbulenssiaste oli 30 - 60 %.

3.4 MITTAUKSET

Koetilanteet simuloivat talvi- ja kevätkautta. Talvitilanteessa tuloilman lämpötila oli noin -20 °C. Ikkunan alapuolella olevaan konvektiiviseen patteriin asetettiin tuloilman lämmöntarvetta vastaava teho, joka on muotoa

$$P = c_p q_m \Delta T, \quad (2)$$

jossa c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti = 1 kJ/kgK,
 q_m tuloilman massavirta [kg/s] ja
 ΔT huone- ja tuloilman välinen lämpötilaero [K].

Huoneen lämpötila 1,1 m:n korkeudella pidettiin asetusarvossaan, 21 °C, lattia- tai seinälämmityksen avulla.

Kevätilanteessa tuloilman lämpötila oli noin 0 °C. Kokeissa simuloitiin tilannetta, jossa kevätaurinko lämmittää huonetta siinä määrin, että patteri kytkeytyy pois toiminnasta. Kuten talvitilanteessakin, lattia- tai seinälämmityksellä pidettiin huoneen lämpötila asetusarvossaan, 21 °C.

Kummassakin tilanteessa mittauksia on tehty eri tuloilmavirroilla ja tuloilma-aukon suuruutta muuttelemalla myös eri tuloilmanopeuksilla. Mittauksissa paine-erot tuloilmaelimen yli olivat alueella 0,3 - 30 Pa.

Kun lämpötilat kaikissa jatkuvan seurannan pisteissä olivat tasaantuneet niin, että muutosnopeudet olivat enintään noin 1 °C/h sekä sisä- ja ulkolämpötilojen ero poikkesi tavoitearvostaan enintään 2 °C, määritettiin voimakkaimman virtauksen alue merkkisavun avulla. Tältä alueelta mitattiin ilman nopeudet ja lämpötilat 3 minuutin keskiarvoina siten, että suurin PD-indeksi saatiin selville.

Ennen koetilanteen vetoisuuden analysointia mittauspisteiden lämpötilat muunnettiin suuntaissiiirroilla ja lämpötilasuhteiden avulla vastaamaan täsmälleen sisä- ja ulkolämpötilojen tavoitearvoja.

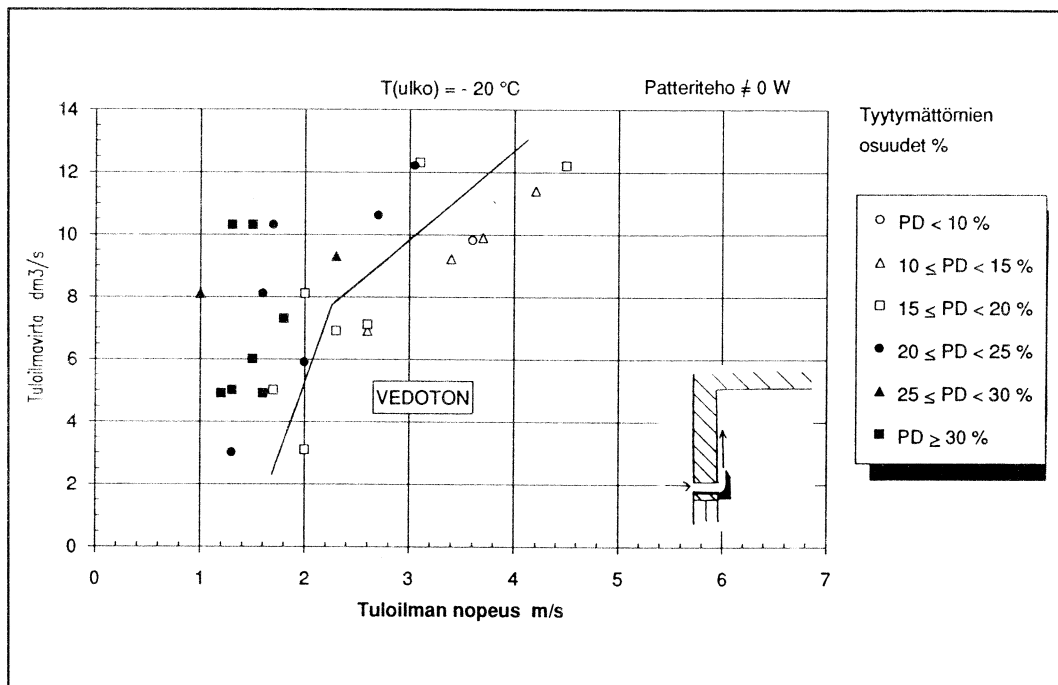
3.5 TULOKSET

Tulosten analysoinnissa on tarkasteltu muodostuvan virtauskentän kannalta kahta keskeisintä tekijää: tuloilman tilavuusvirtaa ja ilmasuihkun lähtönopeutta. Tällöin tilavuusvirta on ilmoitettu tiheydessä 1,2 kg/m³ ja lähtönopeus on saatu näin lasketun tilavuusvirran ja purkausaukon pinta-alan perusteella. Parametrina on käytetty turbulenssin huomioon ottavaa Fangerin vetoyhtälön antamaa tyytymättömyyden osuutta eli PD-indeksiä (yhtälö 1). Kun vetokriteerinä pidetään sitä, että PD-indeksin on oltava alle 20 %, saadaan kuviin, joissa tilavuusvirta esitetään lähtönopeuden funktiona, raja-alue, jonka toisella puolella kriteeri alittuu. Kuviin merkitty ulkolämpötila tarkoittaa puhallusraosta mitattua tuloilman lämpötilaa.

3.5.1 Rakolista

3.5.1.1 Talvitilanne

Kuvaan 9 on merkitty eri tuloilmavirroista ja -nopeuksista aiheutuneet tyytymättömien osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein.

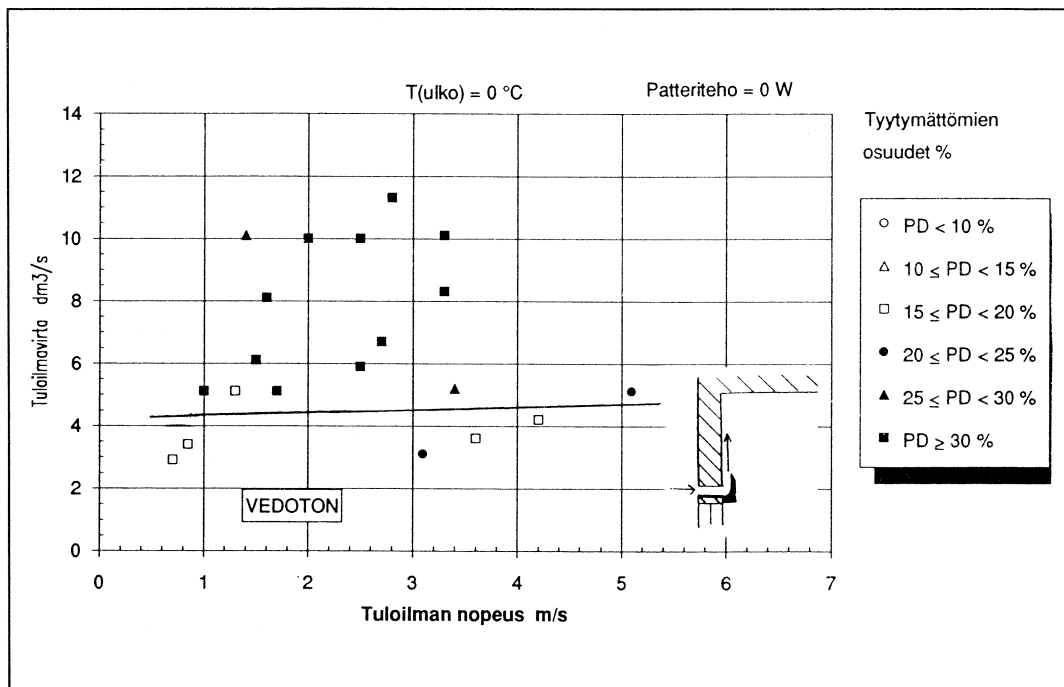


Kuva 9. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

Kuvaan 9 on merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri $PD < 20\%$ alittuu eli tilanne on vedoton. Esimerkiksi jos halutaan tuoda huoneeseen $8\text{ dm}^3/\text{s}$ ilmaa vedottomasti, on ilman lähtönopeuden oltava vähintään 2 m/s . Tässä tapauksessa, kun tuloilmaraon pituus on 1 m , on raon leveyden oltava alle 4 mm .

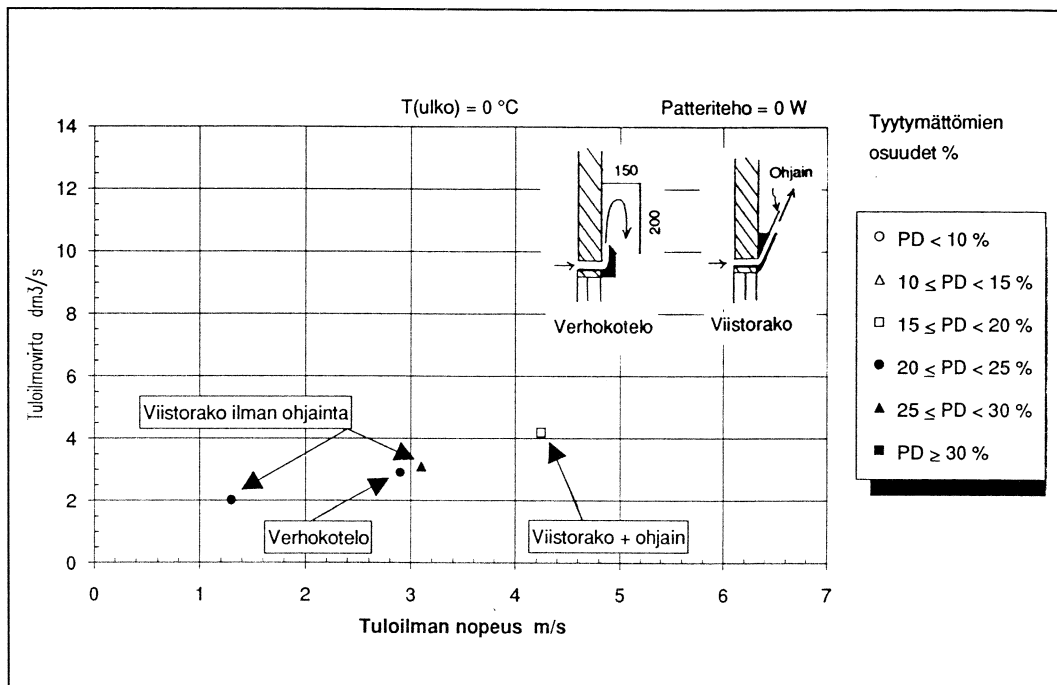
3.5.1.2 Kevättilanne

Kuvaan 10 on merkitty eri tuloilmavirtojen ja -nopeuksien aiheuttamat tyytymättömiä osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein. Kuvaan on myös merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri $PD < 20 \%$ alittuu eli tilanne on vedoton. Kuvasta havaitaan, että lämmityspatterin puuttuessa ikkunan alta on vedottomuutta vaikea saavuttaa, kun tuloilmavirta on yli $4 \text{ dm}^3/\text{s}$.



Kuva 10. Tyytymättömien osuudet kevättilanteessa. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös. Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.

Kuvaan 11 on merkitty verhokotelon ja viistoraon vaikutukset vedon muodostumiseen. Nämä mittaukset näyttävät osoittavan, että ilmasuihkua estävä verhokotelo lisää vedon vaaraa. Lisäksi näyttää siltä, että vinosti ylöspäin suunnattu suihku ei ole parempi ratkaisu kuin seinää pitkin ylöspäin suunnattu.

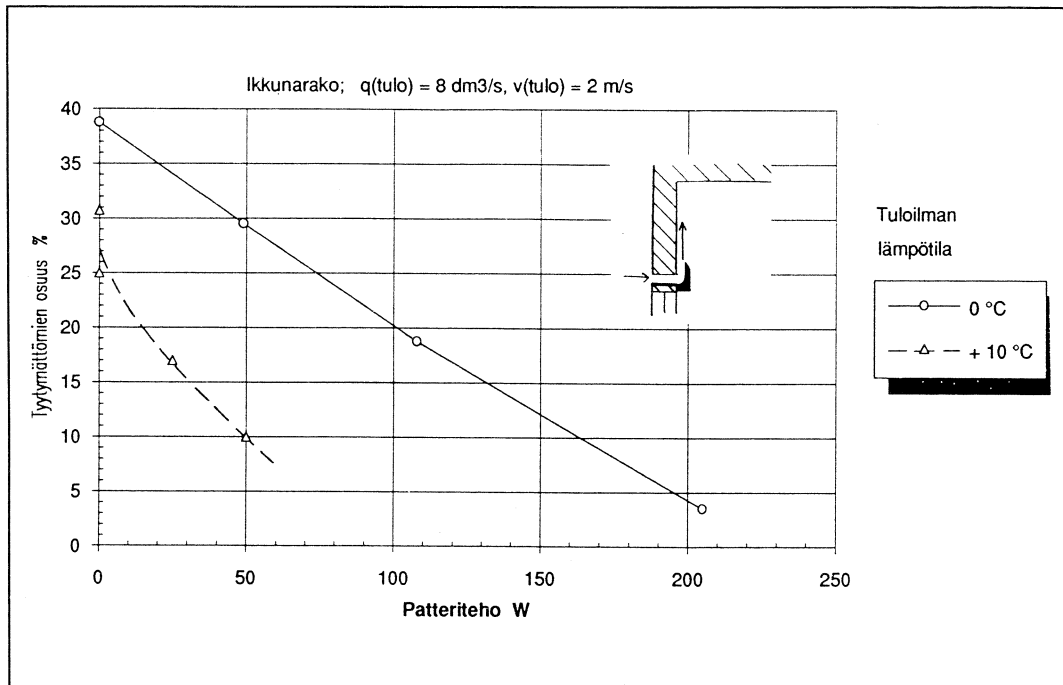


Kuva 11. Tyytymättömien osuudet kevättilanteessa. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös, eri muunnelmia. Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.

3.5.1.3 Patterilämmityksen vaikutus

Kuvassa 12 on tarkasteltu patteritehon vaikutusta vedottomuuteen eräässä toimintapisteessä (2 m/s, 8 dm³/s). Tuloilman lämpötila on 0 °C tai 10 °C. Vastaavat tuloilman lämmitystehon tarpeet ovat 202 W ja 106 W.

Kuvan 12 mukaan patteritehon lisääminen vähentää tyytymättömien osuutta lineaarisesti, keskimäärin lähes 20 %-yksikköä/100 W tuloilman lämpötilan ollessa 0 °C. Noin 100 W:n patteriteho riittää saamaan tilanteen vedottomaksi, jolloin tyytymättömien osuus ei kohoja yli 20 prosenttia. Tämä on vain noin puolet kyseessä olevan ilmavirran aiheuttamasta jäähdystehosta. Tuloilman lämmitystä vastaavalla tehon tarpeella tyytymättömien osuus on vain 4 %, kun se oli 15 - 20 %:n ulkolämpötilalla -20 °C (kuva 9). Tämä viittaa siihen, että patteritehoa ei saada siirtymään täysin tuloilmasuihkuun.



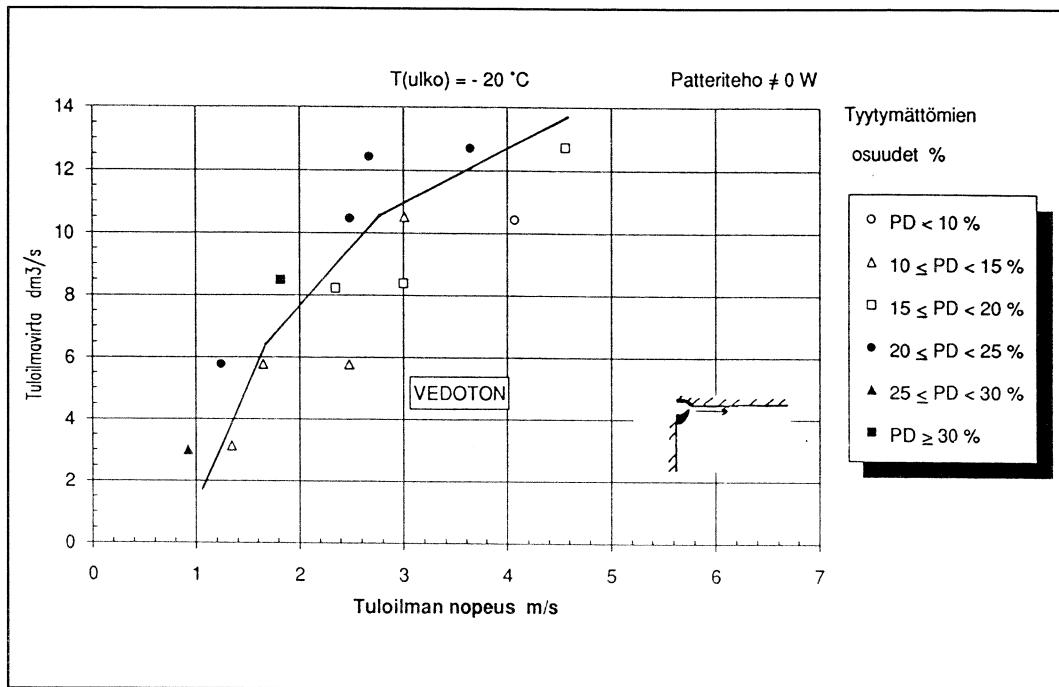
Kuva 12. Patterilämmityksen ja tuloilman lämpötilän vaikutus vedottomuuteen. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös. Ei verhoja.

Tuloilman lämpötilalla on selvä vaikutus tyytymättömien osuuteen. Tuloilman lämpötilan noustessa 0 °C:sta +10 °C:seen laskee tyytymättömien osuus noin 10 %-yksikköä, kun konvektiolämmitystä ei ole. Tämäkään ei kuitenkaan riitä saamaan tilannetta vedottomaksi, mutta hyvinkin pieni patteritehon lisäys muuttaa tilanteen suotuisaksi.

3.5.2 Säteispuhallus katonrajasta

3.5.2.1 Talvitilanne

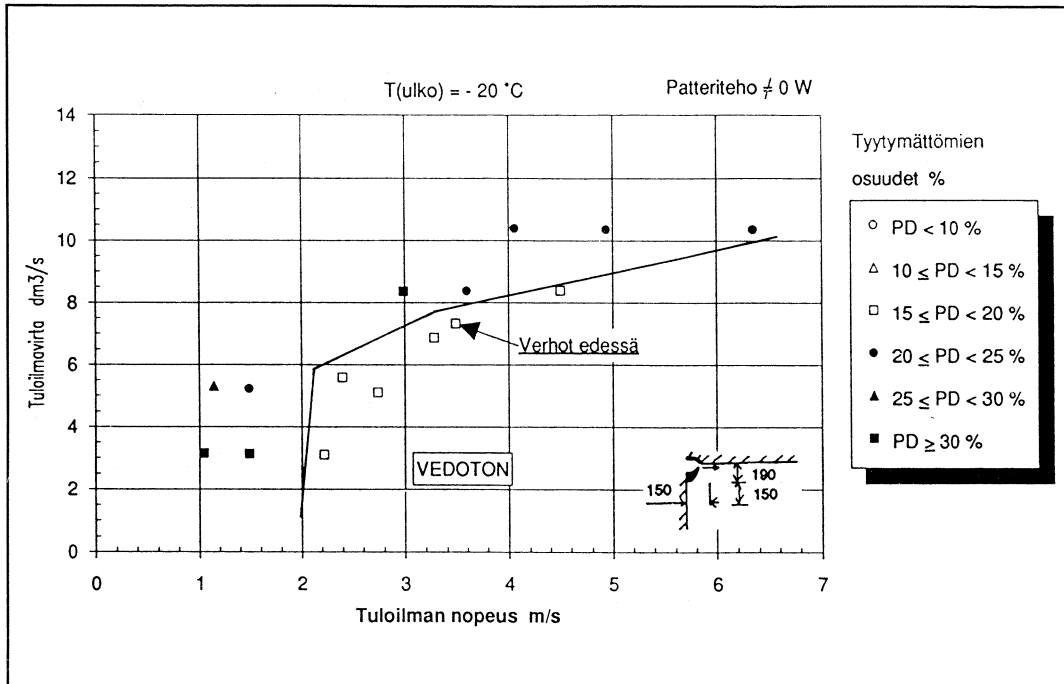
Kuvaan 13 on merkitty eri tuloilmavirroista ja -nopeuksista aiheutuneet tyytymättömien osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein. Kuvaan on myös merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri $PD < 20 \%$ alittuu, eli tilanne on vedoton. Jos asetetaan toimintapisteeksi 3 m/s ja $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, havaitaan, että toimintapisteessä ja sen ympäristössä vedottomuus on helppo saavuttaa.



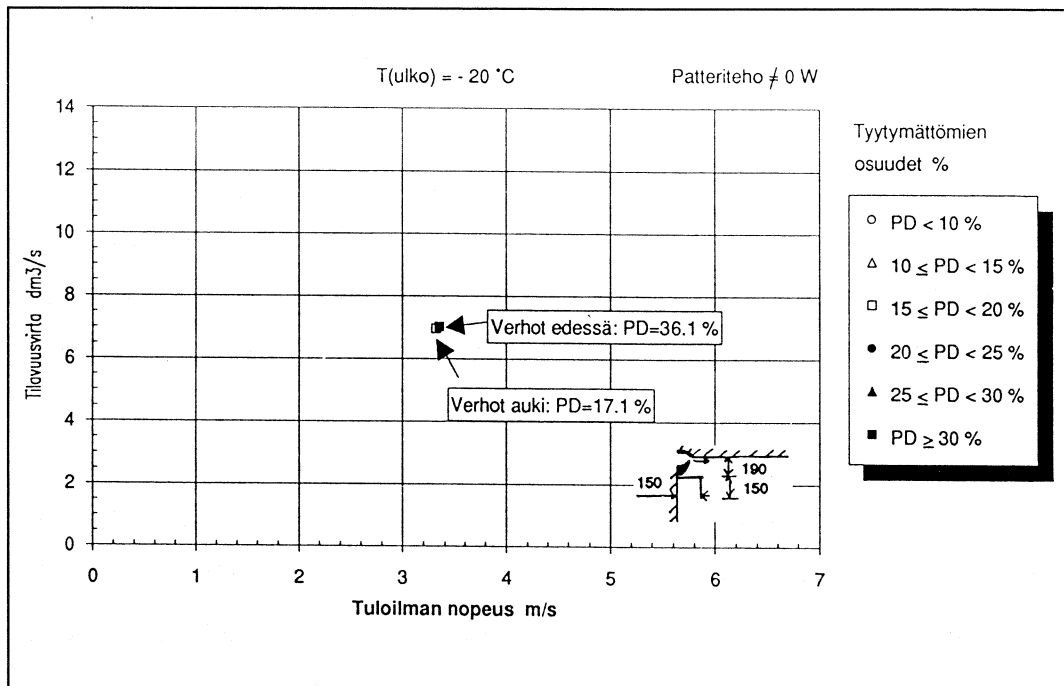
Kuva 13. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

Kuvaan 14 on merkitty verholaudan ja verhojen vaikutukset vedon muodostumiseen. Kuvassa olevissa pisteissä verhot ovat olleet ikkunan sivuilla lukuunottamatta yhtä pistettä, jossa verhot on vedetty ikkunan eteen. Vertaamalla kuvia 13 ja 14 havaitaan, että verholaudalla on selvä vedon vaaraa lisäävä vaikutus. Verholauta ei vaikuta suoraan tuloilmasuihkuun, mutta kylläkin patterista kohoavaan konvektiovirtaukseen, jolloin konvektiovirtauksen sekoittuminen tuloilmasuihkuun heikkenee. Verhojen asennolla ei näyttäisi olevan vaikutusta, sillä patterin konvektiovirtaus pääsee myös verhojen takaa sekoittumaan tuloilmasuihkuun.

Sen sijaan, jos verholaudan asemasta käytetään päältä umpinaista verhokoteloä, on verhojen asennolla selvä vaikutus (kuva 15). Verhojen ollessa ikkunan sivuilla on tyytymättömien osuus suunnilleen yhtä suuri kuin verholaudan tapauksessa (17,1 %). Kun verhot vedetään ikkunan eteen, ei patterin konvektiovirtaus enää pääse sekoittumaan tuloilmasuihkuun ja tyytymättömien osuus kasvaa selvästi (36,1 %).

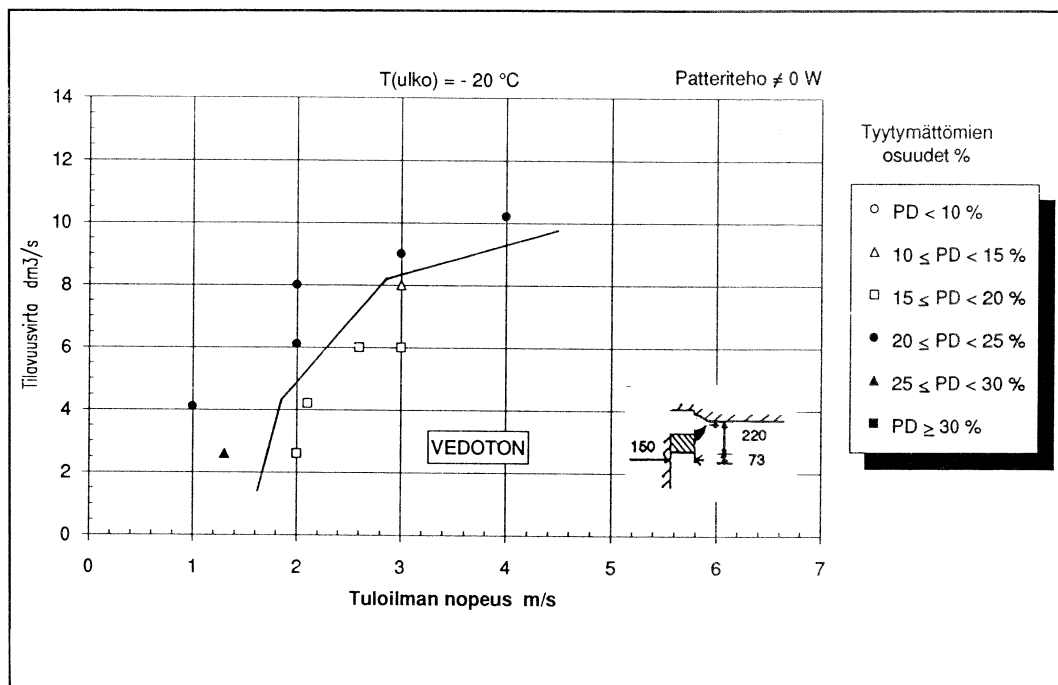


Kuva 14. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Verholautaa ja verhot käytössä.



Kuva 15. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin "pääskynpesä". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Verhokotelo ja verhot käytössä.

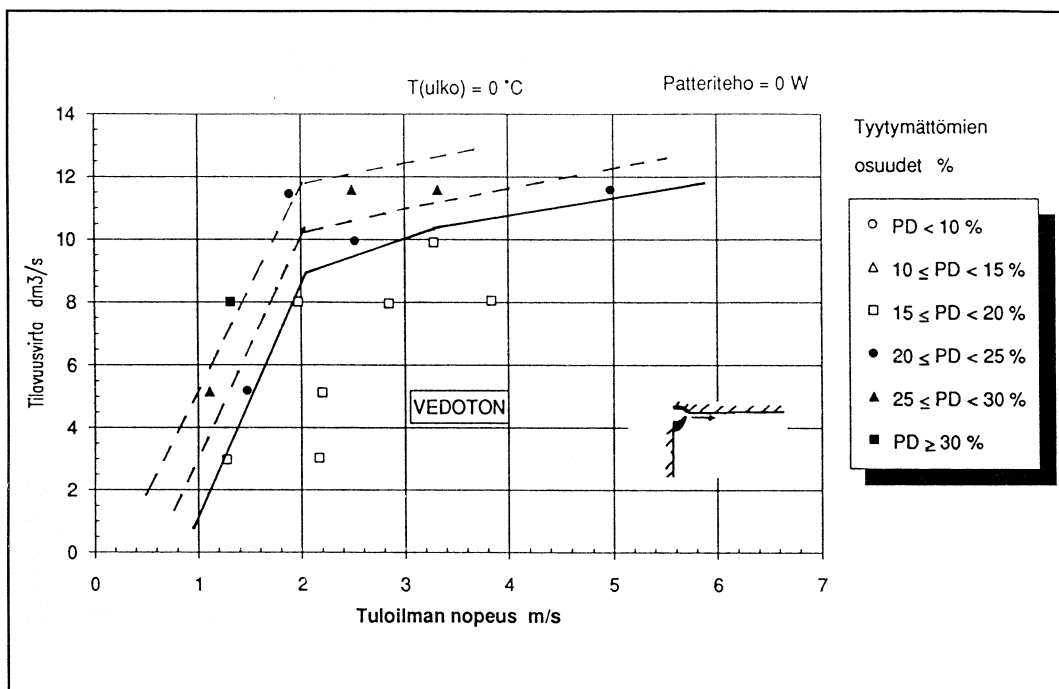
Kun "pääskynpesä" sijoitetaan verhokotelon otsapinnalle, saadaan suurin piirtein samanlaisia tuloksia kuin verholautaa käytettäessä (kuva 16).



Kuva 16. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Verhokotelo ja verhot sivussa.

3.5.2.2 Kevättilanne

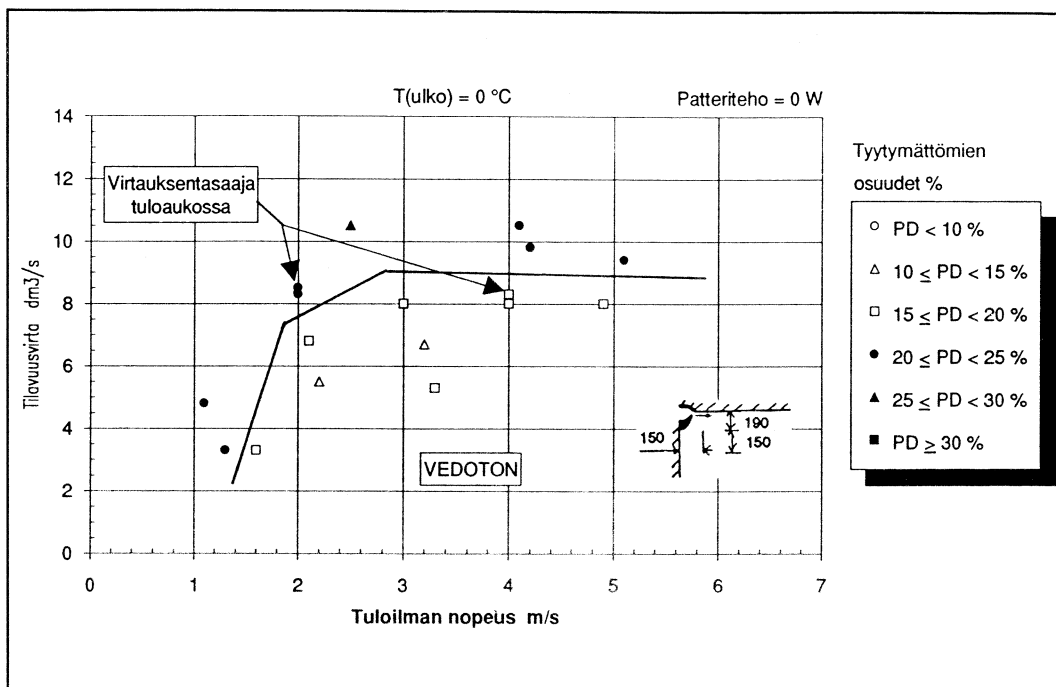
Kuvaan 17 on merkitty eri tuloilmavirtojen ja -nopeuksien aiheuttamat tyytymättömien osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein. Kuvaan on myös merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri PD < 20 % alittuu eli tilanne on vedoton. Kuvasta havaitaan, että toimintapisteessä (3 m/s, 8 dm³/s) ja sen ympäristössä vedottomuus on helppo saavuttaa. Tässä on selvä parannus kohdassa 3.5.1.2 tutkittuun ikkunan päältä ylös puhaltavaan rakoon, jolloin kevättilanne muodostui ongelmalliseksi.



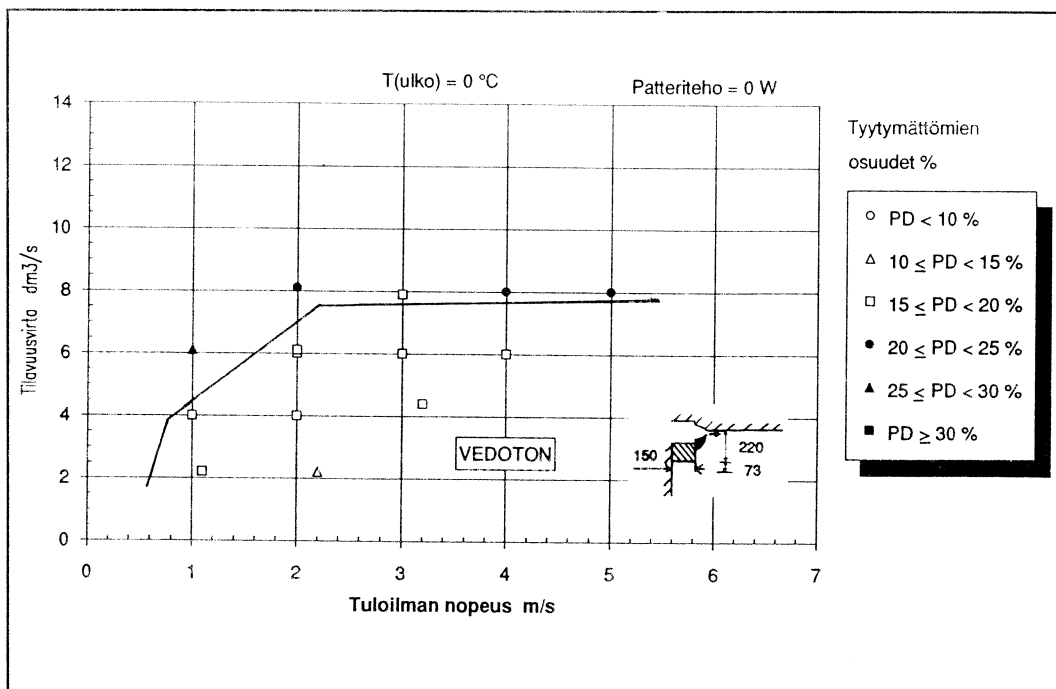
Kuva 17. Tyytymättömien osuudet kevättilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Patteri on kytketty pois. Ei verholautaa eikä verhoja.

Verholaudan vaikutusta kevättilanteessa on tutkittu kuvassa 18. Vertaamalla kuvia 17 ja 18 havaitaan, että verholaudalla on vedon kannalta epäsuotuisa vaikutus etenkin suurilla tilavuusvirroilla. Tulos on yllättävä, sillä patterin ollessa kytkettynä pois toiminnasta ei ole ylöspäin suuntautuvaa konvektiovirtausta, jota verholauta voisi häiritä. Eräs selitys voisi olla se, että verholauta vähentää tuloilmasuihkun induktiota, jolloin suihkuun ei pääse sekoittumaan lämmintä huoneilmaa yhtä tehokkaasti kuin ilman verholautaa.

Kuvaan 18 on merkitty myös tulokset virtauksentasaajan käytöstä. Tällöin "pääskynpesän" sisään asennettiin avosoluisesta solumuovilevystä tehty suodatin, jonka tarkoituksena oli saada elimen lähtönopeusprofiili paremmin puoliympyrän muotoon. Ilman suodatinta tuloilmasuihku ei levinnyt katossa säteittäisesti, vaan suuntautui enemmän huoneen keskelle, sillä suihkun lähtönopeus aivan elimen reunoilla oli noin 80 % pienempi kuin keskellä. Virtauksentasaajalla ei kuitenkaan ollut toivottavaa vaikutusta.



Kuva 18. Tyytymättömien osuudet kevätilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Patteri on kytketty pois. Verholauta on käytössä, verhot ovat sivussa.

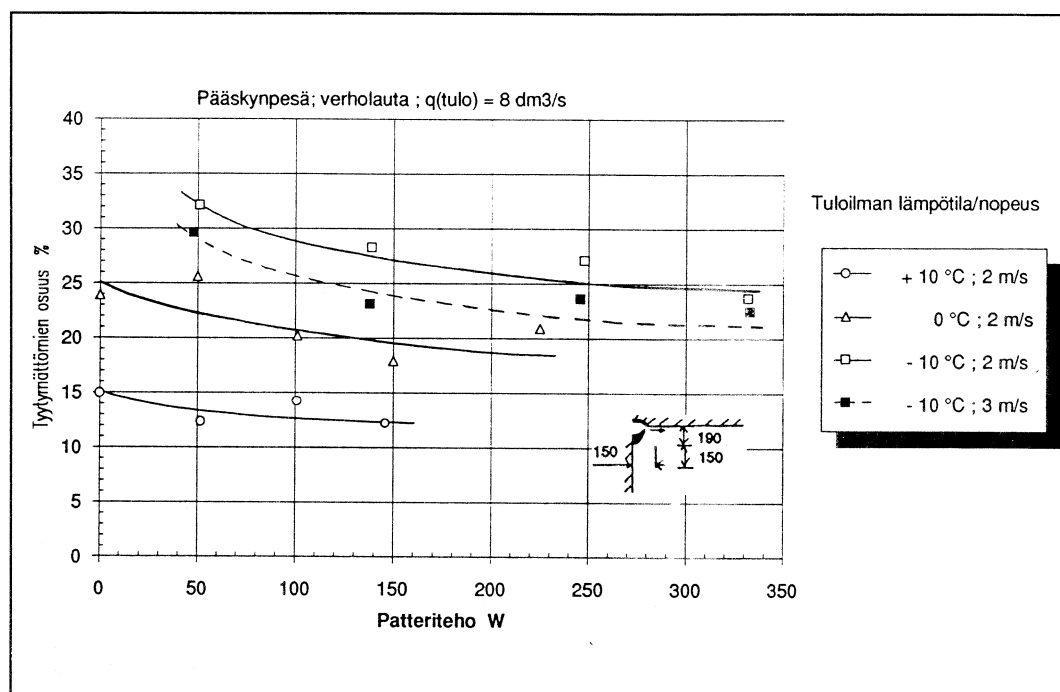


Kuva 19. Tyytymättömien osuudet kevätilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Patteri on kytketty pois. Verhokotelo on käytössä, verhot ovat sivussa.

Kevättilanteessa tarkasteltiin myös verhokotelon vaikutusta (kuva 19). Vertaamalla kuvia 18 ja 19 keskenään näyttäisi siltä, että verholauta olisi parempi ratkaisu kevättilanteessa. Todellisuudessa ero on kuitenkin hyvin pieni, sillä tarkasteltaessa $8 \text{ dm}^3/\text{s}$ -tasoa ovat PD-indeksit verholaudan tapauksessa olleet vain hieman alle 20 %-yksikköä ja verhokotelon tapauksessa vain hieman yli 20 %-yksikköä.

3.5.2.3 Patterilämmityksen vaikutus

Kuvassa 20 on tarkasteltu patterilämmitystehon vaikutusta vedottomuuteen "pääskynpesällä" verholaudan kanssa eräissä toimintapisteissä ($8 \text{ dm}^3/\text{s}$, 3 m/s tai 2 m/s). Muuttuvana tekijänä on ollut tuloilman lämpötila.



Kuva 20. Patterilämmityksen vaikutus vedottomuuteen eri tuloilman lämpötiloilla. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Verholauta on käytössä, verhot ovat sivussa.

Kuvan 20 mukaan patteritehon lisääminen vähentää tyytymättömien osuutta vain vähän; vaikutus on selvästi pienempi kuin rakolistalla (kuva 12). Tämä näkyy siinä, että tuloilman lämpötilan ollessa -10 °C tyytymättömien osuus ei enää pienene, vaikka patteritehoa kasvatetaan 150 W :sta 330 W :iin tulonopeuden ollessa noin 3 m/s . Tuloilman lämpötilan ollessa 0 °C (kevättilanne) rakolistalla saadaan

parempia tuloksia kuin "pääskynpesällä", eli tyytymättömien osuus pienenee jyrkemmin, jos patteriteho on suurempi kuin 100 W. Ilmeisesti rakolistan tapauksessa patterikonvektion tuoma lämmin ilmamassa on pystytty käyttämään paremmin hyväksi kuin "pääskynpesän" tapauksessa.

Kuvasta 20 havaitaan myös, että tuloilman lämpötilalla on selvä vaikutus tyytymättömien osuuteen: tuloilman lämmittäminen pienentää vedon vaaraa. Esimerkiksi lämpötilan noustessa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen vähenee tyytymättömien osuus noin 15 - 20 %-yksikköä. Tuloilmavirran ollessa $8\text{ dm}^3/\text{s}$ vaatisi kyseessä oleva lämpötilan nousu noin 200 W:n lämmitystehoa tuloilmakanavassa.

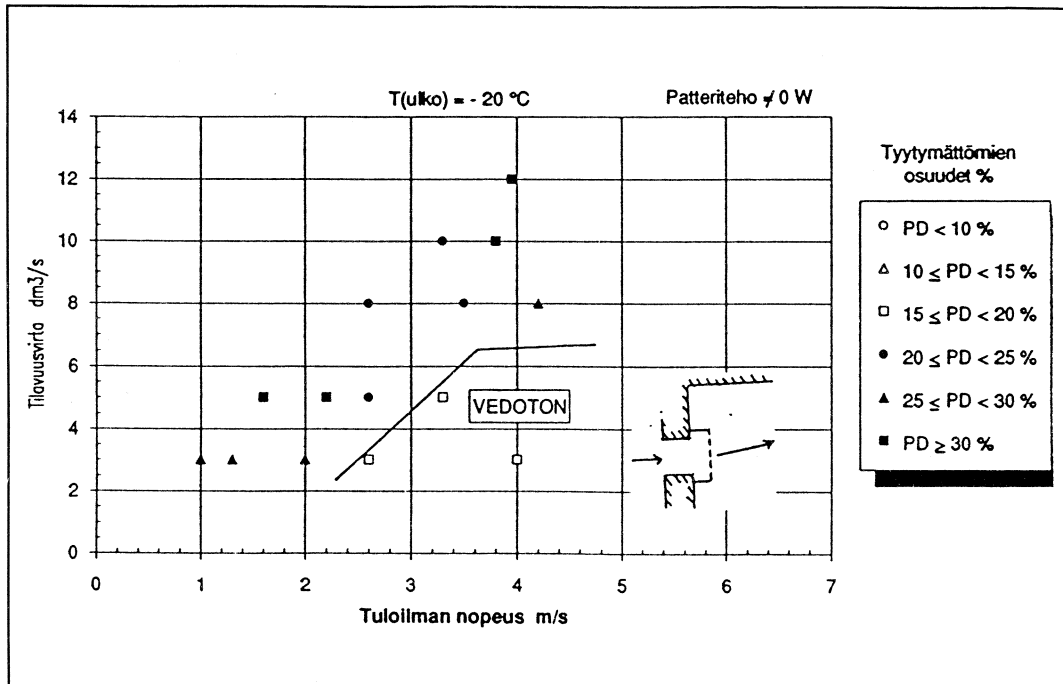
Tuloilman lämpötilan lisäksi myös lähtönopeudella on selvä vaikutus tuloksiin. Nopeuden kasvu pitää tuloilmasuihkun pitempään katon rajassa, jolloin pudotesaan oleskeluvyöhykkeelle suihku on ehtinyt lämmitä vähentäen näin vedon vaaraa. Tämä tulos näyttää kuvien 13 - 19 mukaan pätevän yleisesti, kun lähtönopeus on pienempi kuin noin 4 m/s.

3.5.3 Suutinpuhallus seinältä

3.5.3.1 Talvitilanne

Kuvaan 21 on merkitty eri tuloilmavirroista ja -nopeuksista aiheutuneet tyytymättömien osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein. Kuvaan on merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri $PD < 20\%$ alittuu eli tilanne on vedoton. Jos asetetaan toimintapisteeksi 3 m/s ja $8\text{ dm}^3/\text{s}$, havaitaan, että toimintapiste ja sen ympäristö näyttäisivät olevan vetoisan alueen puolella, tosin tyytymättömien osuudet ovat vain hieman yli 20 %.

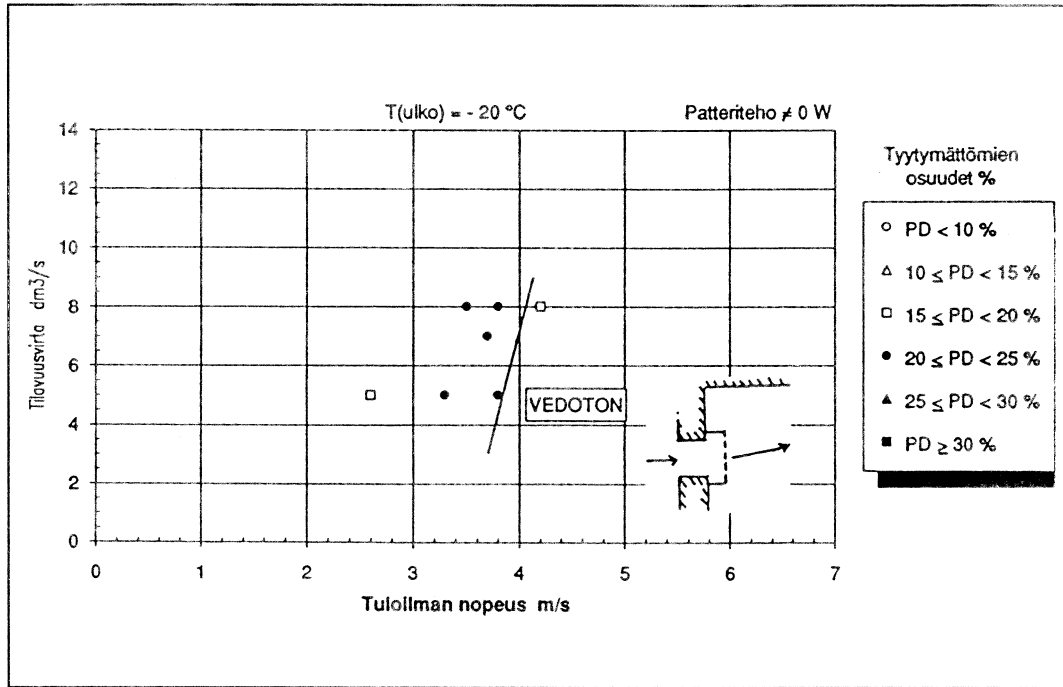
Merkille pantavaa on, että suuremmilla tilavuusvirroilla tyytymättömien osuus alkaa kasvaa lähtönopeuden kasvaessa tietyn rajan (noin 3 - 4 m/s) yli. Tämä on usein johtunut siitä, että suurella nopeudella puhallettu kylmä tuloilma törmää huoneen sivuseinään ja putoaa seinänviertä suurella nopeudella aiheuttaen vedon lisääntymisen lattian rajassa.



Kuva 21. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

Lähtönopeutta on tilavuusvirran ollessa vakio tavallisesti muutettu peittämällä suutinaukkoja alhaalta alkaen. Sivuseinävedon vuoksi kokeiltiin myös suutinaukkojen peittämistä sivuilta alkaen (kuva 22).

Kuvasta 22 havaitaan, että tilavuusvirran ollessa 8 dm³/s ja lähtönopeuden kasvaessa tilanne paranee vedottomaksi, koska tuloilmasuihku ei enää törmää sivuseiniin yhtä voimakkaasti. Toisaalta peittämällä suutinaukkoja sivuilta menetetään tuloilmasuihkun säteittäisyys. Tämä näkyi mittauksissa siten, että vetoisin kohta löytyi nyt huoneen keskialueelta, oleskelualueen yläreunasta. Tilavuusvirran pienentäminen ei muuttanut tilannetta vedottomaksi, lukuun ottamatta pienintä kokeessa käytettyä lähtönopeutta. Tämä on yllättävä tulos, sillä luvussa 3.5.2.3 oli suuri lähtönopeus havaittu edulliseksi. Syyn selvittäminen vaatisi lisäkokeita.

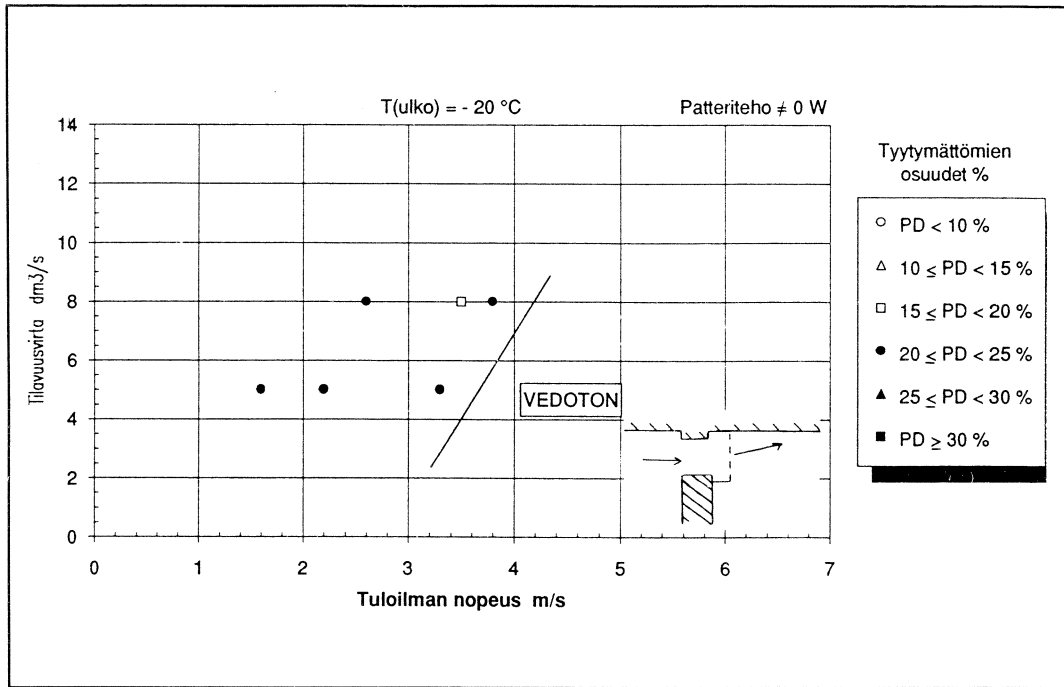


Kuva 22. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio suuttimia on peitetty sivuilta lukien. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

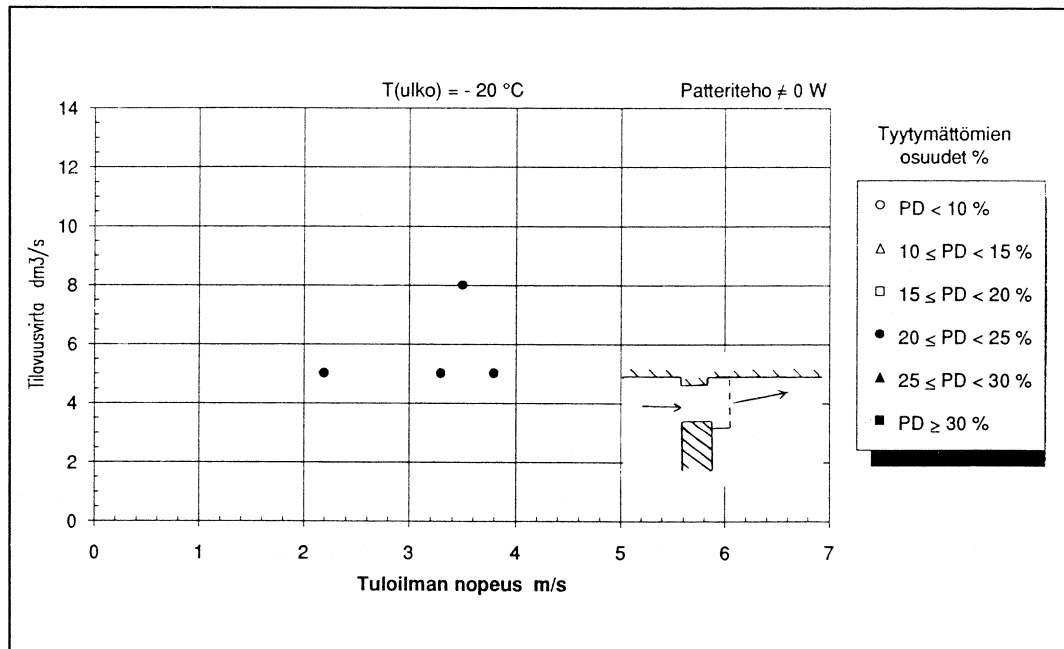
On huomattava, että edellä olevat tulokset koskevat "suutinpönttöä", joka on 20 cm:n päässä katosta, ja suuttimet on suunnattu 28° ylöspäin ja pääosin säteittäisesti.

Tilanteen parantamiseksi kokeiltiin myös "suutinpöntön" siirtämistä aivan katonrajaan. Tulokset näistä mittauksista on esitetty kuvissa 23 - 25.

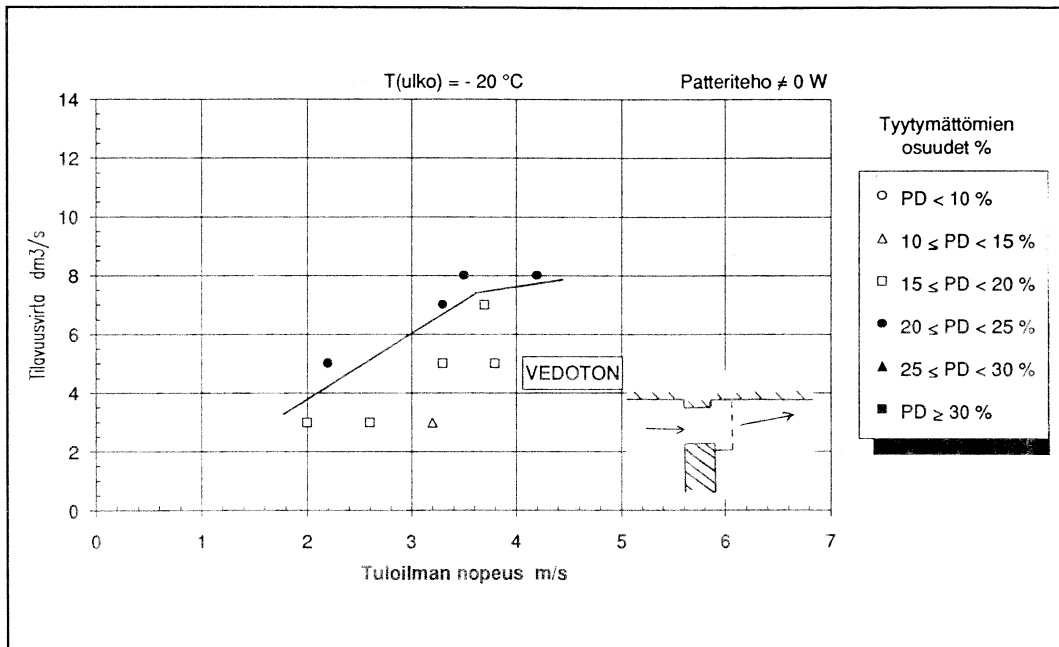
Vertamalla kuvaa 22 kuviin 23 ja 24 havaitaan, että pelkkä tuloilmaventtiilin siirtäminen katon rajaan ei oleellisesti parantanut tilannetta. Sen sijaan suuttimien suuntaaminen sopivasti poisti nyt vedon myös keskeltä huonetta, jolloin tilanne pysyi vedottomana myös pienemmillä lähtönopeuksilla (kuva 25).



Kuva 23. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä, aivan katon rajasta säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty reunoilta alkaen, muita suunnattu säteisasennosta keskelle päin. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.



Kuva 24. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä, aivan katon rajasta säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen, muita suunnattu säteisasennosta keskelle päin. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

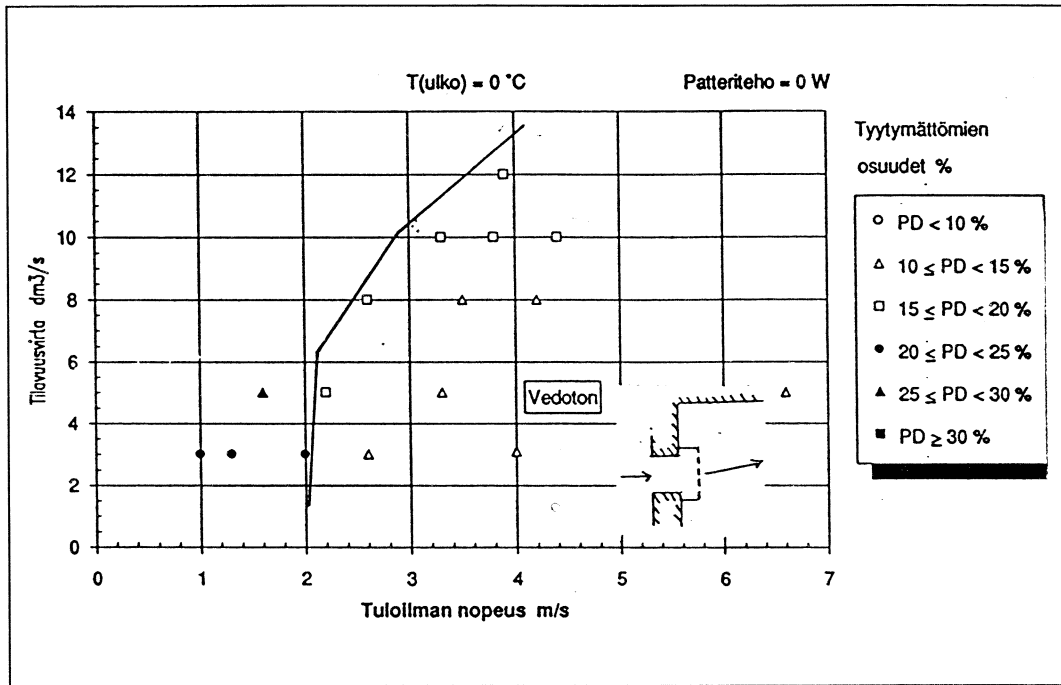


Kuva 25. Tyytymättömien osuudet talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä, aivan katon rajasta säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen, muita suunnattu säteisasennosta keskelle päin, paitsi reunimmaisista, jotka on suunnattu seuraavasti: ylimmäinen 4. rivi reunoille päin, 3. rivi säteittäisesti ja 2. rivi keskelle päin. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.

3.5.3.2 Kevättilanne

Kuvaan 26 on merkitty eri tuloilmavirtojen ja -nopeuksien aiheuttamat tyytymättömien osuudet osa-alueittain 5 %-yksikön välein. Kuvaan on myös merkitty arvioitu rajaviiva, jonka oikealla puolella vetokriteeri $PD < 20 \%$ alittuu eli tilanne on vedoton. Kuvasta havaitaan, että eräässä toimintapisteessä (3 m/s, 8 dm³/s) ja sen ympäristössä vedottomuus on helppo saavuttaa.

Lähtönopeuksia on muutettu peittämällä suutinrivejä alhaalta lukien. Kuitenkaan samanlaista kylmän, sivuseinään osuvan tuloilman törmäyksen aiheuttamaa lattiavetoa kuin oli talvitilanteessa ei nyt esiinny. Muutenkin kevättilanteessa on mahdollista tuoda suutinpöntöllä selvästi enemmän ulkoilmaa huoneeseen vedottomasti kuin talvitilanteessa. Tämä on päinvastainen ilmiö kuin rakopuhaluksen ja "pääskynpesän" tapauksessa.

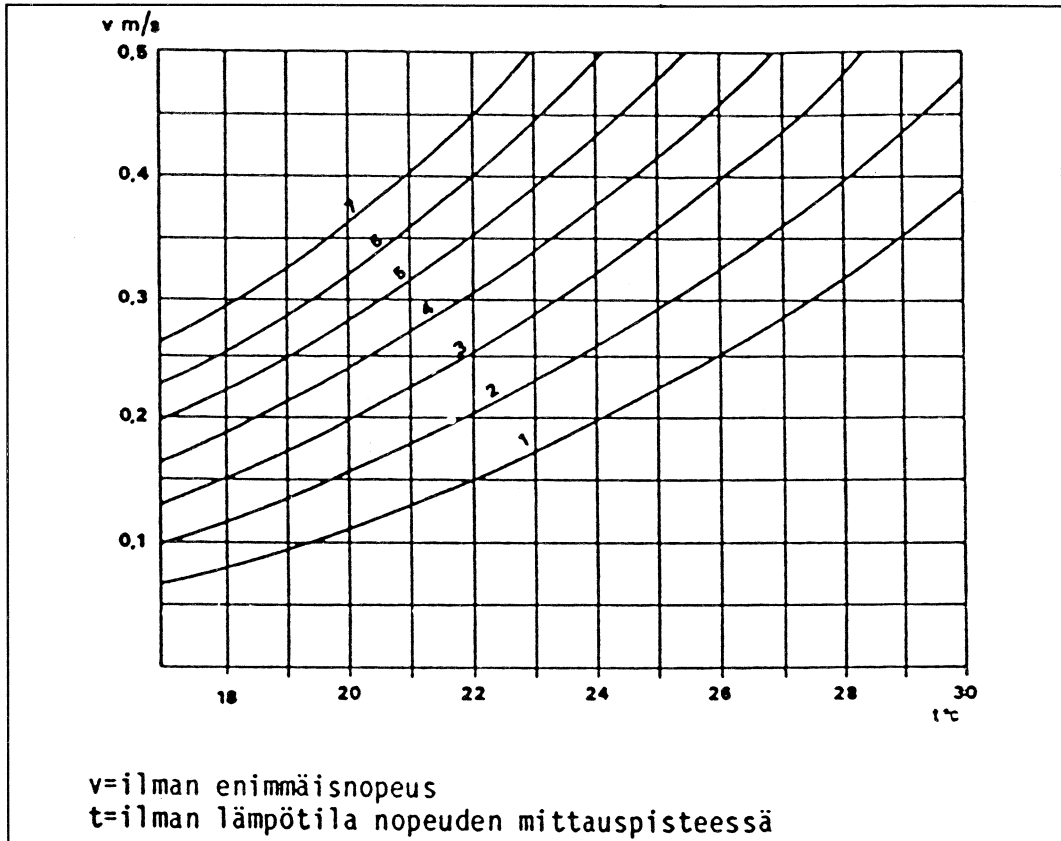


Kuva 26. Tyytymättömien osuudet kevättilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen. Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.

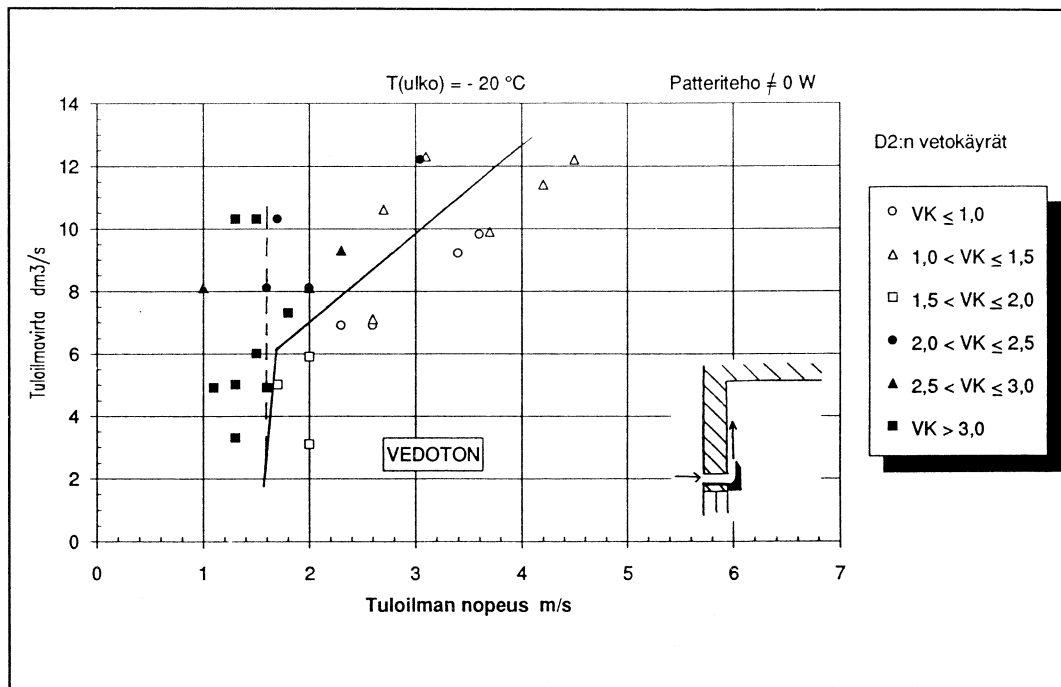
3.6 TULOSTEN TARKASTELU D2:N VETOKÄYRIEN MUKAAN

Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 /4/ vetokäyrät on esitetty kuvassa 27, jossa on annettu ilman enimmäisnopeuden (suurin keskinopeus) arvot oleskeluyöhykkeellä huonetiloissa, joissa oleskellaan jatkuvasti. D2:n mukaisesti makuu- ja olohuoneissa sovelletaan vetokäyrää 2. Kuitenkin ympäristöministeriön ohjeiden mukaisesti ulkoilmaventtiilien tyyppihyväksynnässä sovelletaan toistaiseksi vetokäyrää 3.

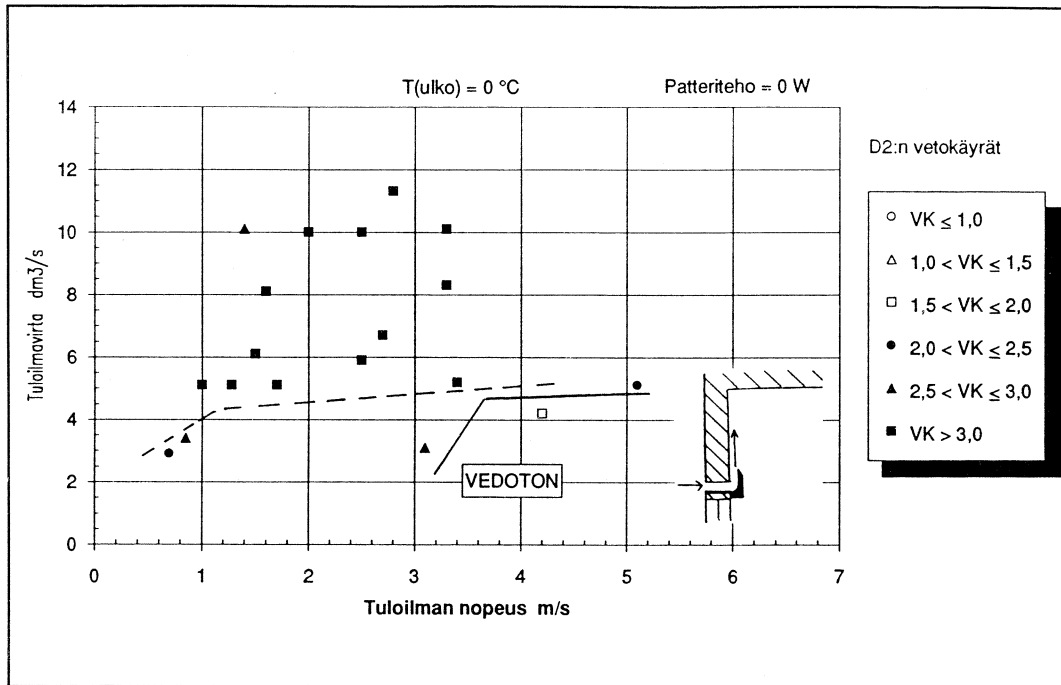
Kuviin 28 - 34 on koottu vedon kannalta parhaimmat koetapaukset eri tuloilmaelimiille sekä talvi- että kevättilanteessa. Kuviin on merkitty eri tuloilmavirtojen ja nopeuksien aiheuttamat vetokäyrien arvot osa-alueittain 0,5 yksikön välein. Kuviin on myös, mikäli se on ollut mahdollista, merkitty rajaviivat, joiden oikealla puolella vetokäyrä 2 tai 3 alittuu.



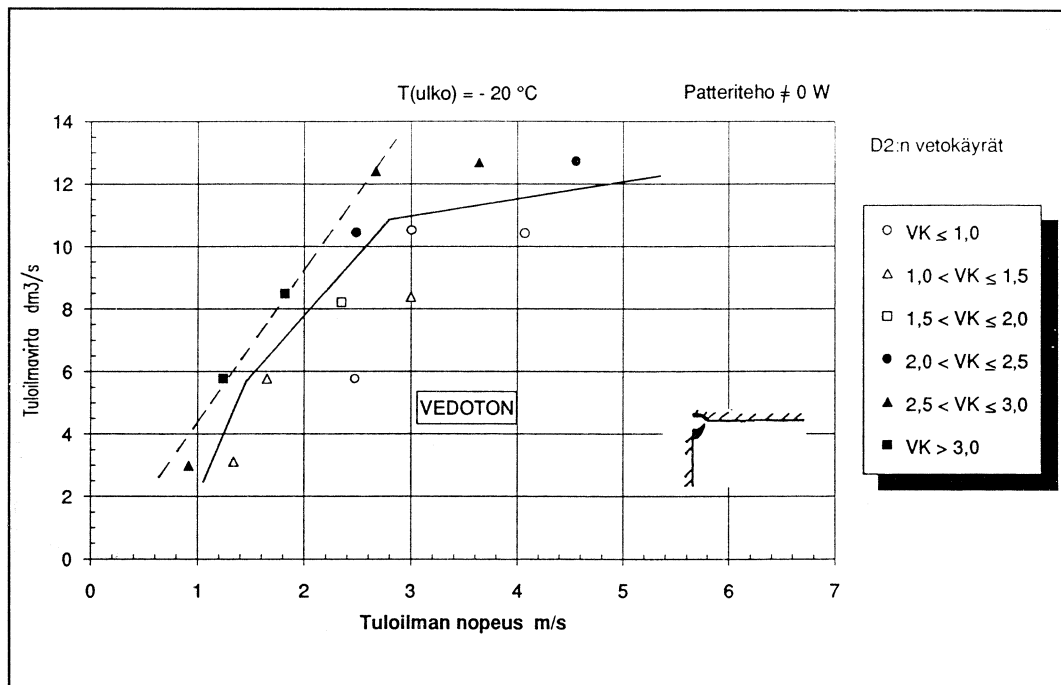
Kuva 27. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 vetokäyrät ilman enimmäisnopeuden (suurin keskinopeus) määrittämiseksi. v on ilman enimmäisnopeus, t on ilman lämpötila nopeuden mittauspisteessä.



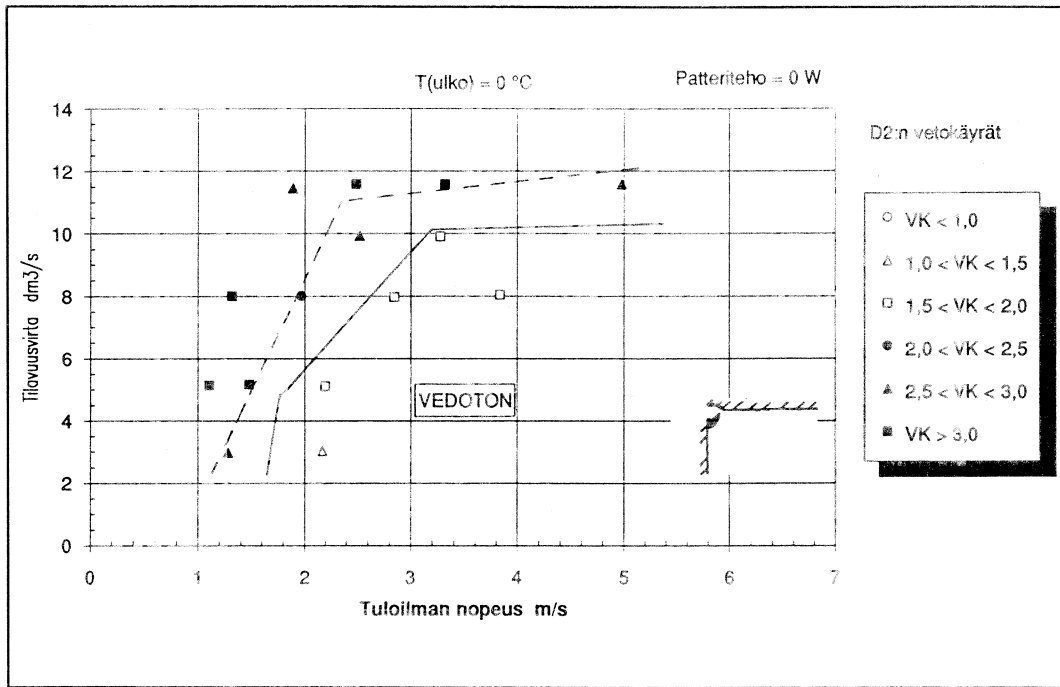
Kuva 28. D2:n vetokäyrät osa-alueittain talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.



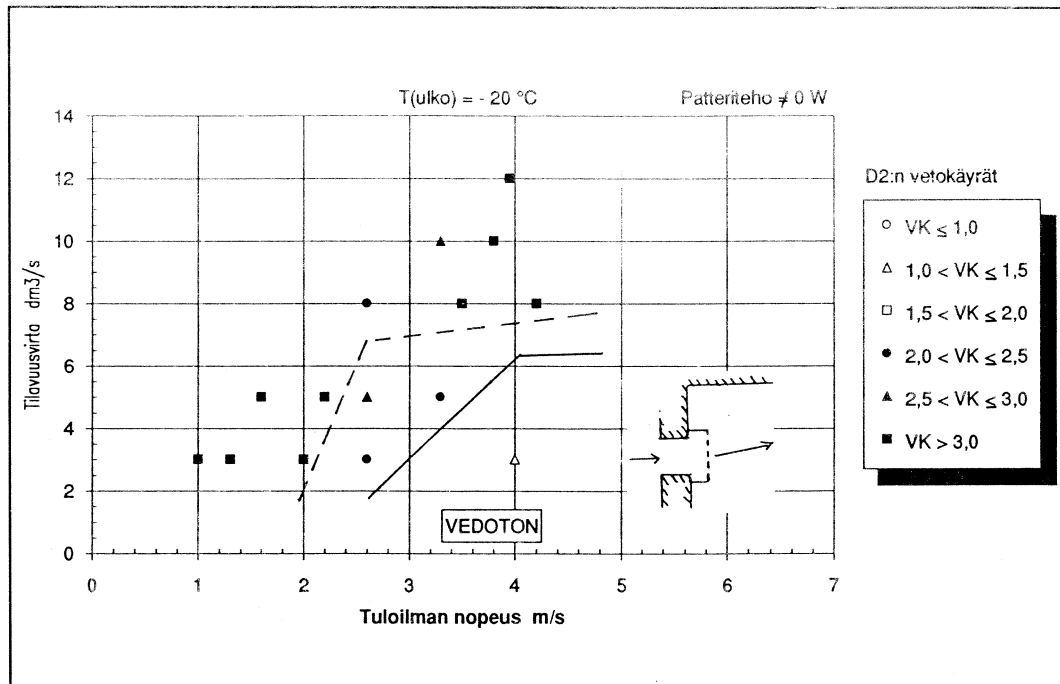
Kuva 29. D2:n vetokäyrät osa-alueittain kevätilanteessa. Tuloilmaelimenä on 1 m:n pituinen rakolista: puhallus ikkunan päältä ylös. Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.



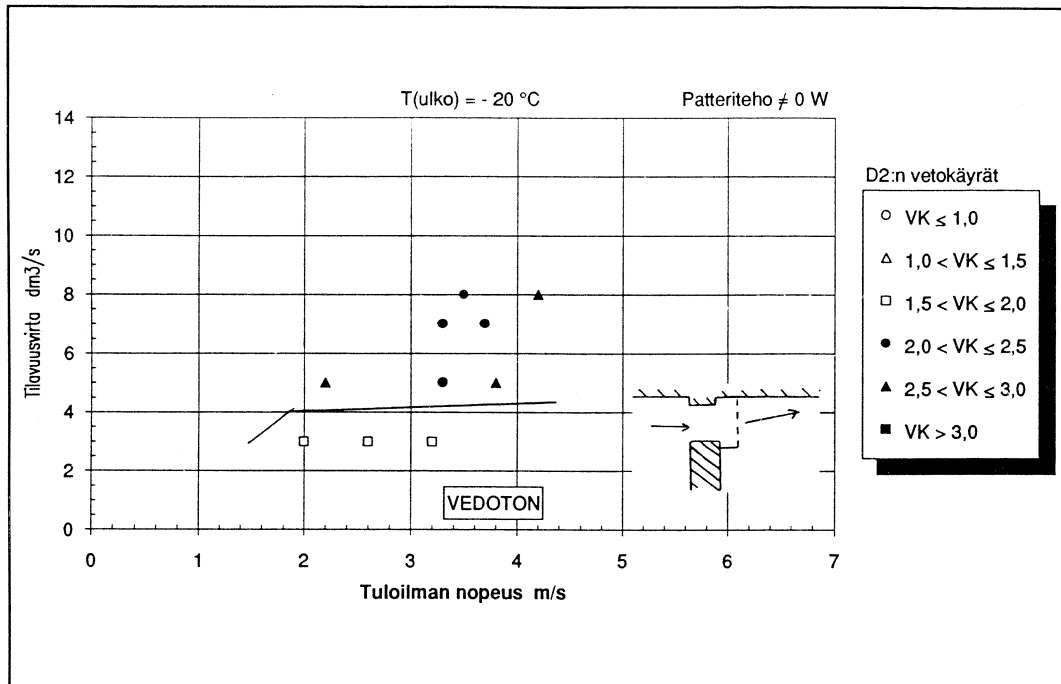
Kuva 30. D2:n vetokäyrät osa-alueittain talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.



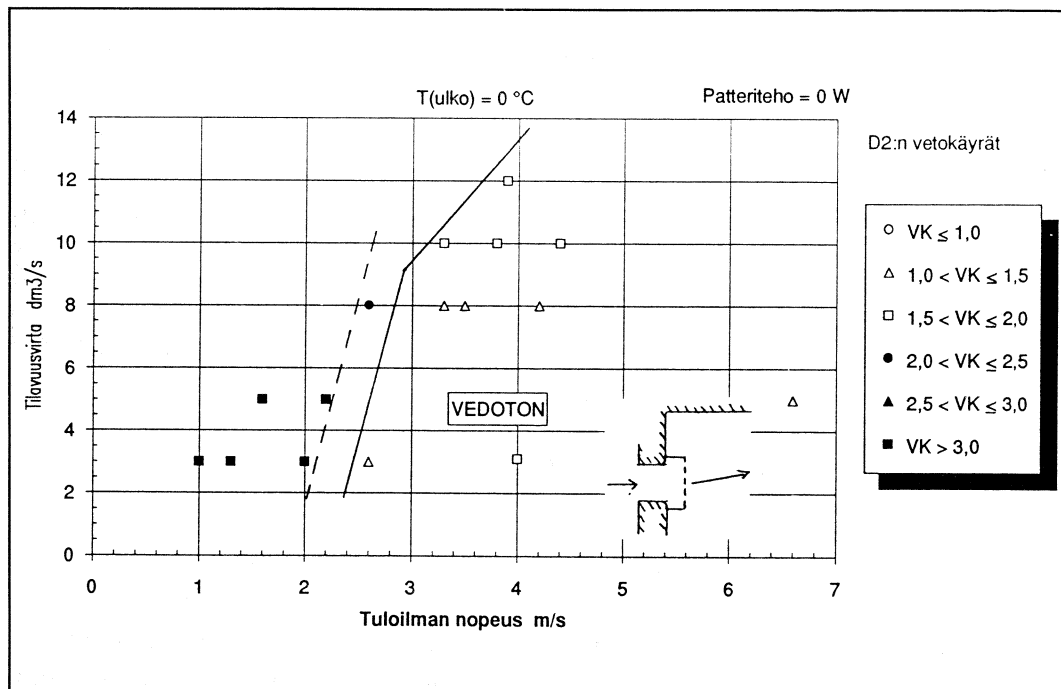
Kuva 31. D2:n vetokäyrät osa-alueittain kevättilanteessa. Tuloilmaelimenä on katon rajasta säteittäisesti puhaltava elin, "pääskynpesä". Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.



Kuva 32. D2:n vetokäyrät osa-alueittain talvitilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.



Kuva 33. D2:n vetokäyrät osa-alueittain talvitiilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä, aivan katon rajasta säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen, muita suunnattu säteisasennosta keskelle päin, paitsi reunimmaisista, jotka on suunnattu seuraavasti: ylimmäinen 4. rivi reunoille päin, 3. rivi säteittäisesti ja 2. rivi keskelle päin. Ikkunan alla on konvektiivinen patteri. Ei verhoja.



Kuva 34. D2:n vetokäyrät osa-alueittain kevätilanteessa. Tuloilmaelimenä on ikkunan yläpuolelta seinältä säteittäisesti puhaltava monireikäinen suutin, "suutinpönttö". Tilavuusvirran ollessa vakio on suuttimia peitetty alariviltä alkaen. Patteri on kytketty pois. Ei verhoja.

3.7 KEHITTÄMISNÄKÖKOHTIA

Tutkimus on tuottanut kolme ulkoilmaventtiilin perustyyppiä. Näistä tyypeistä säteispuhallus katon rajasta, "pääskynpesä", osoittautui hyväksi sekä talvi- että kevätilanteessa. Sillä voitiin kummassakin tilanteessa johtaa asuinhuoneeseen vedottomasti ulkoilmaa vähintään $8 \text{ dm}^3/\text{s}$. Seinältä tapahtuvan suutinpuhalluksen tapauksessa talvitilanne osoittautui ongelmalliseksi, mikä johtuu kylmän tuloilman törmäämisestä sivuseiniin ja siten lattiavedon esiintymisestä. Suuttimia sopivasti suunnaten saatiin talvitilannekin vedottomaksi. Sen sijaan tapauksessa, jossa tuloilma puhallettiin rakolistasta ikkunan päältä ylöspäin, kevätilanne osoittautui ongelmalliseksi. Tällöin pieni patteritehon lisäys muutti tilanteen vedottomaksi.

Sekä teoreettinen tarkastelu että täysmittakaavakokeet ovat osoittaneet, että vedon välttämiseksi tuloilma pitäisi saada nopeasti lämpenemään heti venttiilistä lähdön jälkeen. Tämä voi tapahtua joko sekoittamalla kylmä ilma huoneilmaan tai ottamalla siihen lämpöä vapaista seinä- tai kattopinnoista. Kummassakin tapauksessa tehokas lämmönsiirto edellyttää mahdollisimman suurta lähtönopeutta. Tällöin läpivientiosan virtausvastus on saatava mahdollisimman pieneksi ja puhallusrako on muotoiltava virtaviivaiseksi. Tutkimuksessa kehitetyt vedottomat tuloilmaventtiilit perustuvat osittain juuri tälle muotoilulle. Lisäksi on edullista jakaa tuloilmavirtaus laajalle alueelle ja suunnata se sivuun oleskelualueelta eli seinän tai katon pinnan suuntaisesti niin, että patterista kohoava lämmin konvektiovirtaus voi sieppautua mukaan.

Tutkimuksen tuottamista vedottomista ulkoilmaventtiileistä voi vielä kehitellä muitakin sisäänpuhallustapoja. Rakolistan kehittämiseksi olisivat rakenteisiin, kuten ikkunaan tai verhokoteloon, yhdistetyt ratkaisut tutkimisen arvoisia. Säteispuhalluksen kehittämiseksi olisi säteittäinen kattopuhallus seuraava tutkimusaihe. Suutinpuhalluksen kehittämiseksi olisivat suutinrivit ja suutinryhmät sekä yleisesti ottaen suunnattavat sisäänpuhalluselimet, joissa vetoisa alue voitaisiin siirtää huoneessa haitattomaan kohtaan, mielenkiintoisia sovelluksia. Näiden kaikkien sisäänpuhallustapojen kehittämiseksi on myös usean tuloilmaelimen yhteiskäyttö vielä tutkimatta.

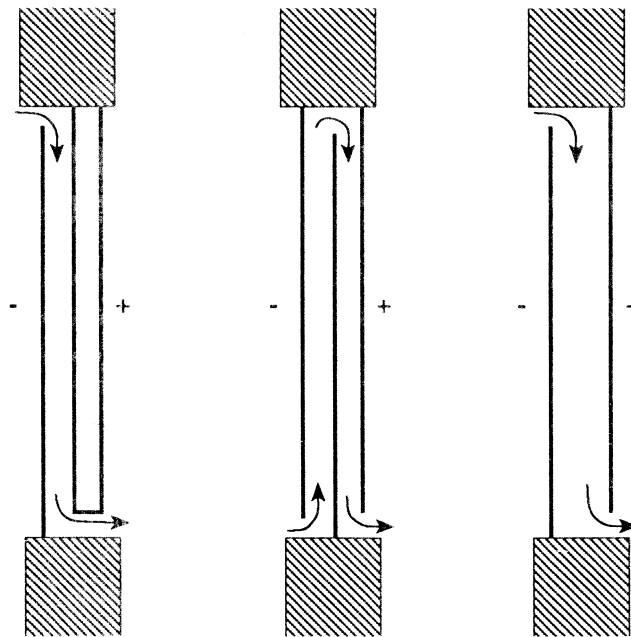
LÄHDELUETTELO

- /1/ Fanger, P.O. & Christensen N.K. Perception of draught in ventilated spaces. Ergonomics 29, 2, s. 215 - 235.
- /2/ Fanger, P.O., Melikov, A.K., Hanzawa, H. & Ring, J. Air turbulence and sensation of draught. Energy and Buildings 12(1988), s. 21-39.
- /3/ Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. Helsinki 1987. Ympäristöministeriö, Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D2. 21 s.

4 TULOILMAIKKUNA ILMAN ESILÄMMITTIMENÄ

4.1 TOIMINTAPERIAATE

Jos ikkunan lasivälin kautta johdetaan ilmaa lämpövirran suuntaa vastaan eli talvella ulkoa sisälle päin esim. kuvan 1 mukaan, ilma ottaa vastaan huoneesta tulevaa lämpöenergiaa ja lämpenee. Tällöin myös osa ikkunan lämpöhäviöstä saadaan talteen ja ikkunan lämmönläpäisykerroin (k-arvo) pienenee.



Kuva 1. Kaksi- ja kolmikertaisen tuloilmaikkunan toimintakaavioita. Etenkin monikertaisissa ikkunoissa ilmavirran kululle on tarjolla useita vaihtoehtoja, joista tässä on esitetty vain kaksi.

Tuloilmaikkunasta voidaan puhua silloin, kun ilman virtaustiet ikkunan kautta on järjestetty ja mitoitettu osana ilmanvaihdon suunnittelua. Yleisimmin ilma johdetaan ulkoa lasivälin alaosaan ja otetaan huoneeseen ikkunan yläosasta, jolloin lämpenemiseen on käytettävissä koko valoala.

Tuloilman lämpenemisen ja lämmöntalteenoton vastapainona tapahtuu lasipintojen jäähtyminen, mikä rajoittaa tämän esilämmityskeinoon hyväksikäyttöä sekä mahdollisen kondenssin että ikkunan "kylmäsaiteilyn" vuoksi. Ilman takaisinvirtaus voi aiheuttaa myös lasivälin huurtumista talvioloissa.

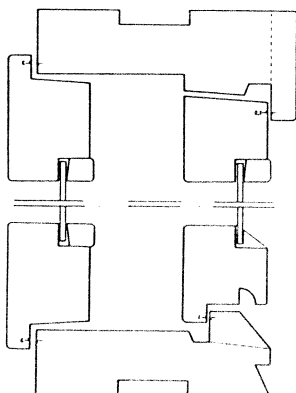
4.2 KOETULOKSIA

Tuloilmaikkunoiden lämpöteknillisiä ominaisuuksia kuten k-arvoa, pintalämpötiloja ja tuloilman lämpötiloja on mitattu laboratoriokeuin eri yhteyksissä aina 1950-luvulta lähtien. Alkuperäisiä mittaustuloksia on esitetty ainakin lähteissä /1...5, 7, 8/.

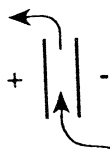
Kohteina olleiden ikkunarakenteiden, koeolojen ja mittaustapojen vaihtelevuudesta johtuen tulosten hajonta on huomattavan suuri. Ilmavirran suuruuden lisäksi ainakin tuloilman kulkureitti ikkunassa, ilmavirran suuntaus ikkunan jälkeen, ikkunan edustalla mahdollisesti olevat verhot ja ikkunan alapuolella olevan patterin lämmitysteho näyttävät vaikuttavan merkittävästi tuloilman lämpenemiseen ja lasin pintalämpötiloihin. Osa mittauksista on tehty niin suppealla ilmavirta-alueella, ettei niistä saada yksinään esille esim. tilavuusvirran ja tulolämpötilan välistä riippuvuutta. Aineistoja yhdistelemällä voidaan kuitenkin saada yleiskuva joidenkin tavallisimpien ikkunatyypin toiminnasta tuloilman esilämmittimenä.

Seuraavassa tarkastellaan yhteensopiviksi arvioituja koetuloksia tuloilmaikkunoiden kokeista, joissa ilma on johdettu ulkoa ensin lasivälin alaosaan, sitten lasivälin kautta ikkunan yläosaan ja sieltä huoneeseen yläpuiteraon tai puitteeseen asennetun venttiilin kautta. Kyseiset ikkunatyypit ovat kuvassa 2. Mukaan on otettu vain koetapaukset, joissa ei ole verhoja ja joissa ikkunan alapuolelle tuotu konvektiivinen lämmitysteho on ollut "kohtuullinen" eli enintään ikkunan ja ulkoilmavirran teoreettisen lämmöntarpeen suuruinen. Esitetyt kolmikertaiset ikkunatyypit, joissa ilmaa johdetaan rinnakkain molempien lasivälien kautta, ovat sikäli epämääräisiä, että niissä ilmavirran jakautumista lasivälien kesken ei tunneta. Virtausrakojen mittojen perusteella sisemmän lasivälin osuudeksi on arvioitu noin 1/5 - 1/4 koko ilmavirrasta. Lähteen /6/ kokeissa myös ilman tulo ulompaan lasiväliin on epämääräinen, koska ulkopuute on ollut tiivistämätön. Puitevälysten ja alakarmin vedenpoistoreikien perusteella on kuitenkin päätelty, että pääosa ulkoilmasta on tässäkin tapauksessa tullut lasiväliin ikkunan alaosasta.

kaksikertainen
koeikkuna

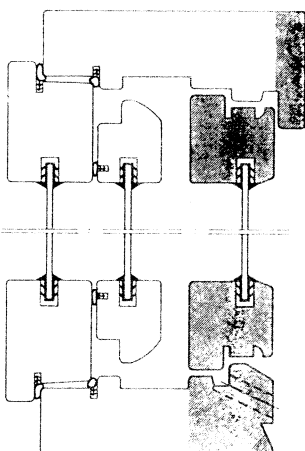


Tyyppi 1

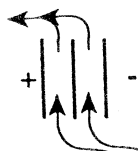


Lähde	Valoala	Lasiväli
/1, 4/	1,24 m ²	85 mm
/3/	1,33 m ²	90 mm
/5/	1,08 m ²	85 mm

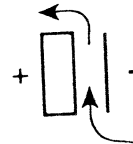
kolmikertainen
koeikkuna



Tyyppi 2



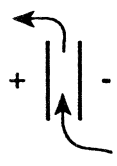
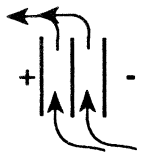
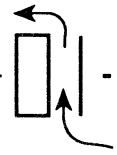
Tyyppi 3



Lähde	Valoala	Lasivälit
/2/	1,25 m ²	37 + 97 mm
/6/	1,04 m ²	42 + 94 mm

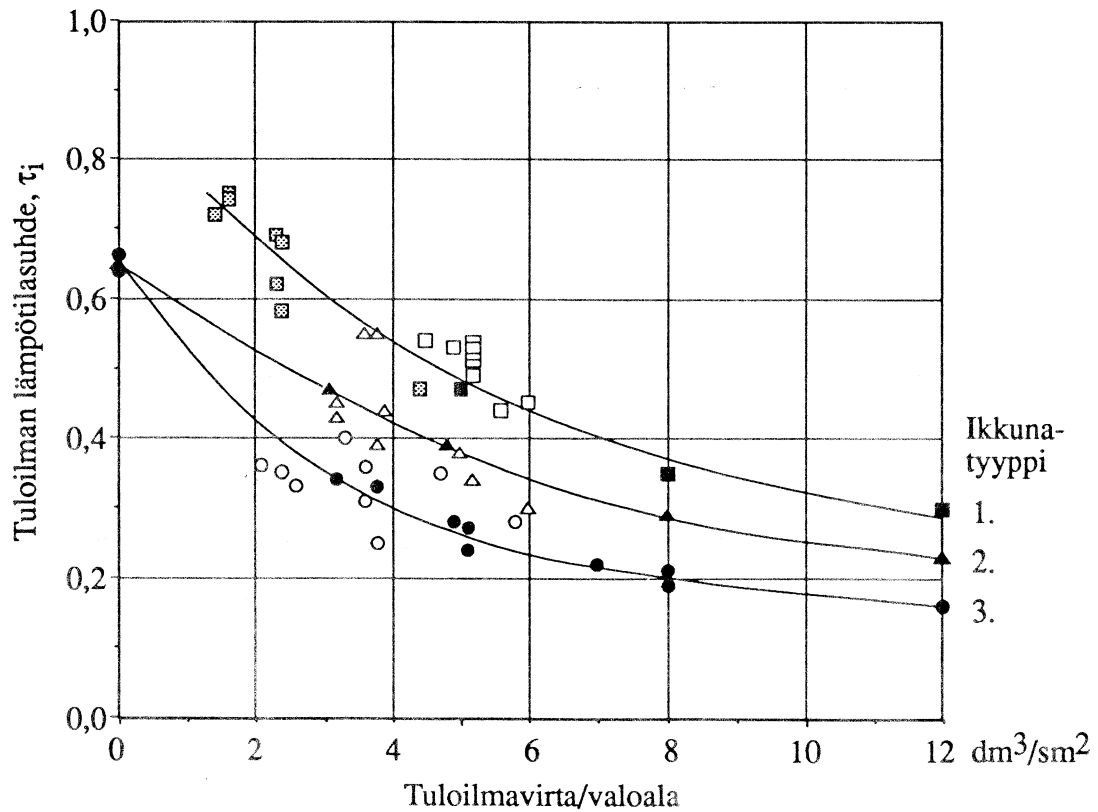
Kuva 2. Eri lähteistä tarkastelun kohteeksi valitut ikkunatyypit. Koeikkunoihin on tehty tarvittavat ilman kulkutiet työstämällä puuosia ja poistamalla tai lisäämällä tiivisteitä. Nämä muutokset eivät näy yllä olevissa piirroksissa.

Kuviin 3 ja 4 on koottu em. ikkunatyypeille saadut tuloilman ja sisälasin lämpötilasuhteet, kun muuttujana on tuloilmavirta/valoala. Mainittuja suhdelukuja käyttäen tulokset on tehty erilaisten koelämpötilojen ja ikkunakokojen puolesta yhteismitallisiksi.

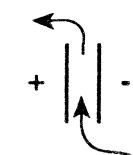

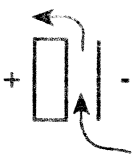
Ikkuna- tyyppi	Merkki	Lähde	Huomautukset
1. 	■ □ ▣	l4l l1l l3l	16 - 20 kokeen keskiarvoja
2. 	▲ △	l7l l2l	n. 1/5 ilmasta sisemmän lasivälin kautta -''-
3. 	● ○	l7l l2l	

$$\tau_i = \frac{T_i - T_u}{T_s - T_u}$$

T_s = sisäilman lämpötila
 T_u = ulkoilman lämpötila
 T_i = tuloilman lämpötila



Kuva 3. Tuloilman lämpötilasuhde tuloilmaikkunassa.

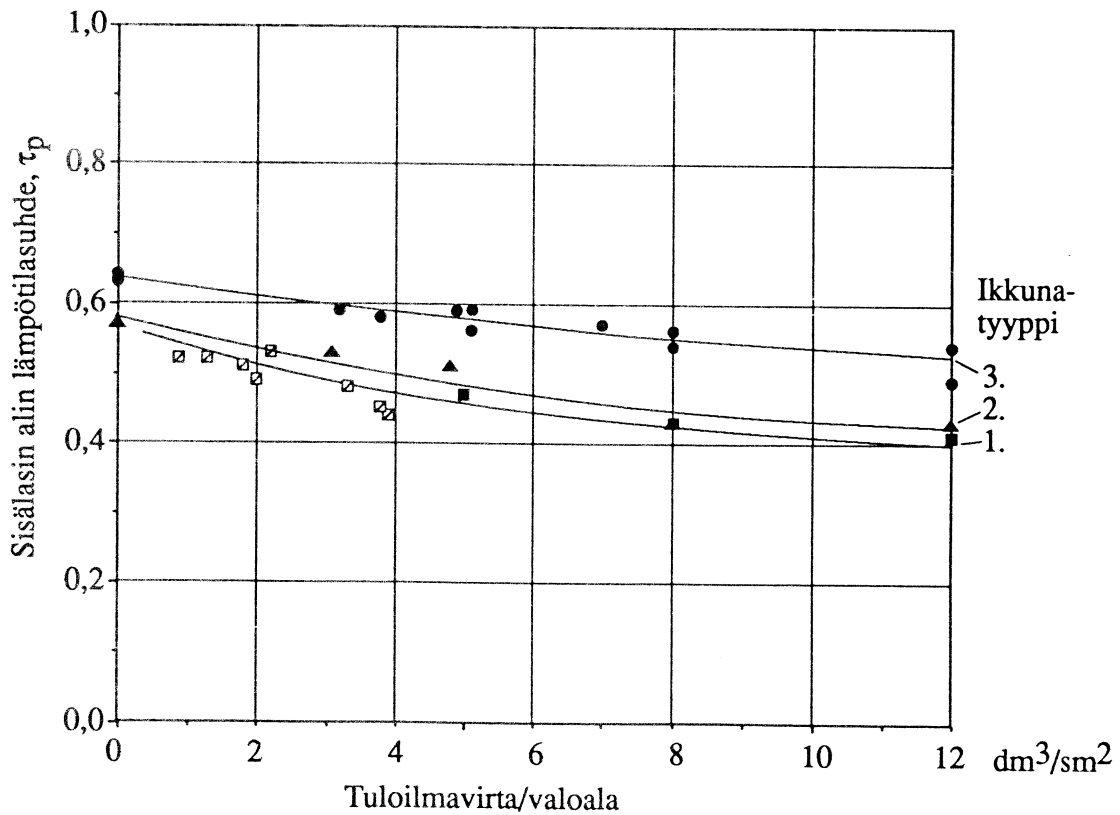
Ikkuna- tyyppi	Merkki	Lähde	Huomautukset
1. 	■ ◻	l4l l5l	16 - 20 kokeen keskiarvoja
2. 	▲	l7l	n. 1/5 ilmasta sisemmän lasivälin kautta
3. 	●	l7l	

$$\tau_p = \frac{T_p - T_u}{T_s - T_u}$$

T_s = sisäilman lämpötila

T_u = ulkoilman lämpötila

T_p = sisälasin alin pintalämpötila



Kuva 4. Sisälasin pintalämpötilasuhde tuloilmaikkunassa.

Tuloilmaikkunoiden k-arvoja ja lämmönsäästöä on mitattu vain kahdessa tutkimuksessa /5, 8/. Näistä on esitetty yhteenveto mm. lähteessä /6/. Sen mukaan ikkunatyypissä 1 ilman sisäännotolla saavutetaan suunnilleen saman suuruinen lämmönsäästö kuin lisäämällä kolmas lasi tavalliseen kaksinkertaiseen ikkunaan. Tarkalleen tyyppien 2 ja 3 mukaisten tuloilmaikkunoiden k-arvoja ei ole mitattu. Niissä absoluuttinen lämmönsäästö jää joka tapauksessa pienemmäksi kuin ikkunatyypissä 1, jossa lämpöhäviöiden lähtötasokin on suurin.

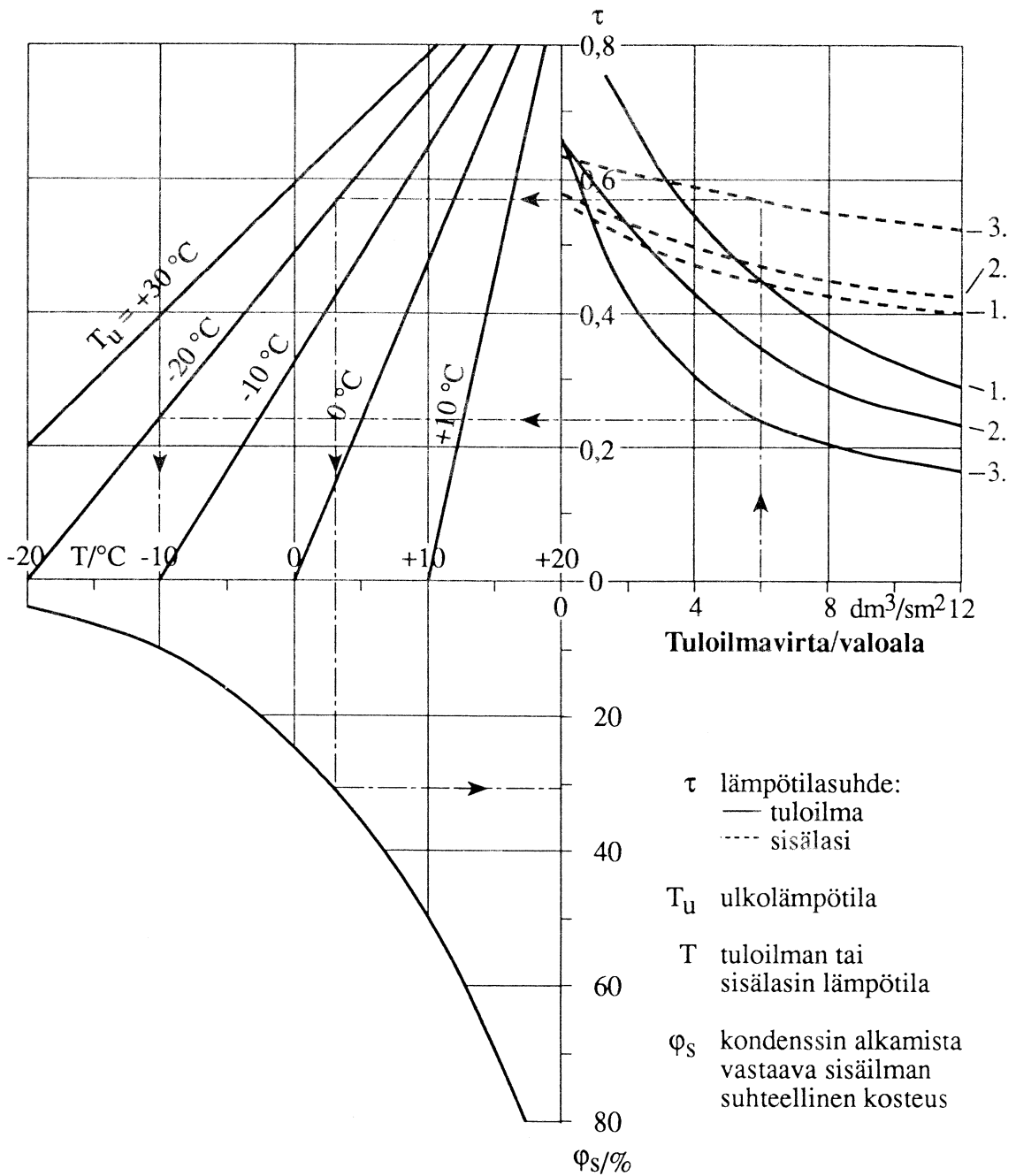
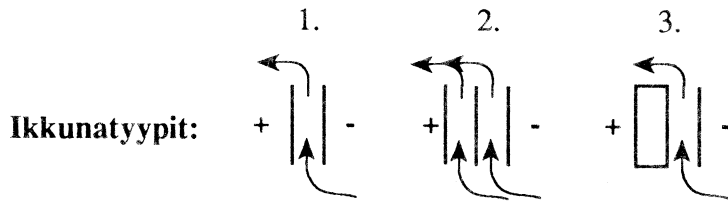
4.3 KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIEN ARVIOINTI

Edellä esitettyjen mittaustulosten perusteella voidaan ainakin likimäärin päätellä, paljonko ilma lämpenee tuloilmaikkunassa ja paljonko samalla sisälasi jäähtyy tyyppitapausten mukaisissa olosuhteissa. Tarkastelua helpottaa kuvassa 5 esitetty diagrammi, josta nähdään myös sisälasin kondenssin alkamista vastaava huoneilman suhteellinen kosteus.

Otetaan esimerkiksi kolmikertainen tyyppiä 3 oleva tuloilmaikkuna, jonka valoalan neliometriä kohtia haluaan ottaa ilmaa $6 \text{ dm}^3/\text{s}$. Ulkolämpötilan ollessa $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ saadaan tuloilman lämpötilaksi noin $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lasipinnan minimilämpötilaksi noin $+3 \text{ }^\circ\text{C}$. Vesihöyry alkaa tiivistyä sisälasin pinnalle, jos sisäilman suhteellinen kosteus ylittää arvon 30 %. Tässä tapauksessa kondenssi ei muodostune ongelmaksi tavallisessa asuinhuoneessa, jonka ilmaa ei voimakkaasti kostuteta. Sen sijaan tuloilma on edelleen niin kylmää, että vedon välttämiseksi se olisi johdettava huoneeseen hyvin suunnatun ja sijoitetun tuloilmaelimen kautta, kappaleessa 3 esitettyjen periaatteiden mukaan. Tosin vedottomuuden saavuttaminen on nyt ilman esilämpenemisen vuoksi helpompaa kuin otettaessa ilmaa sisään "raakana" ulkolämpötilassa.

Edellistä vastaava esimerkki sovellettuna kaksikertaiseen tyyppiä 1 olevaan ikkunaan antaa tuloilman lämpötilaksi noin $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja samoin lasipinnan minimilämpötilaksi noin $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Nyt sisäilman kosteuden kondenssirajaksi tulee 20 %, joka on edelleen verrattain korkea arvo asuinhuoneen ilmalle kovalla pakkasella. Tuloilma lämpenee tässä ikkunassa puolestaan selvästi tehokkaammin ja siten

vedonvaara on vähäisempi kuin edellisessä esimerkissä.



Kuva 5. Tuloilmaikkunan lämpötilat ja sisälasin kondenssialttius, kun sisäilman lämpötila on 21 °C.

Tähän asti tuloilmaikkunoiden vedottomuuskokeissa on ilmasuihkun ohjailussa ja suuntauksessa käytetty pääasiassa ohjauslistaa /3, 8/ ja sisäpuiteen huulosta /1, 4, 7/ tai joskus puitteeseen asennettua rakoventtiiliä /2/. Yleensä parhaimpaan tulokseen on päästy suuntaamalla ilmasuihku ikkunan yläreunasta ylöspäin seinän pintaa pitkin. Suurinta vedotonta ilmavirtaa nykyisten vetokriteerien mukaan ei kuitenkaan tiedetä, koska koeolot ja mittaustapa ovat aiemmissa tutkimuksissa olleet nykyisestä poikkeavia ja myös ilmasuihkun ohjauksessa ja suuntauksessa on ollut jälkeen päin arvioiden parantamisen varaa. Ilmeisesti tuloilmaikkunan suoritusarvot vedottomuuden osalta olisi tutkittava uudelleen vertailukelpoisten tulosten saamiseksi.

Perinteisen tuloilmaikkunan ideaalista käyttöä rajoittavina tekijöinä ovat olleet käytännössä erilaiset ikkunan lähirakenteet, kuten verhokotelo tai -lauta, ikkunasyvennyksen reuna tai liian lähellä oleva kattopinta, joihin ikkunasta lähtevä ilmasuihku törmää ennen aikojaan. Näiden välttämiseksi tuloilmaikkunan jatkekehityksessä olisikin etsittävä ratkaisuja, joissa ikkuna toimii vain esilämmittimenä, josta ilma johdetaan erilliseen, vedon kannalta edullisesti sijoitettuun ja muotoiltuun tuloilmaelimeen. Näin saataisiin lisää vapautta myös äänenvaimennuksen ja suodatuksen järjestämiseen.

Ehkä vaikeammin ratkaistava ongelma on takaisinvirtaus ja siitä johtuva lasivälin eli ulkolasin sisäpinnan huurtuminen tietyissä käyttötilanteissa. Tätä on esiintynyt mm. tuloilmaikkunan koerakennuskohteessa /7/ ja sitä havaitaan talvioloissa melko yleisesti muissakin asuintaloissa, joissa ikkunat toimivat korvausilman tulotienä. Useimmiten syynä on tuuletusikkunan avaaminen asunnon jossakin huoneessa, jolloin poistoilmanvaihdon ylläpitämä alipaine häviää ja kosteaa sisäilmaa voi tuulen alapuolella virrata asunnon muiden ikkunoiden kautta ulos päin. Myös hatara ulkovaippa, talon sisäiset ilmavuodot tai poistoilmapuhaltimen pysäyttäminen voivat estää alipaineen ylläpidon ja johtavat siten helposti ikkunoiden huurtumiseen. Onneksi lasiväliin tiivistynyt kosteus yleensä häviää nopeasti, kun virtauksen suunta palautuu ennalleen eikä takaisinvirtausta ole kestänyt kauan.

Lasivälin sumuisuus ja huurteisuus ei siis ole pelkästään ikkunan vika, vaan se on ilmanvaihdon toimimattomuutta, virheellistä käyttöä tai talon hataruutta osoittava oire. Kuitenkin lasivälin huurtumisalttiutta pitäisi voida vähentää, jotta tuloilmaikkunaa voisi edelleen suositella. Ainoa mieleen tuleva keino on tällöin omavoimaisen vastaventtiilin käyttö. Itse ikkunaan sen asentaminen tuntuu vaikealta, mutta edellä esitetty ilman johtaminen erillisen tuloilmaelimen kautta tarjoaa ehkä sopivan paikan esim. herkästi toimivalle kalvorakenteiselle vastaventtiilille.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tuloilmaikkuna tarjoaa koneellisen poiston vaatimalle korvausilmalle jokaisessa huoneessa valmiina olevan ja jopa energiaa säästävän esilämmittimen, jota kannattaa aktiivisesti hyödyntää. Sen tärkein käyttöalue on edelleen asuinrakennuksissa, joissa huonekohtaisesti sisään tuotava ilmavirta ja tavanomainen ikkunakoko ovat varsin hyvin lämpöteknillisesti yhteensopivia. Selvinä kehitysmahdollisuuksina on mainittava ilman johtaminen ikkunasta erilleen sijoitettavaan sisäänpuhalluselimeen ja takaisinvirtausta estävän vastaventtiilin käyttö. Myös ilmansuodattimen ja ulkomelun vaimentimen käyttöä tuloilmaikkunan yhteydessä tulisi tutkia.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Korkala, T. Tuloilmaikkunan eri sisäänpuhallusjärjestelyt viihtyisyyden ja ilmanvaihdon tehokkuuden kannalta. Espoo 1983. Teknillinen korkeakoulu, koneinsinööriosasto. 150 s. Diplomityö.
- /2/ Korvausilmaventtiilin VM-B-40 testaus tyyppihyväksyntää varten. Espoo 1990. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. Tilaja Ilmark Oy, Espoo. Tutkimusselostus LVI0539/90, 7 s. + liitteitä 16 s. Julkaisematon, mittausaineistoa käytetty tilaajan luvalla.
- /3/ Laukkanen, K. Ulkoilman hallittu sisäänotto ulkovaipan kautta. Espoo 1981. Teknillinen korkeakoulu, koneinsinööriosasto. 112 s. Diplomityö.
- /4/ Penttilä, P. & Siren, K. Tuloilmaikkunan eri sisäänpuhallusjärjestelyt, Laboratoriomittauksia. Espoo 1984. Teknillinen korkeakoulu, raportti B5. 187 s.
- /5/ Siitonen, V. Ikkunan lämpöhäviön pienentäminen tuloilmavirtausta ohjaamalla. Espoo 1977. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Tiedonanto 30. 34 s.
- /6/ Siitonen, V. Tuloilmaikkuna, vanha konsti uudelleen lämmitettynä. LVI-lehti 30(1978)7, ss. 24 - 28, 81 ja 82.
- /7/ Tuloilman hallittu sisäänotto ikkunan kautta. Koerakentamisraportti: VVO/Saarnimäenkuja 4. Helsinki 1988, Rakennuskunta Haka, kehitysuskikkö. 82 s. + liitteitä 57 s.
- /8/ Tuomola, T. & Reinilä, M. Ikkunat ja ilmanvaihto. Helsinki 1955. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. 78 s.

5 KORVAUSILMAN SISÄÄNOTTO ERISTYSRAKENTEEN LÄPI

5.1 TOIMINTAPERIAATE

Kun ilmaa johdetaan ulkovaipan läpi, tapahtuu lämmön talteenottoa. Jos ulkoilma on sisäilmaa kylmempää, lämpenee korvausilma rakenteessa, mutta toisaalta rakenteen lämpötila laskee ja johtumislämpöhäviöt rakenteen sisäpinnan läpi kasvavat. Kokonaislämpöhäviöt ovat kuitenkin pienemmät kuin tapauksessa, jossa korvausilma otetaan sisätilaan suoraan ulkoilman lämpötilassa. Vastaava lämmön talteenotto näkyy myös rakenteen kautta ulospäin tapahtuvassa ilmavirtauksessa, missä poistuva sisäilma lämmittää rakennetta ja siten pienentää johtumislämpöhäviöitä.

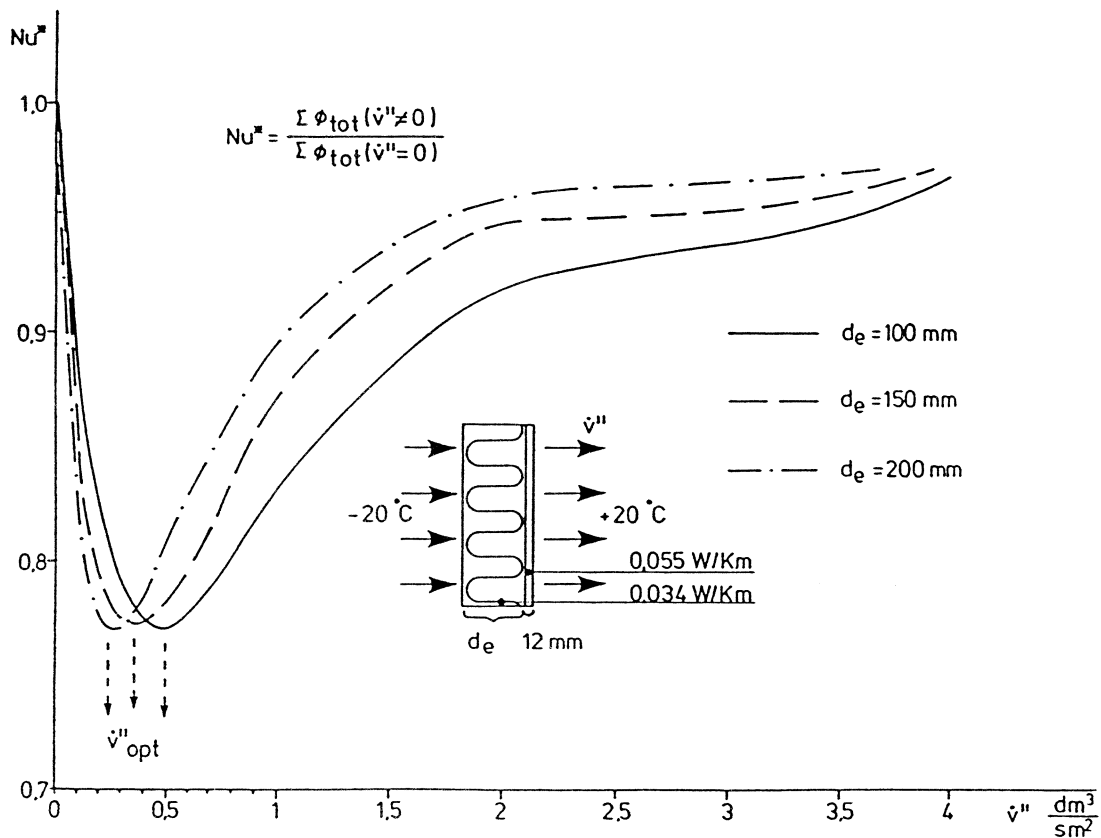
5.2 NUMEERISET SIMULOINTIMALLIT

VTT:n LVI-tekniikan laboratoriossa on kehitetty rakenteiden lämmön, ilman ja kosteuden siirtymisen numeeriseen simulointiin soveltuvia laskentamalleja (TCCC2D ja TRATMO2), verifioitu malleja kokeellisten mittausten avulla ja tehty sovelluslaskelmia /1, 2, 4, 5/. Kehitystyö on tehty pääasiassa KTM:n energiaosaston rahoittamissa projekteissa. Ohjelmien verifiointin ja sovelluslaskelmien tulokset sisältävät runsaasti tietoa mm. ilman lämpenemisestä ja rakenteen kautta tapahtuvien lämpöhäviöiden muutoksesta rakenteen läpi tapahtuvan ilmavirtauksen aikana /3, 6, 8/. Myös kosteuden kerääntymistä rakenteeseen sisältä ulospäin tapahtuvan ilmavirtauksen aikana on tarkasteltu aiemmissa laskelmissa /7, 8/.

Seuraavassa esitetyt tulokset perustuvat ohjelmalla TCCC2D laskettuihin tapauksiin.

5.3 LÄMMÖN TALTEENOTTO JA LÄMPÖTILAT TASAN JAKAUTUNEESSA LÄPIVIRTAUKSESSA /3,6/

Kuvassa 1 esitetään tasaiselle ilman läpisyotautumiselle laskettu suhteellinen lämmöntalteenottoefekti Nu^* läpivirtaavan ilman tilavuusvirran funktiona ja rakenteen eristekerroksen paksuus parametrina. Laskelmissa käytettiin ulko- ja sisäpuolen ilmatiloille lämpötiloja -20 ja $+20$ °C ja lämmönsiirtokertoimet ulko- ja sisäpinnalla olivat vastaavasti $\alpha_u = 15$ ja $\alpha_s = 7,5$ W/(K m²). Nu^* kuvaa läpivirtaustilanteen johtumis- ja ilmanvaihdon lämpöhäviöiden summan suhdetta vertailutilanteen vastaavaan arvoon. Vertailukohtana on ilman sisäänotto ulkoilman lämpötilassa ja ilmavirtauksettoman rakenteen johtumislämpöhäviöt.



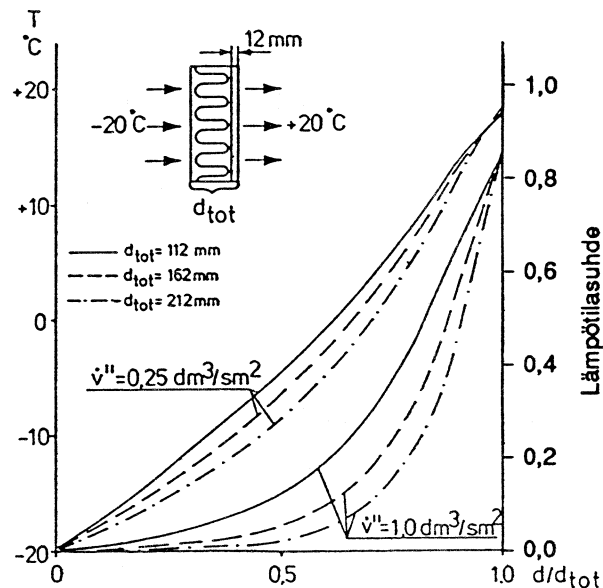
Kuva 1. Suhteellinen lämmön talteenottoefekti Nu^* tasaisesti jakautuneen ilmavirtauksen tilavuusvirran funktiona [6]. Mitä pienemmän arvon Nu^* saa, sitä suurempi on lämmön talteenoton suhteellinen osuus kokonaislämpöhäviöistä rakenteen läpi.

Nu^* saa minimiarvon, ts. suhteellinen lämmön talteenotto on suurin, rakenteen k-arvosta (eristepaksuus) riippuvalla ilman tilavuusvirran (optimi)arvolla. Rakenteelle

laskettu johtumis- ja ilmanvaihdon lämpöhäviöiden yhteenlaskettu pienentyminen ns. integroiduilla (dynaamisilla) rakenteilla voi suurimmillaan olla yli 20 %.

Dynaamisen rakenteen lämpötilakentät tasaisessa läpisyotautumistilanteessa eri ilman tilavuusvirroilla ja rakenteen suhteellisen paksuuden funktiona esitetään kuvassa 2. Lämpötilagradientti ja tulevan ilman lämpeneminen on suurimmillaan rakenteen sisäpinnan lähellä. Tehokkaan lämmön talteenoton edellytyksenä on ilman johtaminen tasaisesti sisäpinnan läpi tai koko sisäpinnan alueen vieritse huonetilaan. Optimitapauksessa rakenteen läpi virtaavan ilman lämpötilasuhde (lämpötilamuutoksen suhde ulko- ja sisäpuolen ilmatilojen lämpötilaeroon) saa arvoja $> 0,9$ (kuva 2), ts. sisäänvirtaavan korvausilman lämpötila on hyvin lähellä huoneilman lämpötilaa.

Kun ilman tilavuusvirtaa kasvatetaan yli rakenteelle ominaisen optimiarvon, lämpötilagradientti kasvaa sisäpinnan lähellä ja on rakenteen kylmässä osassa lähellä nollaa. Tässä tilanteessa osa ulkopinnan lämmöneristeestä on lämpöteknisen toiminnan kannalta hyödytöntä. Lisäksi ilman lämpeneminen riippuu entistä enemmän lämmönsiirron tehokkuudesta rakenteen sisäpinnan ja sisäilman välillä.



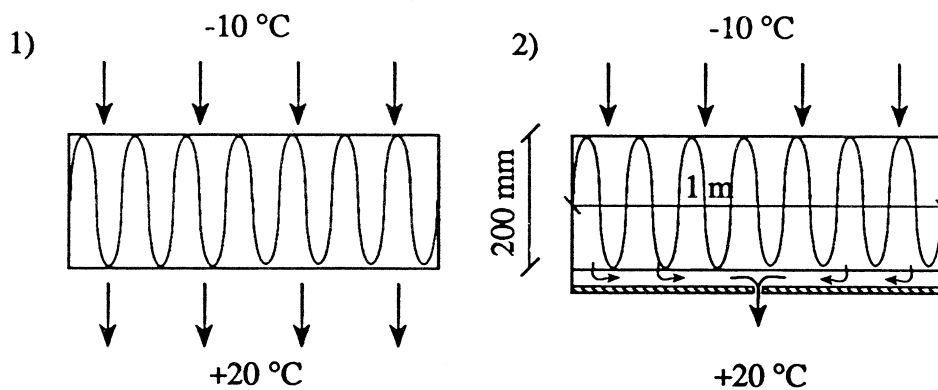
Kuva 2. Rakenteiden lämpötilajakaumat ja lämpötilasuhteet kahdella eri ilman tilavuusvirran arvolla tasaisesti jakautuneen ilman läpivirtauksen tapauksessa 16, 31. Rakenteen eristepaksuudet 100, 150 ja 200 mm lasivillaa.

Kuvien 1 ja 2 tulokset pätevät ilman tasaiselle läpisiirtäytymiselle. Jos rakenne koostuu useista materiaalikerroksista ja niiden välisistä tiloista, joiden kautta ilma kerros kerrokselta virtaa ulkopinnasta kohden sisäpintaa ja edelleen sisälle, lähestyy rakenteen lämpötekninen toiminta tasaista läpisiirtäytymistä ilman virtausreitien pituuden kasvaessa.

5.4 KORVAUSILMAN SISÄÄNOTTO KATTOELEMENTIN KAUTTA

Sovelluksena tarkasteltiin ilman lämpenemistä sen virratessa vaakatasossa olevan katon lämmöeristekerroksen läpi. Laskennallinen tarkastelu tehtiin kahdelle eri rakennetapaukselle (kuva 3):

- 1) tasainen läpisiirtäytyminen olettaen katon sisäpinta rei'itetyksi ja
- 2) kattoelementti, jonka alaosassa on kokoojarako, josta ilma johdetaan kapeasta raosta keskitetysti huonetilaan.



Kuva 3. Laskennallisessa tarkastelussa käytetyt rakenteet (tapaukset 1 ja 2) tarkasteltaessa korvausilman sisääntoa kattoelementin kautta.

Tarkasteluun valittiin vaakasuora kattorakenne, sillä sen yli voidaan pitää kauttaaltaan tasaista paine-eroa, jolloin myös läpivirtaus on tasainen. Pystysuorissa rakenteissa eri puolten ilman lämpötilaerot aiheuttavat pystysuunnassa epätasaisen ilmavirtauksen rakenteen läpi, mikä korostuu ilmaa hyvin läpäisevissä rakenteissa. Tarkastelussa sisä- ja ulkoilman lämpötilat olivat +20 ja -10 °C ja lämmönsiirtokerroin ulkopinnalla oli $\alpha_{\text{u}} = 15 \text{ W}/(\text{K m}^2)$.

Tasaisen läpisiotautumisen tapauksessa sisäpinnan lämmönsiirtokertoimelle käytettiin kahta oletusarvoa: $\alpha_s = 2,5 \text{ W}/(\text{K m}^2)$, mikä vastaa konvektiivista lämmönsiirtokerrointa luonnollisen konvektion tilanteessa, ja arvoa $\alpha_s = 7,0 \text{ W}/(\text{K m}^2)$, jolloin edellä mainittu arvo sisältää myös säteilylämmönsiirron pintojen välillä. Kokoojaraolisessa tapauksessa käytettiin kokoojalevyn alapuoliselle (sisä)pinnalle lämmönsiirtokerrointa $\alpha_s = 7,0 \text{ W}/(\text{K m}^2)$.

Tasainen läpivirtaus

Tavoitteena oli tarkastella sisäpinnan lämmönsiirtokertoimen vaikutusta läpivirtaavan ilman lämpenemiseen rakenteessa. Laskennan oletuksena oli, että materiaali ja sen läpi virtaava ilma ovat paikallisesti samassa lämpötilassa. Tämä pätee hyvin pienillä virtausnopeuksilla; ilman tilavuusvirta $1,0 \text{ l}/(\text{s m}^2)$ vastaa virtausnopeutta $1 \text{ mm}/\text{s}$ tasaisesti jakautuneessa virtauksessa.

Kuvassa 4 esitetään sisäänvirtaavan ilman lämpötila ilman tilavuusvirran funktiona 200 mm paksulla lämmöneristerakenteella, kun ulkoilman lämpötila on $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sisäpinnan lämmönsiirtokerroin α_s on joko $2,5$ tai $7,0 \text{ W}/(\text{K m}^2)$. Tässä tapauksessa rakenteen sisäpinnan lämpötila on sama kuin ilman sisäänvirtauslämpötila.

Tulosten perusteella sisäpinnan ja ilman välisellä lämmönsiirtokertoimella on varsin ratkaiseva vaikutus ilman lämpenemiseen läpivirtauksessa. Sisäänvirtaavan ilman lämpötilojen erot korostuvat ilman tilavuusvirran kasvaessa.

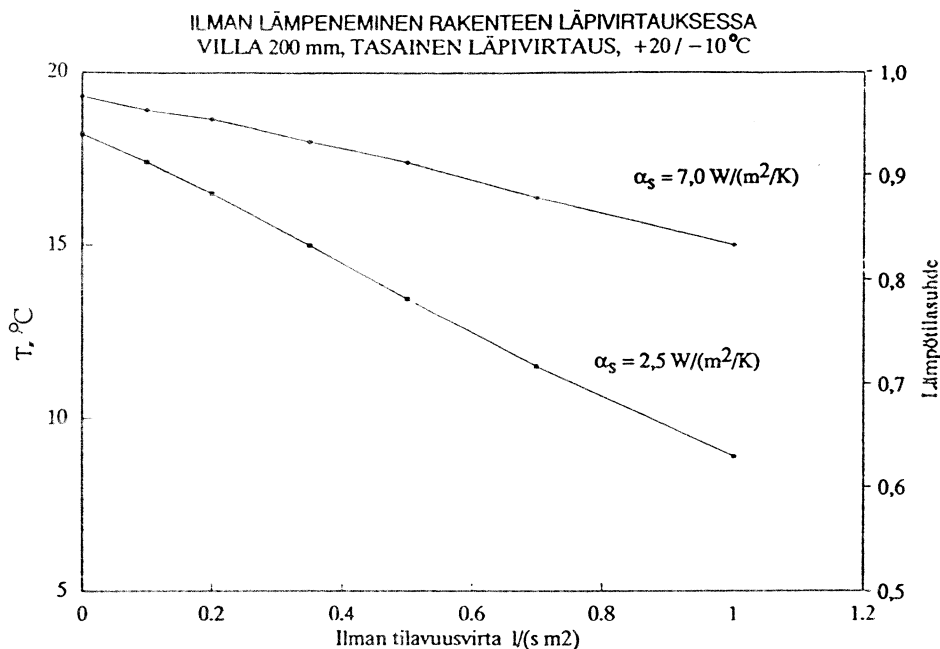
Ilman kokoojarako ja keskitetty sisäänpuhallus

Tarkastellun kattoelementin leveys on 1 m . Ilma virtaa tasan jakautuneena lämmöneristeen läpi eristeen alapuoliseen kokoojarakoon, jonka keskellä olevasta raosta ilma virtaa sisätilaan. Tässä tapauksessa lämmöneristeen alapuolinen kokoojarako heikentää lämmön talteenottoa ja korvausilman lämpenemistä. Tarkastelussa ilmaraon lämpötekniistä toimintaa analysoitiin käyttäen kahta toisistaan täysin poikkeavaa oletusta:

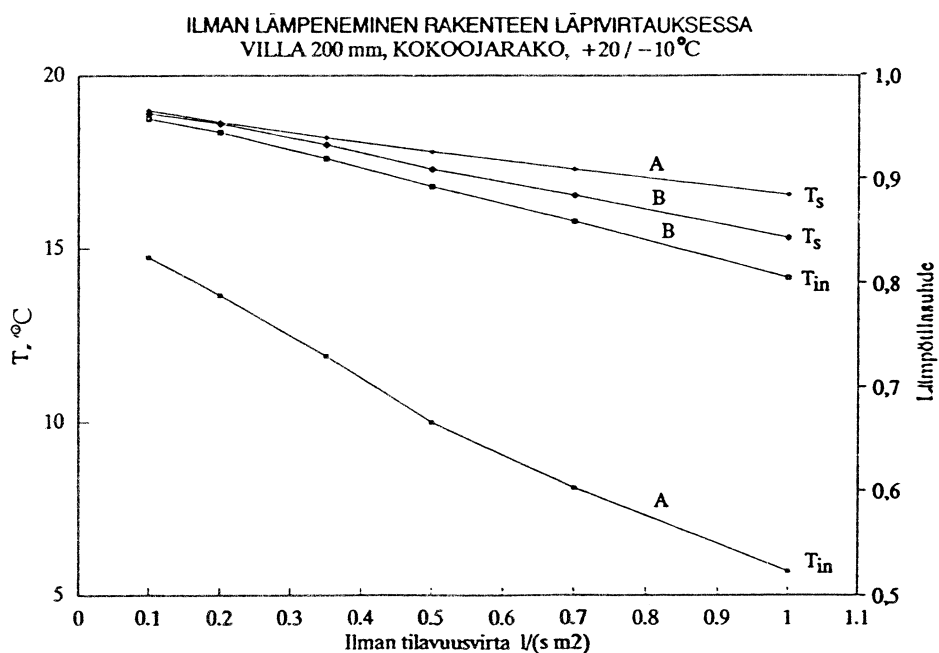
- A) 20 mm:n ilmaraossa on laminaarinen virtaus, ja sen lämmönsiirtovastus vastaa jokseenkin suljettua ilmarakoa.
- B) Rako on hyvin kapea, eikä raon ilmavälillä ole lämmönsiirtovastusta. Oletus vastaa rajatapausta, joka ei ole realistinen, mutta antaa kuvan ilmaraon lämmönsiirtovastuksen vaikutuksesta ilman lämpenemiseen.

Kuvassa 5 esitetään tarkasteltujen tapausten ilman sisäänpuhalluslämpötilat ja keskimääräiset sisäpinnan lämpötilat ilman tilavuusvirran funktiona. Sisäpinnan lämpötilajakaumat ovat molemmissa tapauksissa (A ja B) hyvin tasaiset, sillä ilman lämpeneminen tapahtuu pääosin sen virratessa eristekerroksen läpi. Ilman tilavuusvirralla $1,0 \text{ l}/(\text{s m}^2)$ oli sisäpinnalle tapauksessa B laskettu minimilämpötila $14,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Pinnan keskimääräinen lämpötila oli tällöin noin $1 \text{ }^\circ\text{C}$ edellä mainittua arvoa korkeampi.

Kun kokoojaraolla ei ole lämmönsiirtovastusta, ovat pinnan ja sisäänpuhallusilman lämpötilat lähes samat ja rakenteen toiminta lähestyy ilman lämpenemisen kannalta optimaalista tasaista läpivirtaustilannetta. Todellisessa rakenteessa kokoojarako täytyy mitoittaa riittävän suureksi, jotta ilma suotautuisi mahdollisimman tasaisesti lämmöneristeen läpi. Tällöin ilmaraolla on aina lämmönsiirtovastus, ja tapauksen B mukainen lämpötekniinen toiminta kuvaa lähinnä ideaalista ääritilannetta. Jos kattoelementin leveyttä kasvatetaan, ts. lisätään sisäänpuhallusrakojen jakoväliä, ilmavirtaus jakautuu epätasaisesti rakenteen alueelle, mikä heikentää ilman lämpenemistä.



Kuva 4. Ulkoilman (-10 °C) lämpeneminen ilman tilavuusvirran funktiona, kun ilma virtaa katon 200 mm paksun lämmöneristeen läpi tasaisesti sisätilaan (+20 °C). Sisäpinnan lämmönsiirtokerroinelle α_s on käytetty arvoja 2,5 ja 7,0 $\text{W/(m}^2 \text{K)}$.

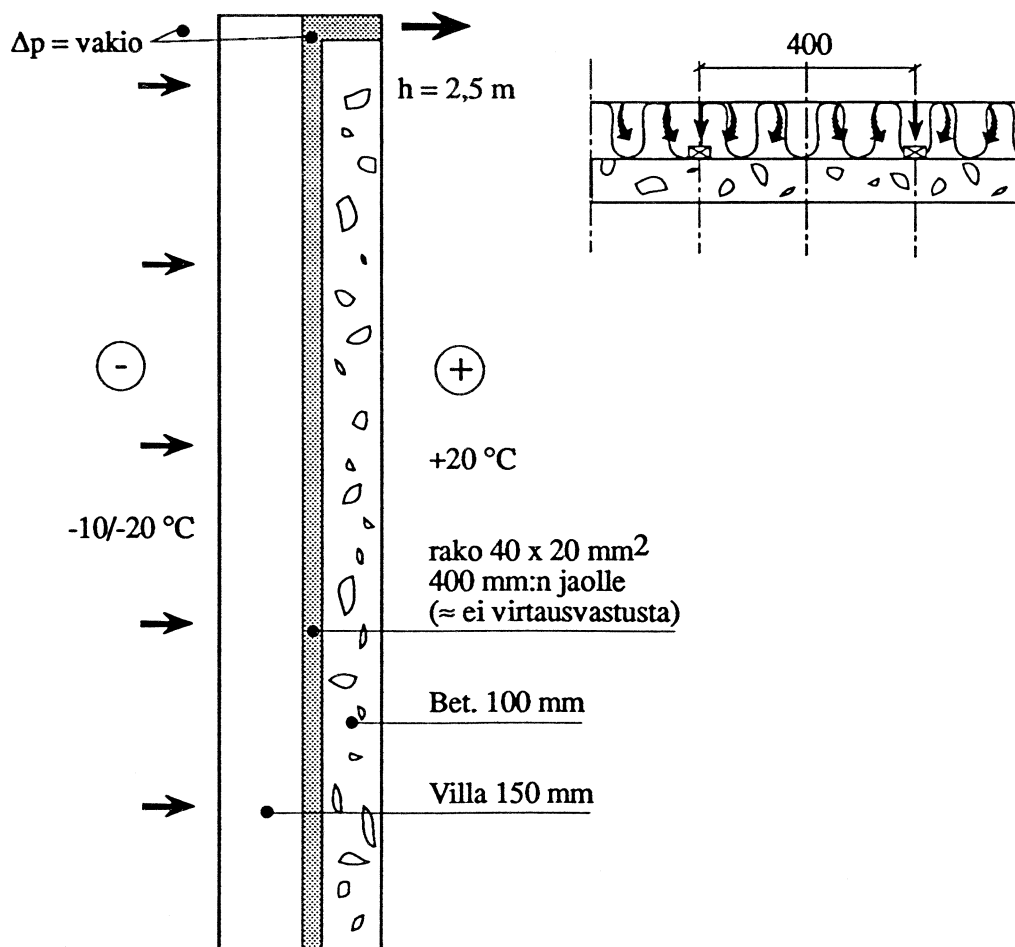


Kuva 5. Sisään virtaavan ilman lämpötila (T_{in}) ja katon sisäpinnan keskimääräinen lämpötila (T_s), kun ulkoilma (-10 °C) virtaa tasaisesti lämmöneristeen (200 mm) läpi ja kokoojaraon kautta sisätilaan (+20 °C). Raon lämmönsiirtovastukselle käytetty kahta eri oletusarvoa:

- A: 20 mm:n ilmarako, lämmönsiirtovastus kuten suljetulla ilmaraoilla ja
 - B: Kapea ilmarako, jolla ei ole lämmönsiirtovastusta.
- Lämmönsiirtokerroin rakenteen alapinnalla oli $7,0 \text{ W/(m}^2 \text{K)}$.

5.5 KORVAUSILMAN SISÄÄNOTTO BETONISEINÄN KAUTTA

Tarkastellussa sovelluksessa korvausilma johdetaan tuuletusraosta jokseenkin tasan jakautuneena lämmöneristekerroksen läpi pystysuuntaisiin kokoojarakoihin, jotka ovat eristeen ja sisäpuolisen betonilaatan rajapinnalla (kuva 6). Tästä ilma virtaa edelleen keskitetysti huonetilaan. Laskenta tehtiin olettaen tasan jakautunut virtaus eristeen läpi. Ilman lämpeneminen kokoojaraossa oletettiin pieneksi ja jätettiin huomiotta. Laskelmat tehtiin sisäilman lämpötilalla $+20\text{ °C}$ ja ulkoilman lämpötiloilla -10 ja -20 °C . Lämmönsiirtokertoimet ulko- ja sisäpinnalla olivat vastaavasti $\alpha_u = 15$ ja $\alpha_s = 7,5\text{ W/(K m}^2\text{)}$.

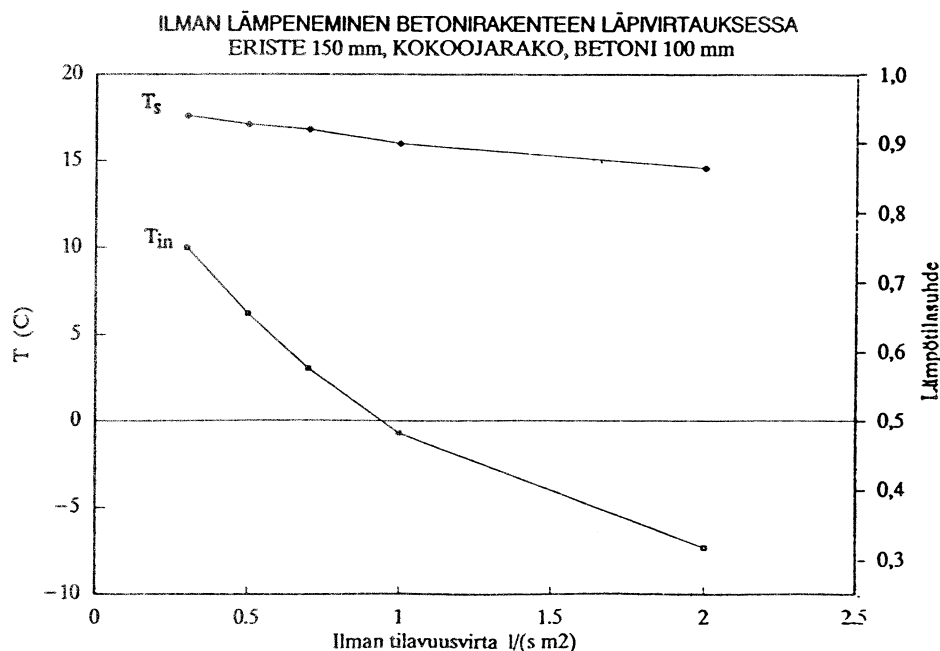


Kuva 6. Laskennallisesti tarkasteltu betoniseinärakenne, jossa korvausilma virtaa tuuletusraosta 150 mm:n lämmöneristeen läpi villan sisäpintaan rajoittuvaan kokoojarakoon ja tästä edelleen sisätilaan.

Rakenteen lämpötekniinen toiminta vastaa jokseenkin kokoojaraollisen kattoelemen-
tin toimintaa (kuva 5). Kuvassa 7 esitetään sisäänpuhallusilman lämpötila (T_{in}) ja
betonilaatan sisäpinnan minimilämpötila (T_s) sekä vastaavat lämpötilasuhteet ilman
tilavuusvirran funktiona ulkoilman lämpötilan ollessa -20 °C .

Ulkoilman lämpötilalla -10 °C tehty laskelma osoitti, että sekä korvausilman että
betonilaatan lämpötilasuhteet ovat jokseenkin riippumattomia lämpötilaerosta
rakenteen yli. Esimerkiksi tilavuusvirran ollessa $1,0\text{ l/(s m}^2\text{)}$ ilman lämpötilasuh-
teen arvo oli noin $0,5$ ja tilavuusvirran ollessa $2,0\text{ l/(s m}^2\text{)}$ arvo oli vastaavasti noin
 $0,33$. Lämpötilasuhteen toteutuminen lasketun mukaisena edellyttää tasaista,
hallittua ilmavirtausta ideaalisesti toteutettujen rakennekerrosten läpi.

Sisäpinnan kondenssivaara on hyvin pieni. Tilavuusvirralla $2,0\text{ l/(s m}^2\text{)}$ ja -20 °C :n
ulkolämpötilalla alin sisäpinnan lämpötila oli noin $+14,8\text{ °C}$, mikä $+20\text{ °C}$:n
sisäilman lämpötilalla edellyttää noin 72 % :n suhteellista kosteutta, jotta
pintakondenssia esiintyisi. Minimilämpötilat esiintyivät sisäpinnalla ilmaraon
kohdalla, mutta koska betonin lämmönjohtavuus on suuri, olivat myös pintalämpö-
tilat tasaiset, paikallisten erojen ollessa $< 0,2\text{ °C}$.



Kuva 7. Sisäänpuhallusilman lämpötila (T_{in}) ja betonilaatan sisäpinnan
minimilämpötila (T_s) ilman tilavuusvirran funktiona, kun ulkoilman lämpötila on
 -20 °C ja sisäilman lämpötila $+20\text{ °C}$.

5.6 KOSTEUSRISKIT ILMAN ULOSVIRTAUKSESSA /7/

Kun rakenteet ovat ilmapvirtausta hyvin läpäisevät, voivat painesuhteet ulko- ja sisätilojen välillä helposti muuttua sellaisiksi, että sisäilma virtaa rakenteen läpi ulospäin korvausilmareitin kautta. Tällöin on vaarana kosteuden tiivistyminen ja kerääntyminen rakenteisiin.

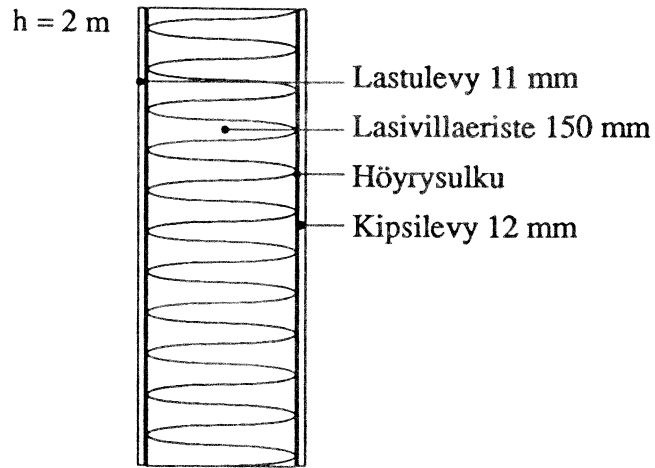
Kevyen puurunkoisen ulkoseinän kosteusteknistä toimintaa on tarkasteltu laskennallisesti olettaen jatkuva 10 Pa:n ylipaine seinän yläosaan. Tällainen paine-ero voi aiheuttaa tyypillisissä puurunkoisissa rakenteissa ilman läpivirtauksen, jonka tilavuusvirta on noin 1,0 l/(s m²). Esimerkiksi tasan jakautuneen virtauskentän tapauksessa (kuvan 3 tapaus), jossa vain lämmöneristekerros on virtausvastuksena, aiheuttaa 10 Pa:n paine-ero tätä huomattavasti suuremman ilman tilavuusvirran rakenteen läpi. Oletuksena oli pahin mahdollinen tilanne, jossa ilmapvirtaus ulospäin on jatkuva, sekä virtauksen kannalta epäedullisin rakenne (kuva 8), jossa sisäilma virtaa keskitetysti rakenteeseen sen yläosassa olevan raon kautta ja edelleen ulos rakenteesta sen alaosan ulkopinnan raosta.

Laskennassa rakenteen lämmönsiirtokertoimiksi ulko- ja sisäpinnalla asetettiin $\alpha_u = 15$ ja $\alpha_s = 7,5$ W/(K m²). Ulkoilman olosuhteina käytettiin Helsingin vuoden 1979 säätiedostoa. Sisäilman lämpötila oli +21 °C ja suhteellinen kosteus 30 %. Ulkoilman vastaavien arvojen ylittäessä sisäilmalle asetetut annettiin myös sisäilmalle ulkoilman arvot.

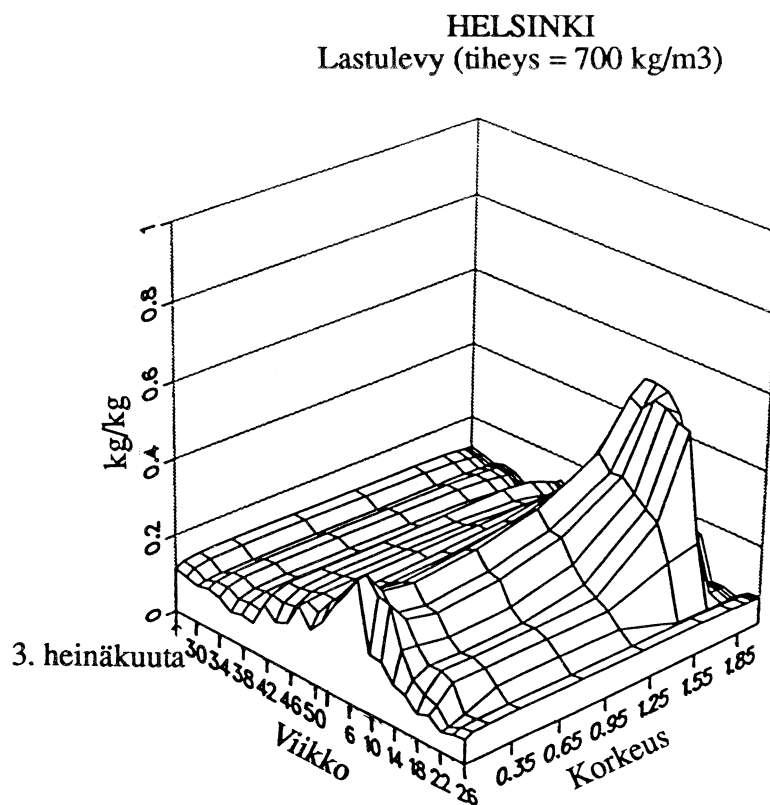
Kuvassa 9 esitetään lasketut rakenteen ulkopinnan lastulevyn korkeussuuntaiset kosteuspitoisuusjakaumat yhden vuoden aikana alkaen heinäkuun 3:nnestä päivästä. Talviaikana lastulevyn kosteuspitoisuudet nousevat hyvin korkeiksi, jopa arvoon 0,5 kg/kg. Vuotuista kosteuskertymää ei rakenteeseen tapahdu, mutta kylmän jakson erittäin korkeat arvot viittaavat mahdollisiin kosteusvaurioihin rakenteessa.

Mitä pidempi ja kylmempi talvikausi on, sitä suurempi on kosteuskertymä rakenteisiin. Pahimmillaan kosteus ei ehdi kuivua ennen seuraavan kostumisjakson alkua ja kosteus rakenteessa lisääntyy vuosittain. Kun korvausilma otetaan sisään

rakenteen läpi, tulee sisä- ja ulkoilman painesuhteiden olla hallittavissa siten, että pitkäaikaista ilman ulosvirtausta rakenteen kautta ei tapahdu.



Kuva 8. Sisäilman ulosvirtauksen kosteusteknisen toimivuuden laskennallisessa tarkastelussa käytetty rakenne [7, 8].



Kuva 9. Lasketut rakenteen ulkopinnan lastulevyn korkeussuuntaiset kosteuspi-toisuusjakaumat vuoden aikana heinäkuun alusta alkaen sisäilman virratessa rakenteen läpi ulos, kun talvuusvirta on 1,0 l/(s m²) [7, 8].

5.7 YHTEENVETO LASKENNALLISESTA TARKASTELOSTA

Suunniteltaessa korvausilman sisäänottamista rakenteiden kautta tulee ottaa huomioon seuraavat tekijät:

- Lämmöneristekerroksen ja erityisesti rakenteen sisäpinnan läpi **tasaisesti jakautunut ilmavirtaus** johtaa parhaaseen ilman lämpenemiseen rakenteessa. Samalla seinämän kokonaislämpöhäviöt pienenevät, optimitapauksessa jopa yli 20 %, ja ilman lämpötilasuhde voi olla yli 0,9. Käytännössä tarvittavalla tilavuusvirralla 1 l/(s m²) lämpötilasuhde on lasketussa esimerkkitapauksessa noin 0,85 villalämmöneristeen paksuuden ollessa > 100 mm.
- Ilman **lämpötilasuhde** säilyy rakenteen eri puolten lämpötilaerosta riippumattomana vakiona, kun ilman tilavuusvirta rakenteen läpi on vakio.
- **Pystyrakenteiden** läpi virtaava ilma jakaantuu eri puolten ilmatilojen lämpötilaerosta johtuen epätasaisesti. Tuulen vaikutukset painekenttään ja virtauksen jakaumaan voivat olla selvästi lämpötilaerosta johtuvia voimakkaammat. Mitä tiiviimpi rakenne, sitä tasaisempi jakauma saadaan. Toisaalta tarvittava paine-ero kasvaa suoraan verrannollisena rakenteen tiiviyteen.
- Läpivirtaavan ilman kokoaminen rakenteen sisäisiin ilmarakoihin ja keskitetty sisäänpuhallus alentavat ilman lämpenemistä tasaiseen läpivirtaukseen verrattuna. **Kokoojaraolisissa rakenteissa** voidaan ilman tilavuusvirralla 1,0 l/(s m²) päästä laskettujen esimerkkitapausten perusteella lämpötilasuhteeseen 0,5. Sisä- ja ulkolämpötiloilla +20/-10 °C tämä johtaa sisäänvirtaavan ilman lämpenemiseen noin +5°C:seen, mikä parantaa merkittävästi ilman vedotonta sisäänpuhallusta.
- Tarkastelluissa rakenteissa **ei ollut vaaraa sisäpinnan kondenssista** normaaleissa asuinhuoneistoissa esiintyvissä sisäilman kosteusoloissa ilman tilavuusvirran ollessa 1,0 l/(sm²). **Todelliset rakenteet** poikkeavat virtaus-

kentiltään laskennallisesti tarkastelluista ideaalisista rakenteista. Esimerkiksi rako lämmöneristeen läpi voi keskittää ilmavirtauksen paikallisesti, jolloin ilman lämpeneminen rakenteessa voi jäädä merkityksettömäksi, ja rakenteen sisäpinnan lämpötilat voivat vuotoraan kohdalla laskea jopa kondenssirajan alapuolelle. Rakenteen toimivuuden edellytyksenä on tasainen tiiviys rakenteen eri kohdissa.

- Dynaamisen eristerakenteen sovelluksissa rakenteen painesuhteiden tulee olla hallitut siten, että pitkäaikainen **sisäilman ulosvirtaus** rakenteiden kautta on **estetty**.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Kohonen, R., Kokko, E., Ojanen, T. & Virtanen, M. Thermal effects of air flows in building structures. Espoo 1985, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 367. 81 s.
- /2/ Kohonen, R., Kokko, E., Mähönen, T. & Ojanen, T. Mineraalivillaeristykseen ilmavirtaukset ja tuulensuojaus. Espoo 1986, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 431. 119 s.
- /3/ Nieminen, J., Kouhia, I., Ojanen, T., Piira, K. & Salonvaara, M. Integroidut kevyet rakenteet. Espoo 1992, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennusmateriaalilaboratorio ja LVI-tekniikan laboratorio. Energiataloudellisten rakennusten ja rakennusosien tutkimusohjelma ETRR, Raportti 10. 60 s.
- /4/ Ojanen, T. & Kohonen, R. Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 590. Espoo 1989, 106 s.
- /5/ Ojanen T., Salonvaara, M., Kohonen, R. & Nieminen, J. Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Laskentamenetelmät. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 595. 102 s.

- /6/ Ojanen, T. & Kohonen, R. Hygrothermal influence of air convection in wall structures. Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV. Orlando, December 4-7, 1989. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. S. 234 - 249.
- /7/ Ojanen, T. & Kumaran, M. K. Air exfiltration and moisture accumulation in residential wall cavities. Proc. of ASHRAE/DOE/BTECC Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V. Clearwater Beach, Florida, 7 - 10 Dec. 1992. Atlanta 1992, ASHRAE. 21 s.
- /8/ Ojanen, T. & Salonvaara, M. Ulkovaipparakenteiden simulointivalmiudet. Espoo 1993, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. Energiataloudellisten rakennusten ja rakennusosien tutkimusohjelma ETRR, raportti 24. 53 s.

6 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa on etsitty ratkaisuja, joilla ulkoa otettu korvausilma saataisiin lämpenemään huoneen yläosassa niin, ettei se aiheuta vetoa oleskelualueella. Aluksi tarkasteltiin laskelmin huoneen yläosaan puhalletun alilämpöisen ilmasuihkun käyttäytymistä. Kokeita varten valmistettiin kolme erityyppistä tuloimaelintä, joilla edellä esitettyä periaatetta voitiin testata. Tutkittavina oli ikkunan päältä ylöspäin puhaltava rako, katon rajasta säteittäin vaakasuuntaan puhaltava rako-suutin ja seinältä säteittäisesti yläviistoon puhaltava monireikäinen suutin. Näiden vedottomuutta tutkittiin ulkoilmaventtiilien tyyppihyväksyntäohjeen mukaisissa koeoloissa, kuitenkin niin, että koehuoneessa ikkunan alla oli levyradiaattorin sijaan konvektiivinen lämmityspatteri.

Koetulosten mukaan edullisesti sijoitetulla ja suunnatulla tuloilmaelimellä voidaan huoneeseen tuoda vedottomasti ulkoilmaa vähintään tavoitteeksi asetettu $8 \text{ dm}^3/\text{s}$, kun vetokriteerinä pidetään Fangerin vetoyhtälöllä laskettua tyytymättömien osuutta 20 % tai Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaista vetokäyrää 2. Nykyisin markkinoilla olevilla tyyppihyväksytyillä ulkoilmaventtiileillä tämä taso on parhaimmillaankin saavutettu vain käyttäen hyväksymisrajana vetokäyrää 3.

Määriteltyjä sisäänpuhallusratkaisuja koejärjestelyineen voidaan jo sinällään pitää lähtökohtina ulkoilmaventtiilien tuotekehitykselle. Seuraavassa esitetään lisäksi päätelmiä, arvioita ja suosituksia, jotka tulisi ottaa huomioon huonekohtaisia ulkoilman sisäänottolaitteita suunniteltaessa.

6.1 KYLMÄN ILMAN SISÄÄNPUHALLUKSEN PERIAATTEET

- * Kylmä tuloilma on puhallettava huoneen yläosaan siten, että se joutuu lämmityspatterin konvektion tuottaman tai muuten muodostuvan lämpimän ilmamassan päälle ja sekoittuu siihen. Jos kylmä ilmasuihku ohittaa tai syrjäyttää tämän lämpimän ilmamassan, se vajoaa viileänä oleskelualueelle ja aiheuttaa vetoa.

- * Tuloilmasuihku tulee suunnata mahdollisen patterikonvektion mukaan. Vastakkaiset tai poikittaiset virtaukset helposti väistävät toisensa eikä sekoittumista tapahdu.
- * Leveä tai säteittäinen suihku seinän tai katon pintaa pitkin on vedottomuuden kannalta edullinen: sekoittuminen ympäröivään ilmassaan on silloin tehokasta suuren kontaktipinnan ansiosta. Tällainen ohjauspinta toimii myös lämmönsiirtimenä, joka ottaa vastaan säteilylämpöä muualta huoneesta ja luovuttaa sitä ohi virtavaan ilmaan.
- * Tuloilman suuri lähtönopeus on edullinen, sillä se edistää sekoittumista ja auttaa kylmän ilmasuihkun pysymistä katon pinnassa mahdollisimman pitkään.
- * Suihkun edessä ei saa olla esteitä, jotka katkaisevat virtauksen tai irrottavat sen ohjauspinnasta.
- * Paras paikka ulkoseinään asennettavalle tuloilmaelimestä on seinän ja katon rajassa. Jos verhokotelo tai -lauta ovat suihkun tiellä, tuloilmaelin on tuotava näiden etupuolelle.

6.2 HUONEEN LÄMMITYSLAITTEIDEN HYVÄSIKÄYTTÖ

- * Vedottomuuden saavuttaminen nojautuu pääosin siihen, että kylmän tuloilmasuihkun sekoittumisalueella on käytettävissä lämmintä ilmaa. Tästä syystä huoneen lämmitys ja ilman sisäänotto on suunniteltava yhteensopiviksi.
- * Tässä tutkimuksessa on edellytetty, että huoneen lämmityspatteri on pääasiassa konvektiivisesti lämpöä luovuttava ja sijaitsee ikkunan ja tuloilmaelimen alapuolella.
- * Patterin konvektiovirtaus on ohjattava tuloilmasuihkun etu- ja alapuolelle, ei

taakse, päälle tai sivuille. Tämä periaate on otettava huomioon patterin ja tuloilmaelimen keskinäisen sijainnin sekä lähirakenteiden kuten verhojen, rullaverhojen, verholaudan, verhokotelon ja ikkunapenkin suunnittelussa.

- * Jos huoneessa on konvektiivisen patterin sijaan lattia- tai kattolämmitys, tässä tutkimuksessa saadut vedottomuuskokeiden tulokset pätevät vain kevättilanteen (ulkolämpötila 0 °C, patteriteho nolla) osalta. Patterilämmityksen vaikutusta koskevat koetulokset viittaavat kuitenkin selvästi siihen, että konvektiivisen patterilämmityksen puuttuessa säteispuhallus katon pintaa pitkin on vedottomampi kuin rakopuhallus ikkunan päältä ylöspäin.

6.3 TULOILMAELIMEN OMINAISUUDET

- * Tavoitteena on mahdollisimman suuren lähtönopeuden saavuttaminen pienellä paine-erolla. Tätä varten ulkoilmakanava ja sen komponentit, kuten ulkosäleikkö, hyönteisverkko, äänenvaimennin ja suodatin, on suunniteltava siten, että ne eivät kuluta merkittävää osaa ulko- ja sisäilman välisestä paine-erosta. Sisäänpuhallusosa on muotoiltava virtaviivaiseksi suuttimeksi, jonka virtaushäviö on mahdollisimman pieni.
- * Ilmavirran säätöelimenä tulee käyttää ainoastaan sisäänpuhallusaukkoa tai -suutinta. Erillinen virtaustielle asennettu säädin kuluttaa tarpeettomasti paine-eroa, jota tarvitaan tuloilmasuihkun vauhdittamiseen.
- * Sisäänpuhallusaukon tai -suuttimen tulee olla suunnattavissa siten, että edellä mainitut ilman sisäänpuhalluksen ja lämmönlähteiden hyväksikäytön periaatteet voidaan käytännössä ottaa huomioon. Myös käyttäjän tulisi voida suunnata tuloilmasuihkua siten, että mahdollinen vetoisa kohta huoneessa voidaan siirtää alueelle, jossa siitä ei ole haittaa.
- * Kattopintaan kiinnittyvien suihkujen käyttäytymistä voidaan ennustaa hyvin tutkimuksessa edelleen kehitetyllä suihkuteorialla, jolla saadaan esiin tuloilman lähtönopeuden, alilämpötilan ja tuloilmaelimen sekoi-

tusominaisuuksien vaikutus. Sekoittamisesta ei näytä olevan hyötyä. Teorialla voidaan määrittää yleisemminkin ilmaston jähdytystapauksessa tuloilmalaitteelta vaadittavia ominaisuuksia.

- * Sisäänpuhalluselimessä tulee olla riittävä kondenssieristys.
- * Ulkoilmaventtiilin täytyy olla helposti purettavissa puhdistusta varten.

Erikseen on tutkimuksessa tarkasteltu tuloilman esilämmittämistä ikkunan tai eristysrakenteen avulla. Tällaisen esilämmityksen yhdistäminen edellä esitettyihin ulkoilmaventtiileihin on houkutteleva mahdollisuus sekä vedottomuuden että energian säästön kannalta. Sen soveltaminen ulkoilman sisäänottoon vaatii vielä kokeellista tutkimusta ja tuotekehitystä, jotta näiden komponenttien yhteen liittäminen ja välttämätön takaisinvirtauksen esto voitaisiin tyydyttävällä tavalla toteuttaa.

Tekijä(t) Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo	Projektin nimi Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehityspärusteet	
Nimeke Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämispärusteet	Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (TEKES), Paloheimo Oy, Ercel Oy, Multitek Oy, Lapinleimu Oy, Ilmark Oy, Ekovilla Oy	
Tiivistelmä <p>Koneellisella poistolla toimivissa ilmanvaihtojärjestelmissä korvausilman otto asuinhuoneisiin ulkoseinään asennettujen venttiilien kautta on yleisesti aiheuttanut vetoisuutta. Tässä tutkimuksessa etsittiin ulkoilmaventtiilien tuotekehitykseen tärkeitä keinoja vedon välttämiseksi.</p> <p>Työhypoteesina oli periaate, että kylmä tuloilma on ensin saatava lämpenemään huoneen yläosassa ennen sen tuloa oleskelualueelle. Tämän periaatteen toimivuutta testattiin ensin laskelmin suihkuteorian ja huonevirtaus-ten laskentamallin pärusteella ja sitten mittauksin koehuoneessa. Tutkimuksessa parannettiin kattopintaan kiinnittyvien suihkujen teoriaa, jolla voidaan määrittää hyvän tuloilmaelimen ominaisuudet. Tutkittavana oli ikkunan päältä ylöspäin puhaltava rako, katon rajasta säteittäin vaakasuuntaan puhaltava rakosuutin ja seinältä säteittäisesti yläviistoon puhaltava monireikäinen suutin.</p> <p>Vedottomuuskokeet tehtiin 0 °C:n ja -20 °C:n ulkolämpötiloissa, jotka olivat myös tuloilman lämpötiloja. Ensin mainitussa tapauksessa ikkunan alla olevan konvektiivisen lämmityspatterin teho oli nolla ja jälkimmäisessä se asetettiin tuloilmavirran lämmönkulutuksen suuruiseksi. Sisälämpötila pidettiin vakiona 21 °C:ssa hajautetun lattia- tai seinälämmityksen avulla. Oleskelualueen vedottomuus arvioitiin turbulenssin huomioon ottavalla Fangerin vetoyhtälöllä ja Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 vetokäyrästä.</p> <p>Koetulokset osoittavat, että edullisesti sijoitetuilla ja suunnatuilla tuloilmaelimillä voidaan molemmissa ulkolämpötiloissa johtaa ilmaa huoneeseen ainakin 8 dm³/s, kun vetokriteerinä pidetään vetoyhtälöllä lasket- tua tyytymättömien osuutta 20 % tai vetokäyrästä käyrtä 2. Tällöin tuloilmasuihkun nopeuden tulee olla vähintään 2-3 m/s. Tämä voidaan myös käytännössä saavuttaa sisäänpuhallusaukkojen ja muiden virtaus-ten oikealla muotoilulla, ulko- ja sisäilman välisen paine-eron ollessa noin 10 Pa.</p> <p>Ilman esilämmityskeinoina tarkasteltiin kirjallisuuden pärusteella tuloilmaikkunan käyttömahdollisuutta ja laskelmin ulkoilman johtamista sisään seinän tai katon eristysrakenteen kautta. Molemmat keinot ovat peri- aatteessa toimivia ja jopa energiaa säästäviä, mutta käytännössä niiden yhteydessä tarvittavalle ilmavirran säädölle ja takaisinvirtauksen estolle ei ole vielä tyydyttävää ratkaisua.</p>		
Toimintayksikkö LVI-tekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 3, PL 206, 02151 ESPOO		
ISSN ja avainnimeke 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4362-9	Kieli suomi, engl. tiiv.	
Luokitus (UDK) 697.92:697.97:628.86 621.646.2	Avainsanat residential buildings, rooms, air intakes, ducts, draught, product development, air heaters, indoor air, exhaust diffusers, exhaust systems, ventilation, design, temperature, calculations, utilization, tests, structures, seasons	
Myynti: VTT, Informaatiopalvelulaitos PL 42, 02151 ESPOO Puh. (90) 456 4404 Telekopio (90) 456 4374	Sivuja 104 s.	Hintaryhmä C



Author(s) Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo	Name of project Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehityserusteet	
	Commissioned by Technology Development Centre (TEKES), Paloheimo Oy, Ercel Oy, Multitek Oy, Lapinleimu Oy, Ilmark Oy, Ekovilla Oy	
Title		
<p style="text-align: center;">Development of draughtless outdoor air inlets</p>		
Abstract		
<p>The fresh air inlets installed in bedrooms and living rooms commonly cause complaints about draught in residential buildings with exhaust ventilation systems. The aim of this study was to find draughtless solutions for the product development of outdoor air inlets.</p> <p>The working hypothesis was the idea that cold inlet air must first be heated in the upper part of the room space before it is distributed into the occupied zone. The applicability of this principle was first tested by doing calculations with a jet penetration method and a Computational Fluid Dynamics method and then by means of measurements in the test rooms. The theory of ceiling jets was improved to specify the favourable properties of the air diffuser. The inlet designs to be tested were a slot diffuser located above the window and directed towards the ceiling, a radial diffuser located and a multinozzle radial diffuser, both installed below the ceiling.</p> <p>The draught tests were performed at outdoor temperatures of 0 °C and -20 °C, which also were the supply air temperatures, respectively. At 0 °C the convective heater below the window was off and at -20 °C its heating power was equal to the supply air heat loss. The room temperature was kept constant at 21 °C by distributed floor or wall heating. The draught risk was evaluated by Fanger's equation taking into account the turbulence intensity, and by draught curves presented in the National Building Code of Finland, Section D2.</p> <p>The results show that by using well placed and directed air inlets it is possible to bring at least 8 dm³/s of outdoor air draughtlessly into the room, adhering to the draught limit defined as 20 % of dissatisfied occupants or as draught curve 2. In this case a minimum inlet velocity of 2-3 m/s should be used. This can be achieved in practice through good design of the inlet openings and other parts of the flow path if the pressure difference between the outdoor and indoor air is about 10 Pa.</p> <p>The ideas behind the preheating of intake air by channelling it via the so-called supply air window or through insulated constructions were studied based on the literature and calculations, respectively. In principle, both systems appear to be usable and also energy-saving, but in practice the solutions required for controlling the flow rate and preventing back flow have so far not been presented.</p>		
Activity unit		
Laboratory of Heating and Ventilation, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 206, FIN-02151 ESPOO, Finland		
ISSN and series title		
1235-0605 VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4362-9	Language Finnish, Engl. abstr.	
Class (UDC) 697.92:697.97:628.86 621.646.2	Keywords residential buildings, rooms, air intakes, ducts, draught, product development, air heaters, indoor air, exhaust diffusers, exhaust systems, ventilation, design, temperature, calculations, utilization, tests, structures, seasons	
Sold by VTT, Information Service P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland Phone internat. + 358 0 456 4404 Fax + 358 0 456 4374	Pages 104 p.	Price group C

- 1034 Parmanen, Juhani, Sysiö, Pauli & Heinonen, Reijo. Rakennuksen ääniolojen parantaminen. 1989. 30 s.
- 1063 Aho, Ilari & Laitinen, Ari. Absorptiolämpöpumppu öljylämmitysjärjestelmissä. 1989. 81 s.
- 1077 Kalliomäki, Pekka & Kohonen, Reijo. Rakennusten lämpötaseen ratkaisu. Menetelmät ja ohjelmistojen luotettavuuden arviointi. 1989. 129 s. + liitt. 13 s.
- 1091 Marjamäki, Päivi, Heimonen, Ismo & Katajisto, Katri. Lämmitys- ja ilmastointiprosessien dynaaminen simulointi HVACSIM⁺-ohjelmalla. 1990. 91 s. + liitt. 12 s.
- 1135 Nyman, Mikko (toim.). Suomalainen kylmän ilmaston rakennustekniikka. Raportti 9. Lämmitys ja ilmastointi Suomessa. 1990. 70 s.
- 1181 Aunela, Leena & Larjava, Kari. Raskasmetallipäästöt Suomessa. 1990. 64 s. + liitt. 6 s.
- 1189 Ojanen, Tuomo. Puun sähköiset mittausten menetelmät. Osa 4. Puun kosteudenjohtavuuden ja kapillaarisuuden määrittäminen gammasäteilylaitteiston avulla. 1990. 21 s. + liitt. 42 s.
- 1191 Hyvärinen, Juhani. Tiedonsiirtoratkaisut rakennusautomaatiojärjestelmissä. 1990. 89 s.
- 1194 Laitila, Päivi, Katajisto, Katri, Karjalainen, Sami & Lassila, Kenneth. Huonelämpötilan säätö. 1991. 134 s. + liitt. 11 s.
- 1195 Haikarainen, Jouni & Kohonen, Reijo. Muuttuvailmavirtaisten ilmanvaihtojärjestelmien toimivuus, säätö ja energiatalous asuinrakennuksessa. 1990. 125 s. + liitt. 38 s.
- 1246 Virtanen, Markku. Pientalojen energiankulutus. Suora sähkölämmitys. 1991. 42 s. + liitt. 22 s.
- 1254 Larjava, Kari, Siltanen, Torsti, Muurinen, Martti & Puustinen, Harri. Huonekaluteollisuuden lämmöntuotannon päästöt. 1991. 30 s. + liitt. 8 s.
- 1280 Kokko, Erkki, Mähönen, Timo & Rautiainen, Liisa. Raaka-aineiden ja työstöparametrien vaikutus EPS-solumuovien ominaisuuksiin. 1991. 40 s.
- 1309 Aunela, Leena & Larjava, Kari. Raskasmetallipäästöjen vähentäminen. Teknis-taloudellinen tarkastelu. 1991. 77 s.
- 1310 Saari, Mikko. Asuinhuoneistossa tarvittavien ilmavirtojen määrittäminen kuormituksen perusteella. 1991. 98 s. + liitt. 24 s.
- 1337 Laitila, Päivi, Kärki, Satu, Piira, Kalevi, Katajisto, Katri & Kohonen, Reijo. LVI-säätö- ja energiajärjestelmien koetus- ja testauslaitteisto (emulaattori). Laitetekninen kuvaus. 1992. 58 s. + liitt. 6 s.
- 1361 Parmanen, Juhani. Meluisten ajoneuvojen yksilöinti. 1992. 34 s. + liitt. 8 s.
- 1363 Ahonen, Markku, Xu, Mingzhe & Virtanen, Markku. Uudentyyppisten kaukolämmönjakokeskusten teknistä taloudellista analyysiä. 1992. 106 s. + liitt. 22 s.
- 1405 Parmanen, Juhani. Ääneneristävyyden CEN-ohjeet. 1992. 34 s.
- 1429 Tolvanen, Merja. Äänenvaimennusmateriaaleista irtoavien kuitumaisten epäpuhtauksien määrittäminen. 1992. 37 s.
- 1431 Äikäs, Erkki & Holmberg, Rolf. Saunan lämpötilat ja ilmanvaihto. 1992. 34 s.
- 1435 Kärki, Satu. LVI-automaatiolaitteiden emulaattoritestauksen testausmenettely ja sen soveltaminen. 1992. 131 s. + liitt. 25 s.
- 1440 Määttä, Jukka. Käyttöveden lämmityksen suunnittelu ja mitoitus. 1993. 49 s. + liitt. 23 s.
- 1443 Aho, Ilari & Xu, Mingzhe. Optimisäätöteorian soveltaminen rakennusten lämmitykseen. 1993. 68 s.
- 1459 Sysiö, Pauli. Kevyitten ajoneuvojen melun yksilöinti. 1993. 23 s. + liitt. 3 s.
- 1465 Sysiö, Pauli. Tieliikennemelun laskentamallin estekorjaus. 1993. 22 s. + liitt. 1 s.
- 1467 Ahonen, Markku. Lämpimän käyttöveden tuotto varaajalla varustetulla kaukolämmönjakokeskuksella. 1993. 42 s. + liitt. 15 s.
- 1468 Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet. 1993. 104 s.

