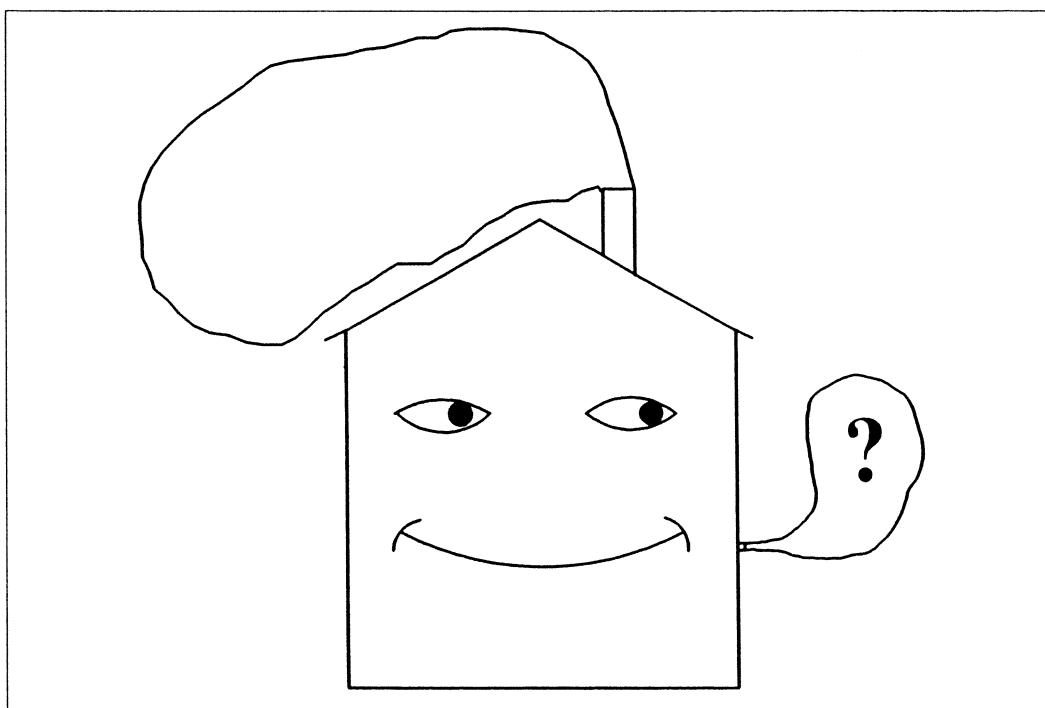


Veijo Siitonen, Jorma Heikkinen, Keijo Kovanen,
Marianna Luoma, Mikko Saari & Pertti Broas

Jäteilman seinäpuhallus asuin kerrostaloissa



Jäteilman seinäpuhallus asuinkerrostaloissa

Veijo Siitonen, Jorma Heikkinen, Keijo Kovanen,
Marianna Luoma & Mikko Saari

VTT Rakennustekniikka

Pertti Broas

VTT Valmistustekniikka



ISBN 951-38-4710-1
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1994

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Sisäilmasto- ja laitetekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Inneklimat- och installationsteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 455 2408

VTT Building Technology, Indoor Environment and Systems, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804,
FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 455 2408

VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja meritekniikka, Sähkömiehentie 4, PL 17052, 02044 VTT
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 456 7039

VTT Tillverkningssteknik, Skepps- och marinteknik, Strömkarlsvägen 4, PB 17052, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 456 7039

VTT Manufacturing Technology, Maritime Technology, Sähkömiehentie 4, P.O.Box 17052,
FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 7039

Tekninen toimitus Leena Ukskoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1994

Siitonen, Veijo, Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Luoma, Marianna, Saari, Mikko & Broas, Pertti. Jäteilman seinäpuhallus asuinkerrostaloissa [Extracting of waste air in multistorey residential buildings]. Espoo 1994, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1595. 106 s.

UDK 697.94:628.86:692.23

Avainsanat exhaust systems, mechanical ventilation, vents, ducts, exhaust air, exhaust emissions, residential buildings, apartment buildings, multistorey buildings, extraction, indoor air, walls, models, air quality, odors, measurement, air flow

TIIVISTELMÄ

Asuinkerrostaloista jäteilma on yleensä johdettu ulos katon yläpuolelta. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, voitaisiinko kunkin asunnon jäteilma poistaa suoraan ulkoseinältä aiheuttamatta rakennuksessa hajua tai muuta haittaa. Tämä helpottaisi asuntokohtaisten ilmanvaihtokoneiden käyttöä kerrostaloissa, kun erillinen kanavointi katolle jäisi pois.

Jäteilman seinäpuhalluksen toimintaa tutkittiin kolmessa kerrostalossa täysmitta-kaavakokein ja talojen pienoismalleilla tuulitunnelissa. Jäteilman kulkua talojen ulkopuolella kuvattiin videolla merkkisavua käyttäen ja laimenemista mitattiin merkkiainemenetelmällä.

Etenkin kenttäkokeissa seinäaukosta lähtevä jäteilmavana kieppui tuulen pyörteilyn vuoksi jatkuvasti eri suuntiin ja osui vain hetkittäin kuhunkin tarkastelupisteseen. Paikallinen laimennussuhde vaihteli vastaavasti tuuliolojen mukaan. Avoimelta seinustalta jäteilma-aukkojen lähialueilla mitattu laimennus oli yleensä suurempi kuin kattopoistojen laimenemisteorian mukaan laskettu minimilaimennus. Täten teorian ennustetta voidaan pitää turvallisena avoimelle seinälle sijoitettavien ilma-aukkojen mitoituksen kannalta. Seinän syvennyksissä ja soppitiloissa teoria ei toimi luotettavasti.

Jäteilman laimennustarpeen arviointia ja koetulosten arvostelua varten mitattiin keittiön poistoilman ($20 \text{ dm}^2/\text{s}$) hajukynnysarvot eräiden ruokien valmistuksen sekä tupakoinnin aikana. Voimakkain haju muodostui silakoiden paistosta, jolloin poistoilmaa oli laimennettava 168-kertaisesti eli pitoisuuteen 0,6 %. Koerakennusten ilmanottokohdista mitattu laimennus oli yleensä tätä raja-arvoa suurempi lukuun ottamatta tapauksia, joissa sekä jäteilma- että ulkoilma-aukot oli sijoitettu epäedullisesti seinän sisänurkkaukseen tai parvekkeiden väliin. Näissäkään tapauksissa asukkailta ei ole tullut hajun valituksia.

Suunnittelun apuvälineeksi kehitettiin laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida ilmanottoaikan ilman puhtauden pysyvyys vuositasolla. Koetulosten ja laskelmien perusteella laadittiin suunnitteluohjeet, joilla voidaan saavuttaa hyväksyttävä tuloilman laatu jäteilman seinäpuhallusta käytettäessä.

Siitonen, Veijo, Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Luoma, Marianna, Saari, Mikko & Broas, Pertti. Jäteilman seinäpuhallus asuinkerrostaloissa [Extracting of waste air in multistorey residential buildings]. Espoo 1994, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1595. 106 p.

UDC 697.94:628.86:692.23

Keywords exhaust systems, mechanical ventilation, vents, ducts, exhaust air, exhaust emissions, residential buildings, apartment buildings, multistorey buildings, extraction, indoor air, walls, models, air quality, odors, measurement, air flow

ABSTRACT

The usual way of extracting the waste air in a multistorey residential building is to conduct the air above the roof. The purpose of this study was to examine whether exhaust air from each apartment could be discharged outdoors via exhaust vents mounted on the outer wall in such a way that no odours or other harmful effects are caused. This would facilitate the use of an apartment-specific mechanical ventilation system in multistorey buildings as the duct-work to the roof could be left out.

The functioning of the wall exhaust system was examined in three multistorey buildings by full-scale experiments and by models in a wind tunnel. The motion of the waste air was recorded by a video camera and smoke tracer, and the dilution was measured by a tracer gas method.

Particularly during the full-scale experiments, the waste air wake fluctuated continuously in various directions because of the eddies, and only occasionally hit each measuring point. Correspondingly, the local dilution fluctuated according to the wind conditions. Near exhaust vents by the open wall, the dilution measured was usually higher than that predicted by the minimum dilution theory for roof exhaust. Thus, the theory could be useful when dimensioning exhaust vents on an open wall. In niches and corners, the theory does not function reliably.

In order to estimate the demands of waste air dilution and to evaluate the test results, the odour threshold values of exhaust air from a kitchen (20 dm³/s) during cooking or smoking were determined. The strongest odour came when frying herring. In that case the exhaust air had to be diluted 168 times, that is, to a concentration of 0.6 %. The dilution values obtained for the intake air of the test buildings were usually higher than the odour threshold value of 168, except when both exhaust and intake vents were adversely located on an inner corner of the walls or between balconies. Even in these cases, the inhabitants have not complained about odours.

A computational method as a design tool has been developed by which the yearly permanence of air purity at the intake vent can be estimated. On the grounds of the test results and computations, design criteria for a wall exhaust system have been presented by which an acceptable supply air quality can be obtained.

ESIPUHE

Asuntokohtaisten ilmanvaihtokoneiden käyttö kerrostaloissa helpottuisi olennaisesti, jos jäteilma voitaisiin poistaa asunnoista suoraan ulkoseinän läpi. Tämän poistotavan toimintaedellytyksiä selvitettiin teoriaan perustuvien laskelmin sekä tuulitunneli- ja täysmittakaavakokein. Tulokset olivat jäteilman hajautetulle seinäpoistolle myönteiset.

Tutkimuksen rahoittivat Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) sekä Suomen Ilmateknillinen Toimialayhdistys ry (SITY), ABB Fläkt Oy ja Vallox Oy. Rahoittajien edustajina tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat vastaavasti diplomi-insinöörit Esko Virtanen, Pekka Tuunanen ja Lars Lindeman sekä insinööri Matti Niinisaari, joka toimi ryhmän puheenjohtajana. Lisäksi johtoryhmään oli kutsuttu yli-insinööri Esko Kukkonen ympäristöministeriöstä.

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa tutkimuksen päävastuu oli Rakennustekniikka -yksiköllä, jossa projektipäällikkönä ja tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi diplomi-insinööri Veijo Siitonen. Jäteilman laimenemisen laskennalliset tarkastelut teki diplomi-insinööri Jorma Heikkinen, keittiöilman hajumittaukset suoritti diplomi-insinööri Marianna Luoma, kenttämittauksista vastasi filosofian kandidaatti Keijo Kovanen, avustajinaan teknikot Jarmo Laamanen ja Antti Mäkelä. Diplomi-insinööri Mikko Saari suoritti tuloilman puhtauden pysyvyydestä tarkastelut kehittämänsä laskentamenetelmän avulla. Tuulitunnelikokeista ja niiden raportoinnista vastasi diplomi-insinööri Pertti Broas VTT:n valmistustekniikan tutkimusyksiköstä.

Kenttämittaukset koerakennuskohteissa olivat mahdollisia vain rakennuttajilta ja urakoitsijoilta saadun moninaisen avun turvin. Tästä kiitos lankeaa Tampereella As Oy Kalevankilven osalta Haka-Rakentajat Oy:lle ja Kuopiossa Kiinteistö Oy Tikaskatu I ja II:n osalta Niiralankulma Oy:lle.

Espoo, huhtikuu 1994

Veijo Siitonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
ESIPUHE	5
1 JOHDANTO	8
2 LASKENNALLINEN TARKASTELU	9
2.1 JOHDANTO	9
2.2 SUIHKUTEORIAN KÄYTTÖ	9
2.2.1 Suihkun kääntyminen lämpötilaeron vaikutuksesta	9
2.2.2 Suihku sivuvirtauksessa	10
2.3 EPÄPUHTAUKSIEN LAIMENEMINEN.....	12
2.3.1 Seinä- ja kattopoistojen vertailu	12
2.4 WILSONIN JA CHUIN TEORIA	18
2.5 MITOITUSKÄYRÄSTÖN LUONNOS	22
2.6 ILMAVIRRRAN, NOPEUDEN JA TUULEN VAIKUTUS	23
2.7 KÄYTÄNNÖN NÄKÖKOHTIA.....	23
3 KEITTIÖN POISTOILMAN LAIMENNUSTARVE	25
3.1 JOHDANTO	25
3.2 KIRJALLISUUSKATSAUS	25
3.3 TUTKIMUSKOHTEET	26
3.4 TUTKIMUSMENETELMÄT	27
3.5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	27
3.5.1 Laboratoriomittaukset.....	27
3.5.2 Kenttämittaukset.....	29
3.6 YHTEENVETO.....	30
4 ULOSPUHALLUKOKKEET LABORATORIORAKENNUKSESSA	31
4.1 TÄYSMITTAKAAVAKOKKEET	31
4.1.1 Menetelmät.....	31
4.1.2 Tulokset	33
4.1.3 Tulosten tarkastelua.....	40
4.2 TUULITUNNELIKOKKEET LVI-LABORATORIORAKENNUKSEN PIENOISMALLILLA	41
4.2.1 Koelaitteisto	41
4.2.2 Pienoismalli	42
4.2.3 Koetilanteet	43
4.2.4 Laboratoriorakennuksen tuulitunnelikokeiden tulokset	44
4.2.5 Johtopäätöksiä laboratoriorakennuksen tuulitunnelikokeista	55

5	SEINÄPUHALLUKSEN TOIMINTA KOERAKENNUSKOHTEISSA.....	57
5.1	TÄYSMITTAKAAVAKOKEET	57
5.1.1	Tampere	57
5.1.2	Tulosten tarkastelu (Tampere)	62
5.1.3	Kuopio	62
5.1.4	Tulosten tarkastelu (Kuopio)	70
5.2	KOERAKENNUSKOHTEIDEN PIENOISMALLIKOKEET TUULITUNNELISSA	70
5.2.1	Koerakennusten pienoismallit.....	70
5.2.2	Koerakennuskohteiden visualisointikokeet savulla.....	72
5.2.3	Visualisointikokeiden tulokset.....	73
5.2.4	Koerakennusten merkkiainekokeet tuulitunnelissa	75
5.2.5	Johtopäätökset koerakentamiskohteiden tuulitunnelikokeista...	88
5.3	TULOILMAN PUHTAUDEN PYSYVYYS	89
5.3.1	Tavoite	89
5.3.2	Laskentaperiaate	89
5.3.3	Laskennan lähtötiedot ja kaavat	90
5.3.4	Tulokset	92
6	YHTEENVETO.....	102
6.1	Jäteilman laimeneminen	102
6.2	Hyväksymiskriteerit.....	103
6.3	Jäteilman seinäpuhalluksen toimivuus koekohteissa.....	103
6.4	Suosituksset jäteilman seinäpuhalluksen käytölle	104
6.5	Jatkotutkimuksen tarve	105
	LÄHDELUETTELO	106

1 JOHDANTO

Asuntokohtainen itsenäisesti ohjattava ilmanvaihtokone, joka on jo yleinen pientaloissa, vastaisi ilmeisesti parhaiten asukkaiden tarpeita myös kerrostaloasunnoissa. Sen käyttöönoton esteenä varsinkin korkeissa rakennuksissa on perinteinen vaatimus jäteilman johtamisesta katolle, mikä merkitsisi suurta määrää erillisiä pystykanavia tai vaikeasti hallittavaa yhteispoistoa huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden yhteydessä. Yksinkertaisinta olisi tietenkin vetää koneiden tulo- ja poistoilmaputket ulos suoraan seinän läpi, jolloin pitkät kanavanousut katolle jäisivät pois. Tätä ratkaisua ei kuitenkaan ole pidetty suotavana, koska vaarana on ulos puhalletun jäteilman kulkeutuminen samalla seinustalla oleviin ilmanottoaukoihin. On myös epäilty seinien likaantuvan jäteilma-aukkojen lähistöllä.

Koska jäteilman huoneistokohtainen seinäpuhallus ilmeisesti helpottaisi kehittyneemmän hajautetun ilmanvaihtotekniikan käyttöönottoa asuinkerrostaloissa, päätettiin selvittää, millä edellytyksillä se voisi tapahtua tuloilman laatua vaarantamatta. Tällöin keskeisiä kysymyksiä ovat ulos puhalletun jäteilman liikkuminen ja laimeneminen talon ulkopuolella eri sääoloissa sekä tuloilman puhtausvaatimukset, joiden mukaan ilmanottoaikat on valittava.

Lähtökohtana laimenemistarkasteluille oli käytettävissä laaja kattopuhallusta koskeva kanadalainen tutkimusaineisto ja teoria (ks. luku 2). Sen pätevyydestä jäteilman seinäpuhalluksen suhteen ei ollut kuitenkaan todisteita, joten laimenemisen tutkimisessa oli nojauduttava omiin kokeisiin. Niinpä tutkimusohjelmaan otettiin sekä tuulitunnelissa pienoismalleilla tehtäviä mittauksia että täysmittakaavakoikeita todellisissa rakennuksissa. Myös tuloilman hyväksyttävän laatutason määrittely oli kirjallisuustietojen puuttuessa perustettava omiin mittauksiin.

2 LASKENNALLINEN TARKASTELU

2.1 JOHDANTO

Jäteilmaprojektissa tutkitaan, onko mahdollista sijoittaa asuinhuoneistojen tulo- ja jäteilma-aukot huoneistojen ulkoseiniin. Ongelmana on ensi sijassa jäteilman sisältämien epäpuhtauksien kulkeutuminen asuntoihin tuloilman mukana.

Jäteilman epäpuhtauksien laimenemista rakennuksen seinämällä voidaan tutkia tuulitunnelissa tai luonnon oloissa täysmittakaavakokein. Tuulitunnelikokeet ovat hyvin kontrolloitavissa, mutta niissä ei voida täysin jäljitellä luonnonmukaista tuulta ja sen vaihteluja eikä myöskään lämpötilaerojen aiheuttamia nostevoimia. Vertailu täysmittakaavaan on siten tarpeen. Mittauksissa voidaan käsitellä vain rajallinen määrä tapauksia. Siksi on hyödyllistä saada mittausten perusteella teoria tai mitoitusperiaate, jonka avulla mittaustuloksia voidaan soveltaa laajemmin.

Seuraavassa tarkastellaan aluksi seinämästä puhallettavan suihkun taipumaa sivuvirtauksen ja lämpötilaeron takia. Sen jälkeen tarkastellaan pitoisuuden laimenemista maaston ja rakennuksen aiheuttamassa virtauskentässä.

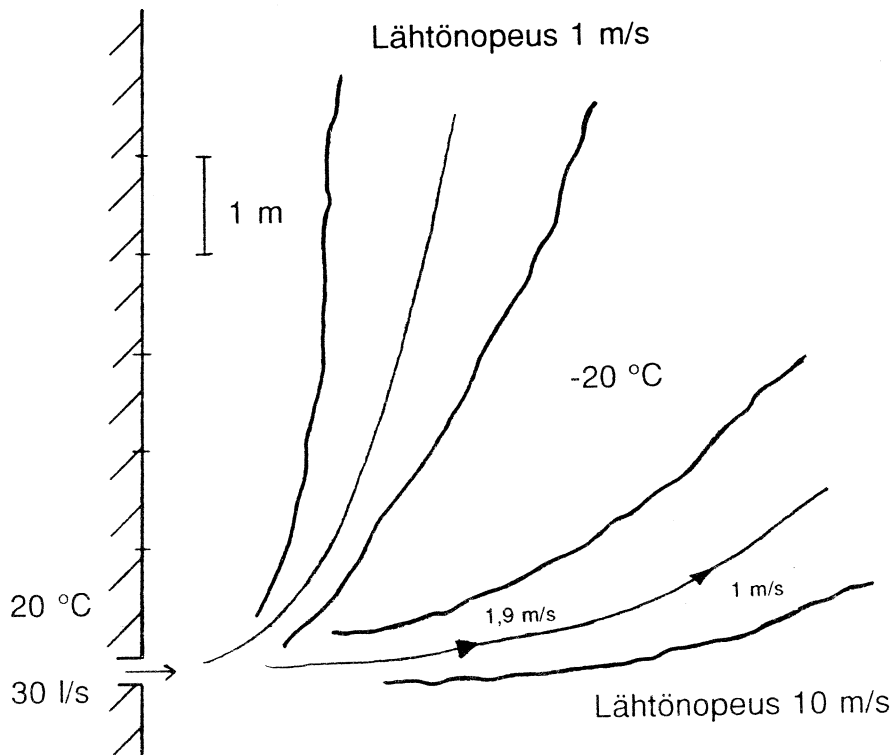
2.2 SUIHKUTEORIAN KÄYTTÖ

2.2.1 Suihkun kääntyminen lämpötilaeron vaikutuksesta

Kylmällä ja tyynellä säällä ilmasuihku pyrkii kääntymään ylöspäin seinän suuntaiseksi, koska jäteilma on ympäristön ilmaa kevyempää. Suihkun taipumaa tarkastellaan esimerkin avulla, jossa ulkolämpötila on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja jäteilmavirta 30 l/s vastaten noin 85 m^2 asunnon ilmanvaihdon tarvetta. Jäteilman lähtönopeus on joko 10 m/s tai 1 m/s . Suihkun taipuma lasketaan ilmanvaihtotekniikassa käytetyillä suihkuvirtauksen kaavoilla /3/.

Kuvan 1 mukaan suuren lähtönopeuden suihku poistuu kauemmaksi rakennuksen seinältä kuin pienen lähtönopeuden suihku. Pitoisuus samoin kuin lämpötilaero alenevat suihkussa samassa suhteessa kuin nopeus. Siksi suuren lähtönopeuden jäteilmasuuhku sekoittuu puhallusaukon lähialueella tehokkaasti ympäristöön: 5 metrin päässä jäteilma-aukosta maksimipitoisuus suihkussa on laimentunut 1/18:aan, kun lähtönopeus on 10 m/s . Lähtönopeudella 1 m/s vastaava laimeneminen vaatii yli 10 metrin etenemismatkan.

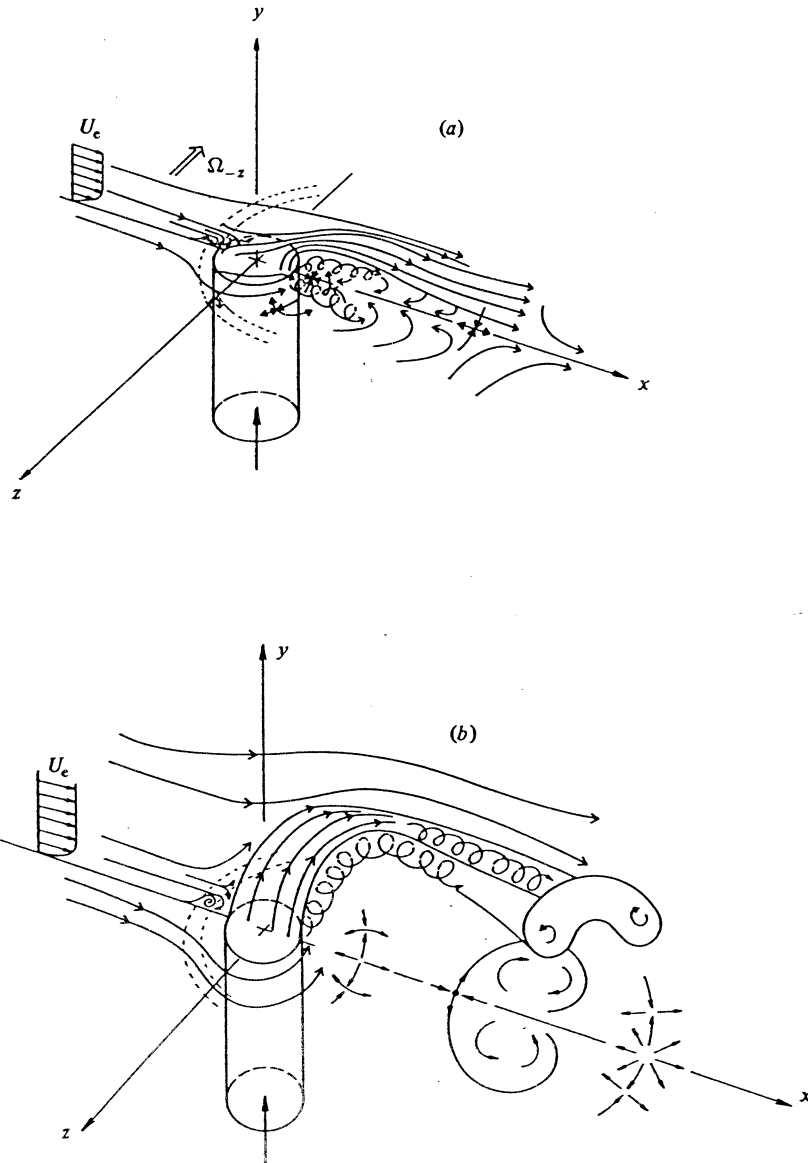
Suihkun nopea hidastuminen merkitsee sitä, että se on jo muutaman metrin päässä hiljaisenkin tuulen kuljetettavissa. Suuren lähtönopeuden etu on, että jäteilma on ehtinyt siihen mennessä laimentua enemmän.



Kuva 1. Seinältä puhallettavan suihkun taipuminen kun sisä- ja ulkoilman lämpötilaero on 40 °C. Ilmavirta on 30 l/s, puhallusnopeus pyöreästä aukosta 10 m/s (aukon halkaisija 62 mm) tai 1 m/s (aukon halkaisija 195 mm).

2.2.2 Suihku sivuvirtauksessa

Seinämästä sivuvirtaukseen puhaltavaa suihkua on tutkittu paljon hydromekaniikassa. Kuvassa 2 on esitetty virtauksen käyttäytyminen kahdella suihkun ja sivuvirtauksen nopeussuhteella. Voimakas sivuvirtaus painaa suihkun pintaan lähes välittömästi. Heikommassa sivuvirtauksessa suihku etenee kauemmaksi. Suihkun poikkileikkauksen profiili muuttuu pyöreästä munuaisenmuotoiseksi voimakkaiden suihkun sisäisten pyörteiden takia. Sekoittuminen on tehokasta pyörteilyn takia.



Kuva 2. Seinämältä puhallettavan suihkun käyttäytyminen sivuvirtauksessa. a) sivuvirtaus 20 m/s , b) sivuvirtaus 5 m/s . Puhallusnopeus pyöreästä aukosta on 10 m/s . [2].

2.3 EPÄPUHTAUKSIEN LAIMENEMINEN

Jäteilmasuihkun epäpuhtaudet laimenevat suihkun edetessä, koska suihkuun sekoittuu puhdasta ympäristön ilmaa. Sekoittumismekanismeja on kolme:

1. Suihkun impulssivoiman ja kääntymisen aiheuttama sekoittuminen.
2. Rakennuksen aiheuttama turbulenssi, johon vaikuttavat räystäät, esteet sekä rakennuksen taakse tuulen alapuolelle muodostuva pyörre.
3. Maan rajakerroksen turbulenssi, johon vaikuttavat maan pinnan karheus, kasvillisuus ja naapurirakennukset.

Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaisten rakennusten aiheuttamia virtauskenttiä, joista saa käsityksen rakennuksen ja maan rajakerroksen merkityksistä.

2.3.1 Seinä- ja kattopoistojen vertailu

Seuraavassa tarkastellaan kirjallisuudesta löytyviä epäpuhtauden laimenemisen mittaustuloksia, jotka antavat mahdollisuuden katto- ja seinäpoistojen vertailuun. Mittausten rakennus on muodoltaan yksinkertainen ja naapurirakennuksia ei ole. Poistoilman lähtönopeus on pieni. Sekoittumisen aiheuttajina ovat lähinnä rakennuksen itsensä muodostama virtauskenttä sekä tuulen turbulenssi.

Kuvasta 3 näkyy kaaviomaisesti, miten katolta poistettavan jäteilman epäpuhtaudet leviävät rakennuksen pinnoille. Epäpuhtaudet siirtyvät katolla myös vastatuuleen katolle muodostuvan pyörteen vaikutuksesta. Kuvassa 4 on vastaavia mittaustuloksia rakennuksen pinnalle muodostuvista pitoisuuskentistä, kun jäteilman poistopaikkaa vaihdellaan. Pitoisuuskäyrien lukuarvot koskevat dimensiotonta pitoisuutta, joka yleistää pitoisuusmittausten tulokset samanmuotoisille erikokoisille rakennuksille, eri tuulen nopeuksille sekä erilaisille epäpuhtauspäästöjen määrille. Se määritellään

(1)

$$K = \frac{CU_H A}{Q},$$

jossa	K on	dimensioton pitoisuus
	C	epäpuhtauden tilavuuspitoisuus
	U_H	tuulen nopeus rakennuksen korkeudella
	A	rakennuksen otsapinta (korkeus kertaa leveys)
	Q	epäpuhtauden tilavuusvirta jäteilmassa.

Usein kiinnostaa suhteellinen pitoisuus verrattuna jäteilman alkupitoisuuteen ennen ulospuhallusta, mikä voidaan ilmaista esimerkiksi prosentteina. Yleensä prosenttiosuuden sijaan käytetään sen käänteisarvoa eli laimennusta. Jäteilman epäpuhtausosuus 1 % tarkastelupisteessä tarkoittaa siten laimennusta 100. Laimennus määritellään kaavalla

$$D = \frac{C_e}{C}, \quad (2)$$

jossa D on laimennus,
 C_e jäteilman pitoisuus poistokanavassa ja
 C jäteilman pitoisuus tarkastelukohdassa.

Laimennuksen avulla lausuttuna dimensioton pitoisuus K on

$$K = \frac{U_H A}{Q_e D}, \quad (3)$$

jossa Q_e on jäteilman tilavuusvirta.

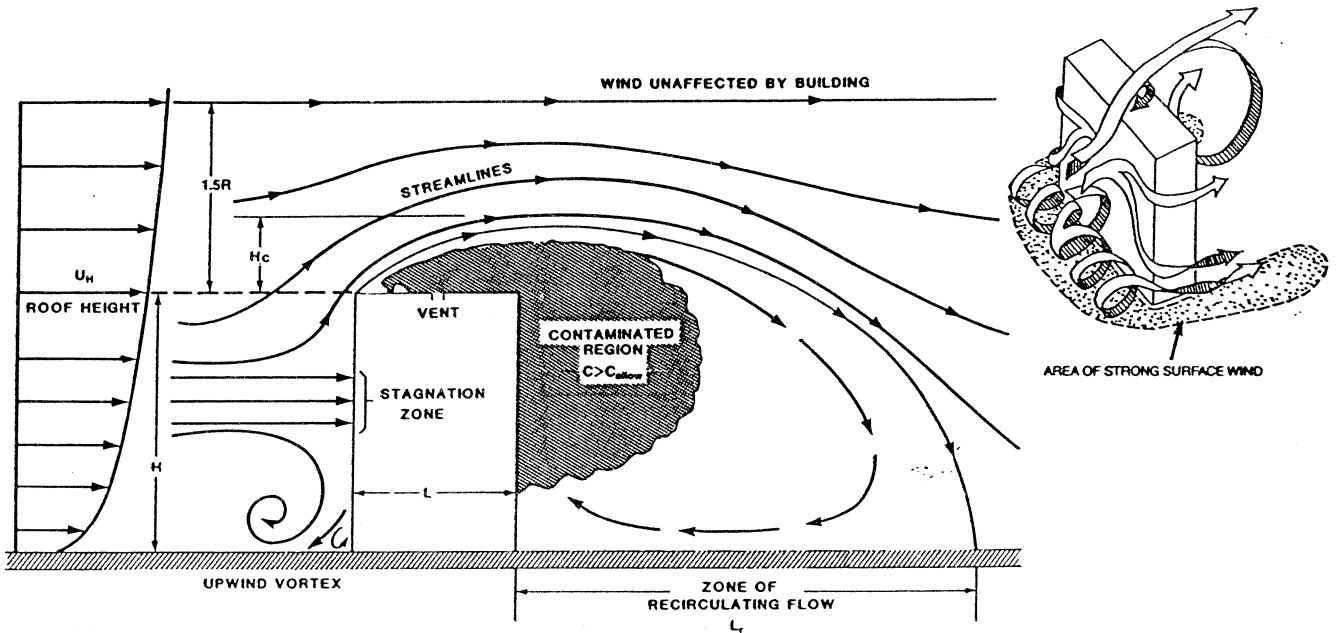
Laimennukselle on esitetty jäljempänä luvussa 3 vähimmäisarvo 168, joka vastaa silakanpaiston jäteilmavirran laimenemista sille tasolle, että hajua ei havaita. Seuraavassa tarkastellaan, millä edellytyksillä tämä hajukynnys vastaa kuvan 4 pitoisuuskäyrää $K = 10$. Oletetaan rakennuksen korkeudeksi 30 m ja valitaan jäteilmavirraksi ilmanvaihtokerrointa 0,5 1/h vastaten 1,67 m³/s. Kaavasta 3 saadaan tuulen nopeudeksi $U_H = 4,7$ m/s pitoisuuskäyrällä $K = 10$. Tätä pienemmillä tuulen nopeuksilla pitoisuus on käyrän $K = 10$ kohdalla hajukynnystä suurempi. Suuremmilla tuulen nopeuksilla pitoisuus on vastaavasti hajukynnystä pienempi.

Jos rakennuksen korkeus olisi valittu puolta pienemmäksi eli 15 m:ksi, saataisiin tuulen rajanopeudeksi 2,3 m/s. Hajukynnys ylittyy siten useammin suuressa kuin pienessä talossa. Syynä on, että epäpuhtauden tuotto oletettiin verrannolliseksi rakennuksen tilavuuteen, kun taas epäpuhtauden laimeneminen rakennuksen ulkopuolella on verrannollinen rakennuksen otsapinta-alaan.

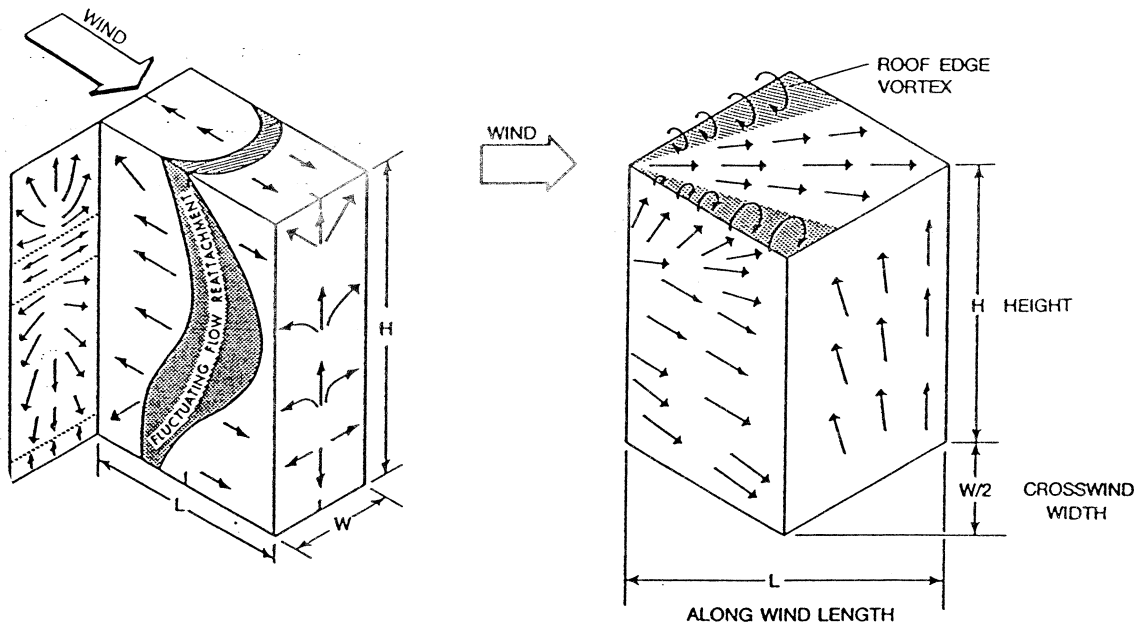
Kuvassa 5 on vastaavat pitoisuuskäyrät keskitetyille seinäpuhallukselle eri tuulensuunnille. Pitoisuuskäyrien $K = 10$ sisälle jäävät alueet ovat suunnilleen yhtä suuria kuin kattopuhalluksessakin. Pahin tilanne on tuulta vastaan olevalla seinällä, kun poistopiste sijaitsee patopisteessä, joka sijaitsee hieman rakennuksen keski-korkeuden yläpuolella (vertaa kuvia 3 ja 5).

Tuloksia voitaneen soveltaa myös tässä projektissa tutkittavaan hajautettuun seinäpoistoon. Oletetaan, että edellä mainitussa 30 m korkeassa talossa on 50 huoneistoa ja niillä omat jäteilmän poistopisteet seinillä. Talon epäpuhtaustuotto jakautuu nyt 50 osaan, joten edellä mainittua hajukynnyskäyrää $K = 10$ vastaa nyt käyrä $K = 500$. Kuvassa 5 sen sisälle jäävä alue ulottuu pahimmissa tilanteissa poistopisteestä 2 - 3 metrin päähän. Tällä alueella ei saisi olla ilman sisäänottopisteitä. Vierekkäisten poistopisteiden vaikutukset periaatteessa summautuvat, mutta summavaikutus suurentaa korkean pitoisuuden aluetta vain vähän, jos minimietäisyys kahden poistopisteen välillä on esimerkiksi yli 6 m. Tämä johtuu siitä, että laimeneminen on likimain verrannollinen poistopisteestä lasketun etäisyyden neliöön. Epäpuhtauksien summautumisen vähäinen merkitys on todettu myös tämän tutkimuksen kenttäkokeissa.

Kuvien 4 ja 5 tulosten perusteella jäteilmän seinäpuhallus on mahdollista toteuttaa ilman, että pitoisuudet tuloilmassa olisivat oleellisesti suurempia kuin kattopuhalluksessa. On huomattava, että edellä käsitellyssä esimerkissä jäteilmän lähtönopeus oli ja laimeneminen perustui suurehkoon tuulen nopeuteen (4,7 m/s). Pienen tuulen nopeuden tilanne voidaan hallita esimerkiksi käyttämällä suurta puhallusnopeutta.

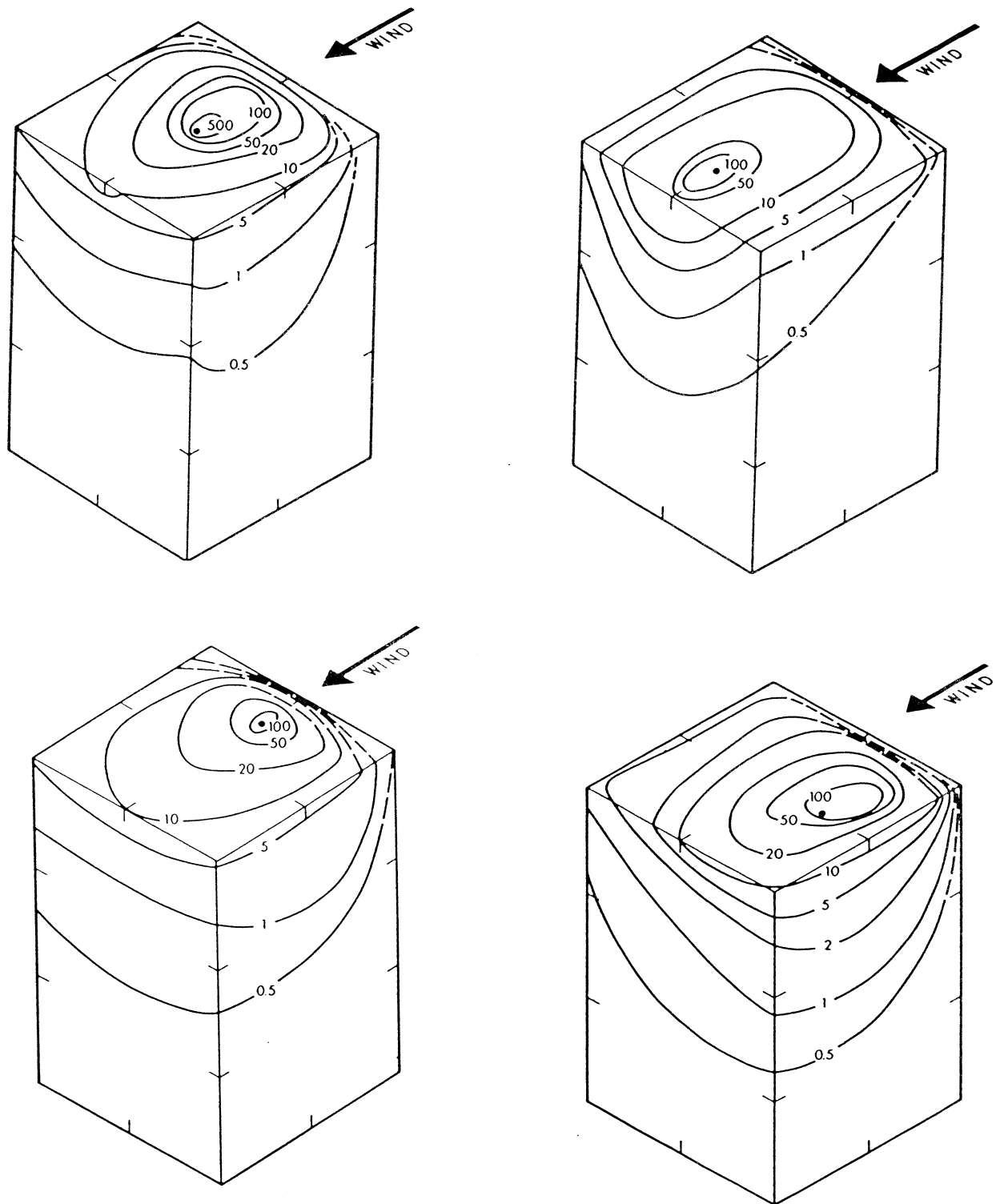


Flow Patterns Around a Rectangular Building

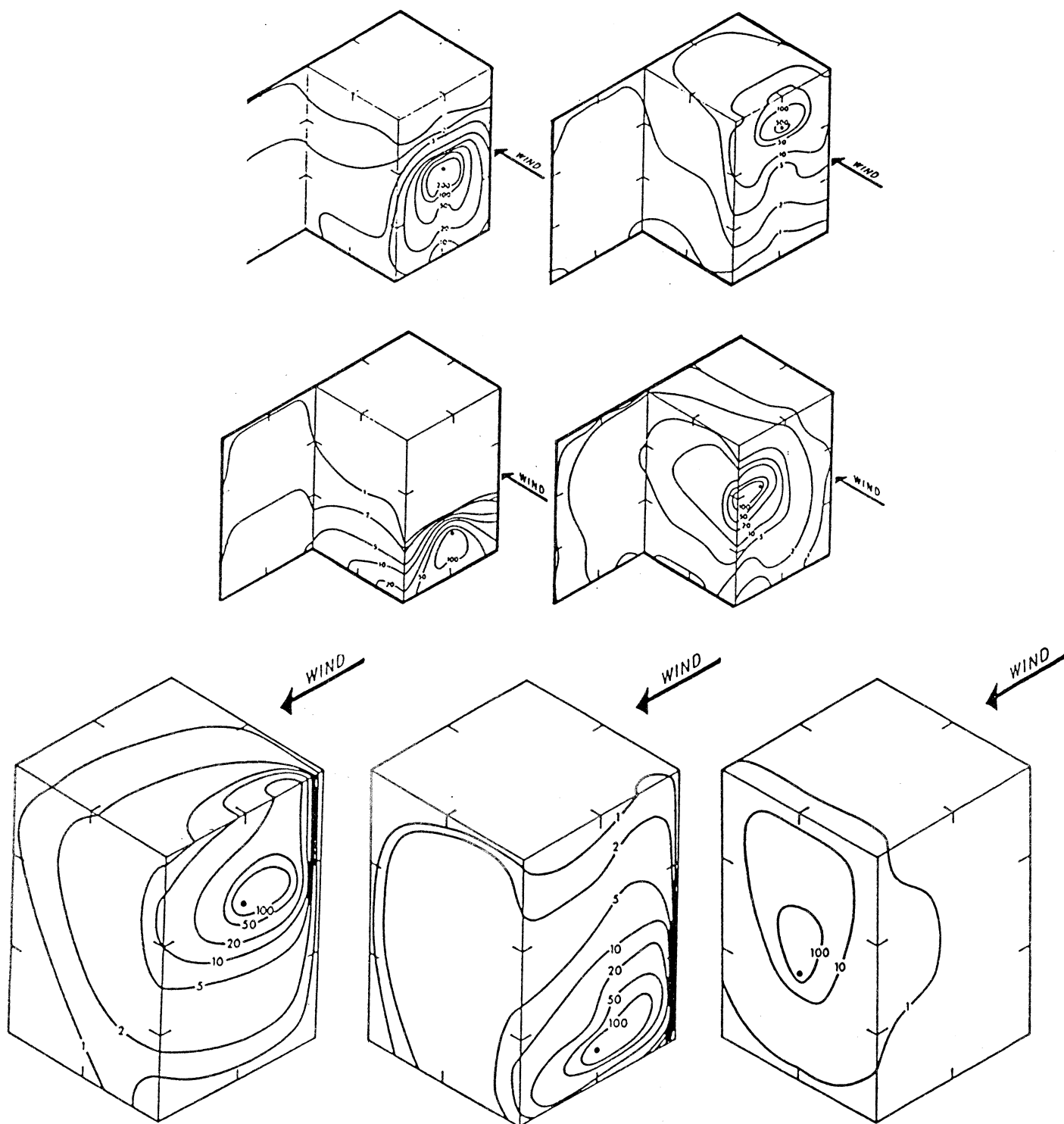


Surface Flow Patterns and Building Dimensions

Kuva 3. Virtauskenttiä yksinkertaisten korkeiden rakennusten ympärillä sekä pinnoilla /1/.



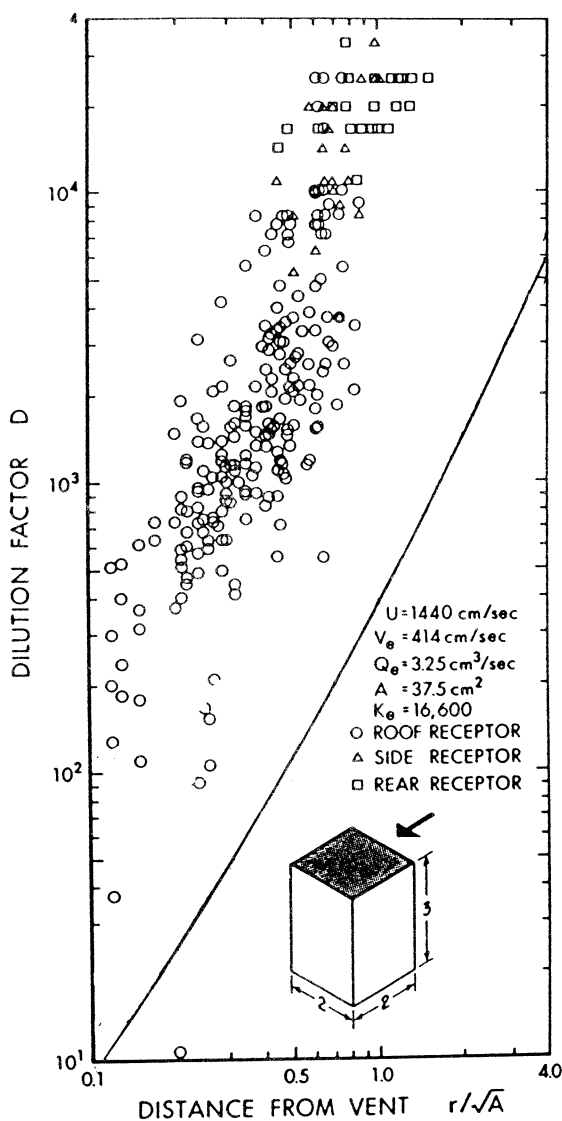
Kuva 4. Pitoisuusjakautumat yksinkertaisen rakennuksen pinnoilla kattopoistoa ja pientä jäteilman lähtönopeutta (29 % tuulen nopeudesta) käyttäen /4/. Jäteilman pitoisuus on 1 680, jos rakennuksen korkeus on 30 m, ilmanvaihtokerroin 0,5 1/h ja tuulen nopeus 4,7 m/s.



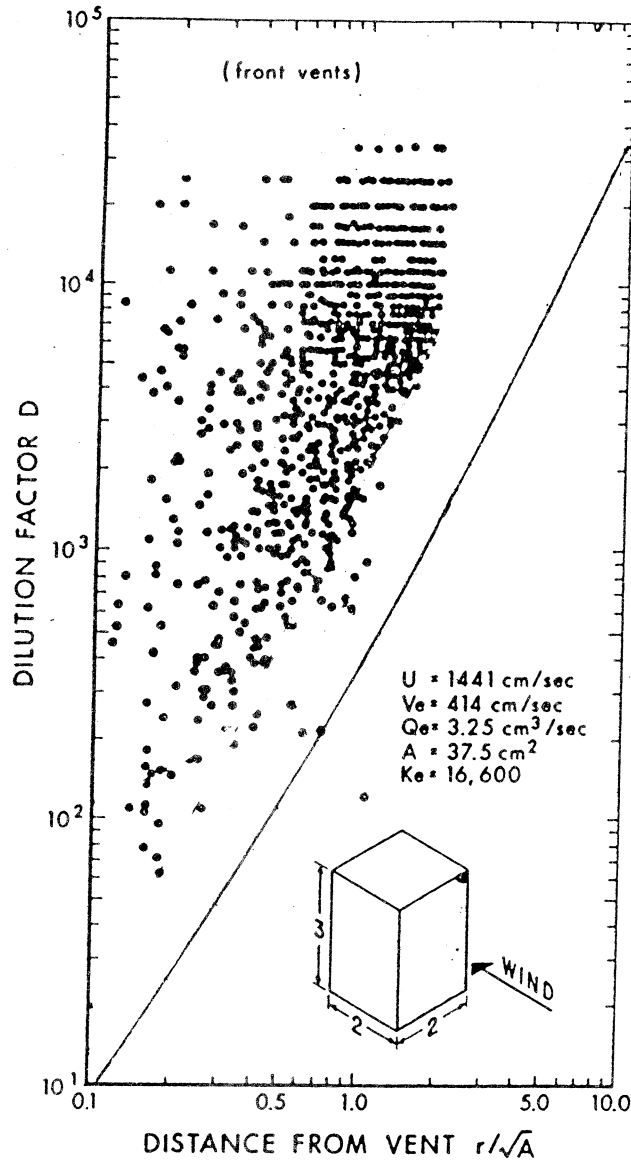
Kuva 5. Pitoisuusjakautumat yksinkertaisen rakennuksen pinnoilla keskitettyä seinäpoistoa ja pientä jäteilmän lähtönopeutta (29 % tuulen nopeudesta) käyttäen. Jäteilmän pitoisuus on 1 680, jos rakennuksen korkeus on 30 m, ilmanvaihtokerron 0,5 1/h ja tuulen nopeus 4,7 m/s. /5/.

2.4 WILSONIN JA CHUIN TEORIA

Edellä esitettyjen pitoisuusjakautuminen mittaaminen erilaisissa käytännön suunnittelutilanteissa ei ole mahdollista. Sen takia on kehitetty teorioita suurimman mahdollisen pitoisuuden eli minimilaimennuksen ennakoimiseksi. Kuvassa 6 on esitetty Wilsonin ja Chuin teorian [1] mukainen minimilaimennuskäyrä yhdessä kuvan 4 mittaustulosten kanssa. Vaaka-asteikolla on dimensioton etäisyys jäteilman poistopisteestä ja pystyasteikolla on vastaava laimennus. Yhtä pistettä lukuun ottamatta laimennukset ovat suurempia kuin teoria ennustaa.



Kuva 6. Katolta puhallettavan jäteilman laimennus (kuvan 4 tulokset) verrattuna Wilsonin ja Chuin teorian ennakoimaan minimilaimennukseen. Katolta ja seiniltä mitatut laimennukset on eritelty. Vaaka-asteikko on tehty dimensiottomaksi käyttäen rakennuksen otsapinta-alaa. Vaaka-asteikon arvot on kerrottava 69:llä, jos etäisyys tehdään dimensiottomaksi puhallusaukon pinta-alalla.



Kuva 7. Tuulen puoleiselta seinältä puhallettavan jäteilman laimennus (kuvan 5 tulokset) verrattuna Wilsonin ja Chuin teorian ennakoimaan minimilaimennukseen. Vaaka-asteikko on tehty dimensiottomaksi käyttäen rakennuksen otsapinta-alaa. Vaaka-asteikon arvot on kerrottava 69:llä, jos etäisyys tehdään dimensiottomaksi puhallusaukon pinta-alalla.

Wilson ja Chuin teoria on kehitetty kattopuhallusta varten, mutta sitä voi käyttää sekä seinällä että katolla sijaitseviin ilman sisäänottopisteisiin, kuten kuvasta 6 voidaan havaita. Teoria sopii kuvan 7 mukaan hyvin myös kuvassa 5 esitettyihin seinäpuhalluksen tuloksiin, joten se lienee sopiva myös tämän projektin tarpeisiin /6/. Teoria perustuu tuulitunnelimittauksiin ja siinä on otettu huomioon kaikki edellä mainitut sekoittumismekanismit. Teorian mukaan minimilaimennus on muotoa

(4)

$$D_{\min} = (D_0^{0,5} + D_s^{0,5})^2,$$

jossa D_{\min} tarkoittaa kaavan (2) määrittelemää laimennusta epäedullisimmalla tuulen suunnalla. Yhtälössä D_0 ja D_s ovat muotoa

(5)

$$D_0 = 1 + 7,0\beta \left(\frac{V_e}{U_H} \right)^2$$

ja

(6)

$$D_s = B_1 \left(\frac{T_a}{T_w} \right)^{0,33} \left(\frac{U_H}{V_e} \right) \left(\frac{S^2}{A_e} \right),$$

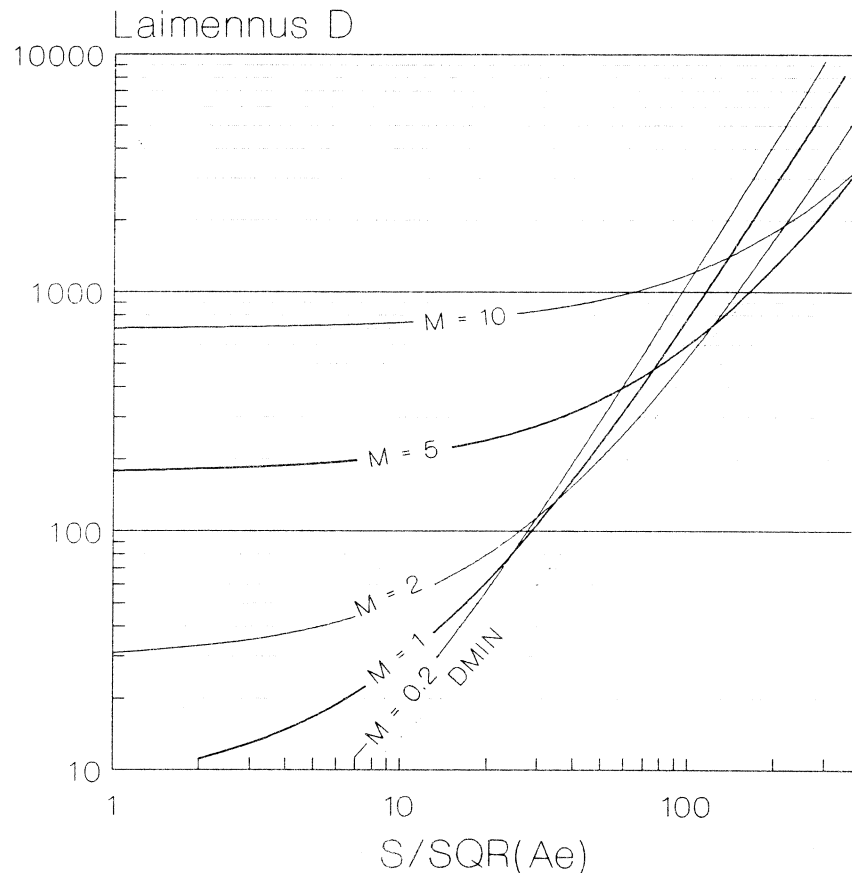
jossa	D_0 on	alkusekoittuminen, joka johtuu itse poistoilmasuihkun aiheuttamasta turbulenssista,
	D_s	etäisyyssekoittuminen, joka johtuu rakennuksen ja maan rajakerroksen aiheuttamista turbulensseista,
	β	estekerroin (= 1 avoimelle, = 0 peitetyle puhallusaukolle),
	V_e	poistoilman tehollinen lähtönopeus,
	A_e	vastaava puhallusaukon poikkipinta-ala
	U_H	tuulen nopeus räystääskorkeudella,
	S	poiston ja tarkastelupisteen välinen etäisyys rakennuksen pintaa pitkin,
	B_1	0,0625 ($\beta=1$ ja $V_e/U_H > 0,5$); 0,0204 ($\beta=0$ tai $V_e/U_H < 0,5$),
	T_a	mittausaika
	T_w	referenssiaika = 10 minuuttia ja
	M	V_e/U_H on nopeussuhde.

Kaava perustuu varsin yksinkertaiseen fysikaaliseen malliin. Termi D_0 edustaa sekoittumista jäteilma-aukon lähialueella. Se aiheutuu jäteilmasuihkun sekoittumi-

sesta ulkoilmaan ja se lisääntyy jäteilmän nopeuden mukana. Termi D_s edustaa etäisyyssekoittumista, jonka aiheuttaa ulkoilman turbulenssi. Sen kaava perustuu siihen, että epäpuhtausvanan kuvitellaan etenevän rakennuksen seinällä tuulen nopeudella puolikartiona, jonka kuviteltu lähtöpiste on siirtynyt tuloilma-aukon taakse alkusekoittumisen ansiosta.

Kaavasta nähdään, että sekoittuminen on vain kahden muuttujan funktio. Nämä ovat nopeussuhde $M = V_e/U_H$ sekä etäisyysuhde $S/\sqrt{A_e}$. Kaava on esitetty kuvassa 8 jäteilmaprojektissa kyseeseen tulevilla muuttujien arvoilla. Jäteilmaprojektissa etäisyysuhde ($S/\sqrt{A_e}$) on suunnilleen välillä 30...400 (S välillä 3...20 m ja aukon halkaisija 60...100 mm) ja nopeussuhde (M) yli 0,1. Kuvan mukaan vastaava sekoittumissuhde on alueella 80...10 000.

Kuvan 8 alin käyrä DMIN vastaa laimenemisen kannalta pahinta nopeussuhdetta kullakin vaaka-asteikon arvolla. Vastaava M -arvo on 0,5 etäisyyksillä 10 - 100 ja 3 - 7 etäisyyksillä 100 - 400. Jyrkkä muutos etäisyydellä 100 johtuu etäisyyslaimenemisen kertoimen muutoksesta M -arvolla 0,5 (ks. kaavat 4 - 6).

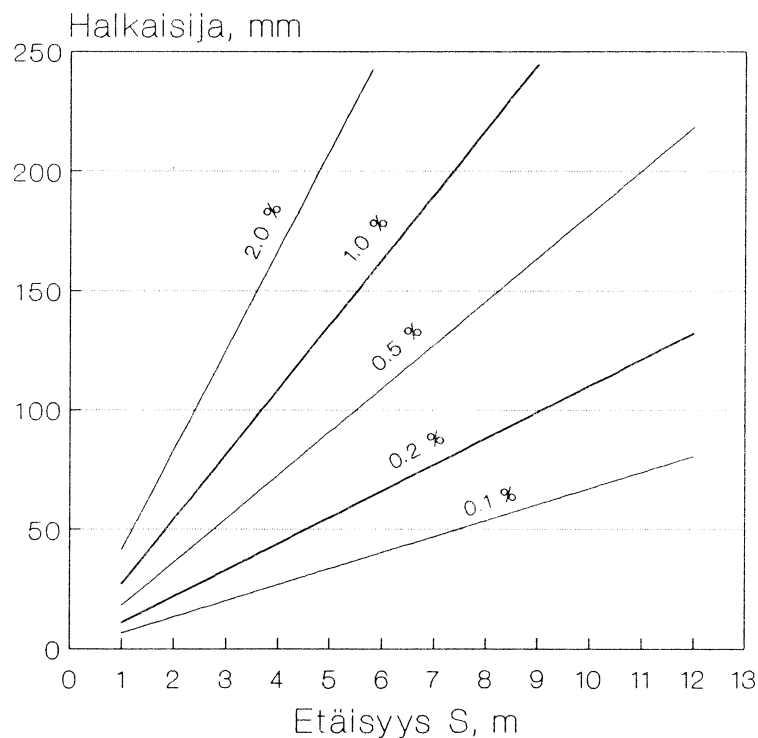


Kuva 8. Wilsonin ja Chuin kaava epäpuhtauksien laimenemiselle. D on minimilaimenemissuhde eli poisto- ja tarkastelupisteen pitoisuuksien suhde epäedullisimmalla tuulen suunnalla, mitattuna 10 minuutin keskiarvona. V_e on poistoilman tehollinen nopeus ja A_e vastaava puhallusaukon pinta-ala. U_H on tuulen nopeus räystäskorkeudella. M on nopeussuhde V_e/U_H . S on poiston ja tarkastelupisteen välinen etäisyys. Käyrä DMIN vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.

Wilsonin ja Chuin kaava on laadittu tuulitunnelimittausten perusteella. Tuulitunnelimittausten pitoisuudet vastaavat luonnon oloissa ja täysmittakaavassa noin 10 minuutin keskiarvopitoisuuksia. Kaavassa (6) on mukana mittausajan huomioon ottava korjaus. Sitä tarvitaan, kun arvioidaan ulkoilman pitoisuusvaihtelujen vaikutusta sisäilman pitoisuuteen.

2.5 MITOITUSKÄYRÄSTÖN LUONNOS

Kuvan 8 minimikäyrän avulla saadaan yksinkertainen mitoitusohje poistoaukolle (kuva 9). Koska minimikäyrä vastaa pahinta tilannetta (eri tuulen suunnat, eri tuulen nopeudet ja poistoilman lähtönopeudet), on kuvan mitoituskäyrästä periaatteessa yleispätevä. Useiden poistojen pitoisuusvaikutukset lienee syytä summata, kunnes yhteisvaikutuksesta saadaan parempaa tietoa.



Kuva 9. Mitoituskäyrästä pyöreän poistoilma-aukon halkaisijalle. S on poisto- ja tuloaukon välinen etäisyys. Parametrina on poistoilman osuus tuloilmassa prosentteina (laimenemissuhteen käänteisarvo). Pystyasteikolta saadaan vastaava jäteilma-aukon halkaisija. Käyrästä voidaan soveltaa muillekin kuin pyöreille aukoilta, joiden pinta-ala on sama. Esimerkiksi neliömäisen aukon sivu on 11 % pienempi kuin samankokoisen pyöreän aukon halkaisija.

2.6 ILMAVIRRRAN, NOPEUDEN JA TUULEN VAIKUTUS

Eri suureiden vaikutusta laimenemiseen on tarkasteltu kuvissa 10 ja 11, joissa ulko- ja jäteilma-aukon etäisyys on 5 m. Kuvan 10 tapauksessa poistoaukon halkaisija on kiinteä, jolloin ilmavirran lisääntyminen lisää lähtönopeutta. Samalla minimilaimenusta vastaava tuulen nopeus kasvaa ja siten minimin esiintyminen tulee harvinaisemmaksi. Pienillä ilmavirroilla taas laimeneminen kasvaa suureksi suurilla tuulen nopeuksilla.

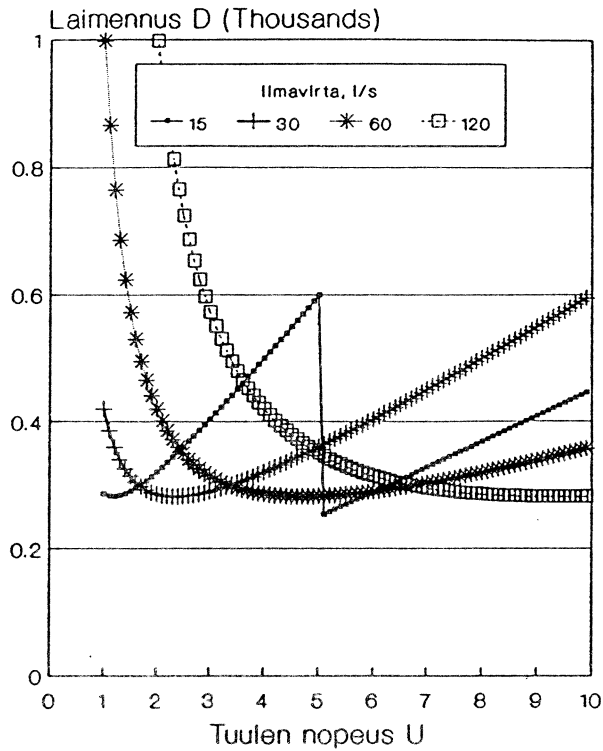
Kuvassa 11 ilmavirta on kiinteä ja poistoilman lähtönopeutta muutetaan. Suuren lähtönopeuden edullinen vaikutus on ilmeinen, etenkin pienillä tuulen nopeuksilla. Suurilla tuulen nopeuksilla ero on pienempi, koska tuulen vaikutus sekoittumisessa voimistuu.

2.7 KÄYTÄNNÖN NÄKÖKOHTIA

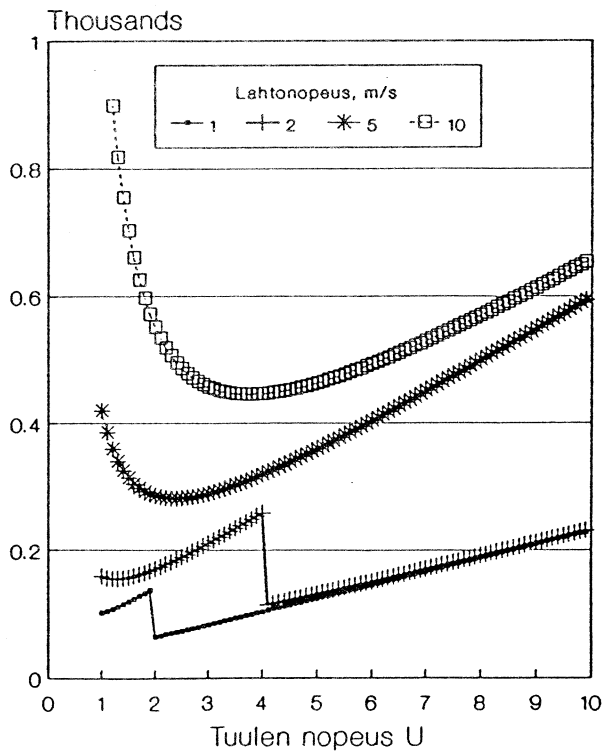
Suuren lähtönopeuden edullinen vaikutus on ilmeinen. Sitä rajoittavat lisääntyvä painehäviö sekä äänenkehitys.

Wilson /7/ antaa lisäksi ohjeena, että poistojen pitäisi sijaita rakennuksen alimman kolmanneksen yläpuolella ja tuloilma-aukkojen yläpuolella, jotta noste tulee käytettyä hyväksi ja vältetään poistoilman joutuminen maan pinnan lähellä olevaan pyörteeseen.

Kerrostaloissa poistoja jouduttaneen sijoittamaan tuloilma-aukkojen alapuolelle. Silloin on vältettävä poisto- ja tuloaukkojen sijoittamista päällekkäin.



Kuva 10. Epäpuhtauksien laimenneminen 5 metrin päässä tuulen nopeuden funktiona eri ilmavirroilla, kun poistoaukon koko on kiinteä (halkaisija 87 mm vastaten $S/A_e = 65$). Eri ilmavirtoja vastaavat lähtönopeudet ovat 2,5, 5, 10 ja 20 m/s.



Kuva 11. Epäpuhtauksien laimenneminen 5 metrin päässä tuulen nopeuden funktiona eri poistoilman lähtönopeuksilla, kun poistoilmavirta on kiinteä (30 l/s). Eri lähtönopeuksia vastaavat aukon halkaisijat ovat 196, 138, 87 ja 62 mm.

3 KEITTIÖN POISTOILMAN LAIMENNUS-TARVE

3.1 JOHDANTO

Jäteilman hajukynnyksen tunteminen on tarpeen arvioitaessa teorian ja mittausten perusteella saatuja jäteilman laimenemissuhteita rakennuksen seinustalla ja siten tuloilmassa. Koska ruuanlaitossa syntyvät käryt muodostavat yleisesti esiintyvän hajun asuntojen jäteilmassa, päätettiin tutkia keittiön poistoilman hajun voimakkuutta. Kokeellisesti määritettiin asuinrakennuksen keittiön poistoilmavirran hajukynnyspitoisuus erilaisissa ruuanlaittilanteissa sekä tupakkaa poltettaessa.

3.2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kirjallisuuskatsauksessa haettiin tutkimuksia, joissa esitetään yleisesti esiintyvä tai sallittu jäteilmapitoisuus tuloilmassa. Taulukkoon 1 on koottu löydetty kirjallisuusviitteet.

Taulukko 1. Kirjallisuudessa esiintyvät jäteilman osuudet tuloilmassa.

Sallittu osuus %	Tilanteen kuvaus	Kirjallisuusviite
5	Lämmöntalteenottolaitteessa suurin sallittu vuoto tulo- ja poistoilman välillä.	Canadian standards Association, Residential Mechanical Ventilation Requirements
3	Jos vuoto-osuus tuloilmassa ylittää 3 %, määritellään ko. paine-ero ennen LTO-laitteen testauksen jatkamista.	CEN ENV 308:1991, Heat exchangers /9/
10	Poisto- ja tuloilmapuolen välisten vuotojen sallittu enimmäisarvo, kun paine-ero poisto- ja tuloilmapuolen välillä on 200 Pa.	Poistoilmasta tuloilmaan lämpöä siirtävien LTO-laitteiden tyyppihyväksyntä- ja testausohje, Sisäasiainministeriön kirje Dno 1765/545/81 /10/
5	Mikäli LTO-laitteen kautta voi siirtyä hajua tuloilmaan, saa poistoilmassa olla korkeintaan 5 % luokan 4 poistoilmaa.	SRakMK, osa D2 /8/
0	Rakennuksen sisällä konehuoneen ulkopuolella sijaitsevat poistokanavat tehdään yleensä ali-paineisiksi.	SRakMK, osa D2 /8/
Mitattu osuus %		
12 - 36	Huoneistojen välinen ilmavuoto 50 Pa:n paine-erolla, 3 huoneistoa mitattu.	Levin, P., Air leakage between apartment, 9th AIVC Conference, Gent, 12.-15.9.1988 /11/
0 - 2,3	Tulo- ja poistoilmanvaihdon välillä tapahtuva takaisinkulkeutuminen, lyhytaikaisia mittauksia koetalossa.	Savolainen, T. ym., Neulamäen koetalot: Ilmanvaihto ja sisäilmasto, Kuopion yliopiston ympäristöhygienian laitosten monistesarja /12/

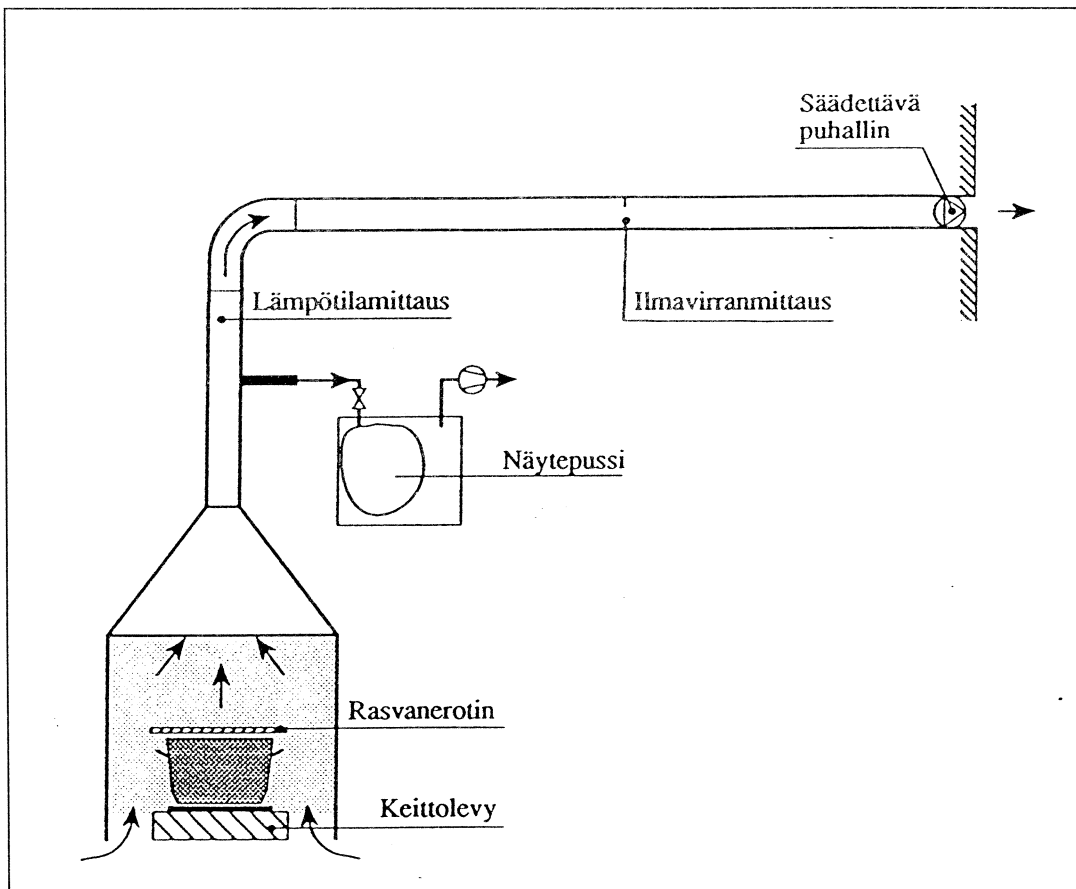
Kirjallisuudesta löytyi lämmöntalteenottolaitteille sallittuja vuoto-osuuksia poistopuolelta tulopuolelle. Sallitut osuudet olivat 3 - 10 % (käänteisarvona saadut laimennussuhteet olivat 10 - 33).

Kuopiossa Neulamäen koetaloissa tutkittiin merkkiaineen avulla huoneistokoh-
taisessa järjestelmässä seinästä ulospuhalletun jäteilman takaisinvirtausta tuloilmaan. Mitatut osuudet olivat alle 2,3 % (laimennussuhde yli 43). Ajoittain takaisin-
virtauksen osuus nousi lähelle 6 %:a (laimennussuhde 17).

Kirjallisuudesta ei löytynyt käyttökelpoista aineistoa asuntojen jäteilman hajukyn-
nyspitoisuuksista eikä jäteilmaosuuksien raja-arvoista.

3.3 TUTKIMUSKOHTEET

Tutkitut ruuanlaittilanteet olivat kaalin keitto, sipulin paisto, lettujen paisto, silakoiden paisto sekä tupakan poltto. Keittiön poistoilmavirta oli $20 \text{ dm}^3/\text{s}$, mikä vastaa nykyisiä viranomaismääräyksiä /8/. Kokeita tehtiin sekä laboratorioon rakennetulla koelaitteistolla, kuva 12, että kenttäolosuhteissa. Koelaitteisto on rakenteeltaan sellainen, että se sieppaa tehokkaasti ruuan valmistuksessa syntyvän käryn.



Kuva 12. Koejärjestely.

3.4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Kokeissa pyrittiin jäljittelemään mahdollisimman todenmukaista ruuanlaitto-tilannetta. Paistettaessa ruoka laitettiin kuumalle paistinpannulle, jossa oli ruokaöljyä. Keitettäessä ruoka laitettiin kiehuvaan veteen. Ruuan valmistamiseen käytettiin Strömbergin 2-levyisen liedin, tyyppi RL HW2, levyä ϕ 19 cm. Kaikissa ruuanlaitto-tilanteissa levyn säädin oli asennossa 4/6 (sähköteho noin 650 W), jolloin ruoka ruskistui pannussa tai kiehui jatkuvasti kattilassa.

Lettujen paistamiseen kului aikaa noin 12 minuuttia. Tänä aikana paistettiin kaksi eri annosta. Sen sijaan sipulia ja silakoita paistettiin 12 minuutin aikana vain yksi annos. Tupakanpolttokokeen aikana koehenkilö oli poistokaavun alla ja poltti jatkuvasti. Käryjen kulkeutuminen poistokanavaan varmistettiin jatkamalla poistokaapua muolikalvolla, joka ulottui koehenkilön vartalon ympärille.

Poistokanavasta otettiin näytepussiin ilmaa ruuanlaiton aikana. Ensimmäinen näyte otettiin poistokanavasta ennen ruuanlaiton alkua taustapitoisuuden määrittämiseksi. Seuraava näyte otettiin heti, kun ruoka-aine oli pantu kuumaan paisto- tai keittoastiaan. Viimeinen näyte otettiin ruuan valmistuttua. Näytepussin tilavuus oli noin 20 dm³ ja näytepussin täyttö kesti noin yhden minuutin. Poistoilman lämpötila oli ruuanlaittokokeissa 24 - 29 °C ja tupakointikokeissa 20 - 21 °C. Näytepussit toimitettiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen kemian laboratorioon hajupitoisuuden määrittämistä varten.

Näytteiden hajukynnyspitoisuudet määritettiin aistinvaraisesti Ströhlein-olfaktometrillä saksalaisen standardin VDI 3381 mukaisesti. Olfaktometri muodostaa kasvavia pitoisuuksia neutraali-ilmasta ja näytekaasusta, kunnes detektorina toimiva koehenkilö erottaa hajua kaasuseoksesta. Koehenkilöiden aistimusten perusteella olfaktometri laskee näytteen hajupitoisuuden muodossa hajuyksikköä/m³ (h.y./m³). Hajupitoisuus tarkoittaa sitä laimennuskertojen lukumäärää, jolla näytekaasuvirtaa on laimennettava, jotta 50 % hajupaneelin jäsenistä ei havaitse kaasuseoksessa hajua.

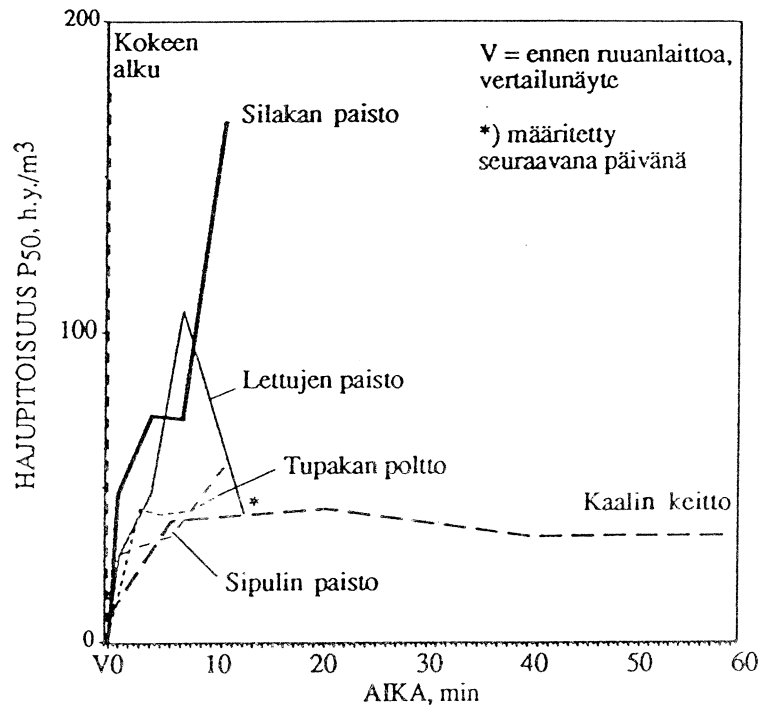
Hajun hyväksyttävyyden selvitetään kysymällä hajupaneelin jäseniltä, minkälaisena he kokivat hajun havaitsemishetkenä. Hajupaneeli koostui 6 - 8 henkilöstä, jotka kuuluivat kemian laboratorion henkilökuntaan.

3.5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

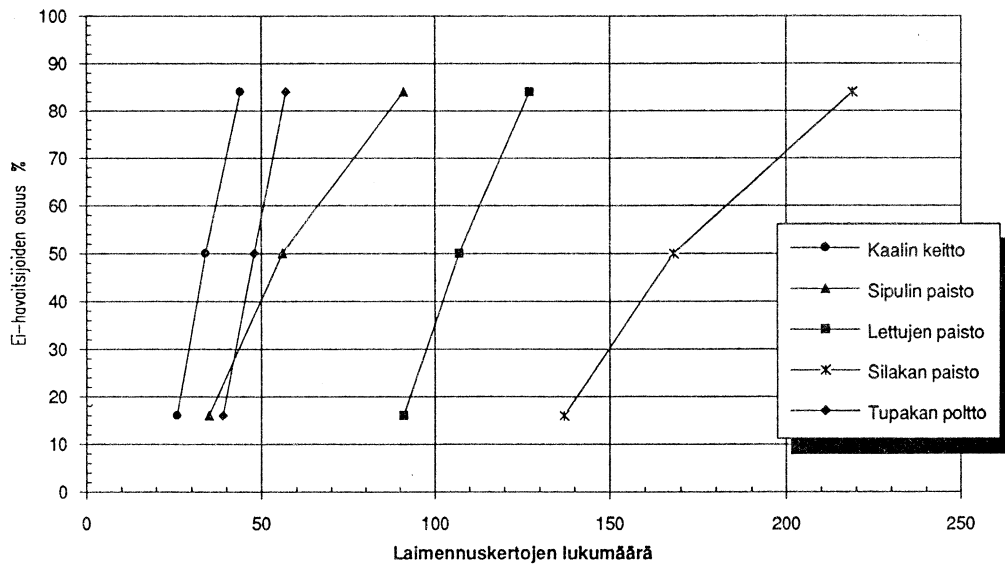
3.5.1 Laboratoriomittaukset

Kuvassa 13 on esitetty eri ajanhetkillä hajukynnyspitoisuudet eli laimennussuhteet, kun ei-havaittajien osuus on 50 %. Eri ruuanlaitto-tilanteiden aikana otetuista ilmanäytteistä määritetyt ei-havaittajien osuudet on esitetty kuvassa 14.

Panelistien arviot hajun hyväksyttävyydestä ilmenevät taulukosta 2. Osa panelisteista piti sipulin paiston aikana voimakkaitakin hajupitoisuuksia hyväksyttävänä, kun taas letuille ja silakoille määritetyt voimakkaat hajupitoisuudet koettiin useimmiten ei-hyväksyttävänä. Hyväksyttävyyden arvio on subjektiivinen arvio.



Kuva 13. Ruuanlaiton aikana vallinneet hajukynnyspitoisuudet poistokanavassa.



Kuva 14. Ruuanlaiton aikana vallinneiden hajujen havaittsijoiden osuudet hajupitoisuudesta (laimennuskertojen lukumäärästä) riippuvana, kun tutkittavana on suurimman hajupitoisuuden antanut näyte.

Suurin hajukynnyspitoisuus 168 h.y./m³ määritettiin silakoiden paiston aikana. Määritelmän mukaan 50 % panelisteista ei havaitse hajua, kun näytekaasua laimennetaan 168 kertaa. Vastaavasti 84 % panelisteista ei havainnut hajua, kun samaa näytekaasuvirtaa laimennettiin 219 kertaa.

Taulukko 2. Panelistien arviot hajun hyväksyttävyydestä kolmesta voimakkaimmin haisevasta ruuanlaittilanteesta.

Sipulinpaisto	Hajupitoisuus h.y./m ³	Hyväksyttävyys		
		kyllä	ei osaa sanoa	ei
1. Nollanäyte	2	2	2	2
2. 0 min	28	2	2	2
3. 2 min	31	1	2	3
4. 5 min	34	2		4
5. 10 min	56	3		3

Lettujenpaisto	Hajupitoisuus h.y./m ³	Hyväksyttävyys		
		kyllä	ei osaa sanoa	ei
1. Nollanäyte	0			
2. 0 min	28	3		3
3. 3 min	48	1	1	4
4. 6 min	107	2		4
5. 12 min	41	1		5

Silakanpaisto	Hajupitoisuus h.y./m ³	Hyväksyttävyys		
		kyllä	ei osaa sanoa	ei
1. Nollanäyte	3		2	4
2. 0 min	48	1	1	4
3. 3 min	73	1	1	4
4. 6 min	72	2		4
5. 12 min	168			6

3.5.2 Kenttämittaukset

Silakanpaistokoe toistettiin erään omakotitalon keittiössä. Ilmanäyte otettiin keittiön poistoilmakanavasta. Ilmanäytteen hajukynnyspitoisuus oli pienempi kuin vastaavan laboratoriokokeen aikana määritetty, taulukko 3. Ero johtuu siitä, että omakotitalon keittiön liesikupu ei siepannut tehokkaasti ruuan käryä, vaan osa käryistä kulkeutui muualle keittiöön. Taulukkoon 3 on merkitty myös suurin sallittu jäteilman osuus tuloilmassa, joka on hajukynnyspitoisuuden käänteisarvo.

Taulukko 3. Omakotitalon keittiön poistoilmasta määritetyt hajukynnyspitoisuudet silakanpaiston aikana.

Poistoilmavirta dm ³ /s	Hajukynnyspitoisuus h.y./m ³	Sallittu jäteilmaosuus %
20	54	1,9
45	43	2,3

Omakotitalossa tehdyssä kokeessa todettiin, ettei poistoilmavirran kasvattamisella 45 dm³:iin/s ollut huomattavaa vaikutusta poistoilman hajupitoisuuteen.

3.6 YHTEENVETO

Kussakin ruuanlaittilanteessa valittiin suurin hajukynnyspitoisuus edustamaan ko. tilannetta. Näistä arvoista laskettiin suurin sallittu osuus jäteilmaa tuloilmassa, jotta tuloilmassa ei havaittaisi hajua. Jäteilmaosuus on hajukynnyspitoisuuden käänteisarvo. Tulokset ilmenevät taulukosta 4.

Taulukko 4. Hajukynnyspitoisuus ja sallittu jäteilmaosuus tuloilmassa laboratorion kokeiden perusteella.

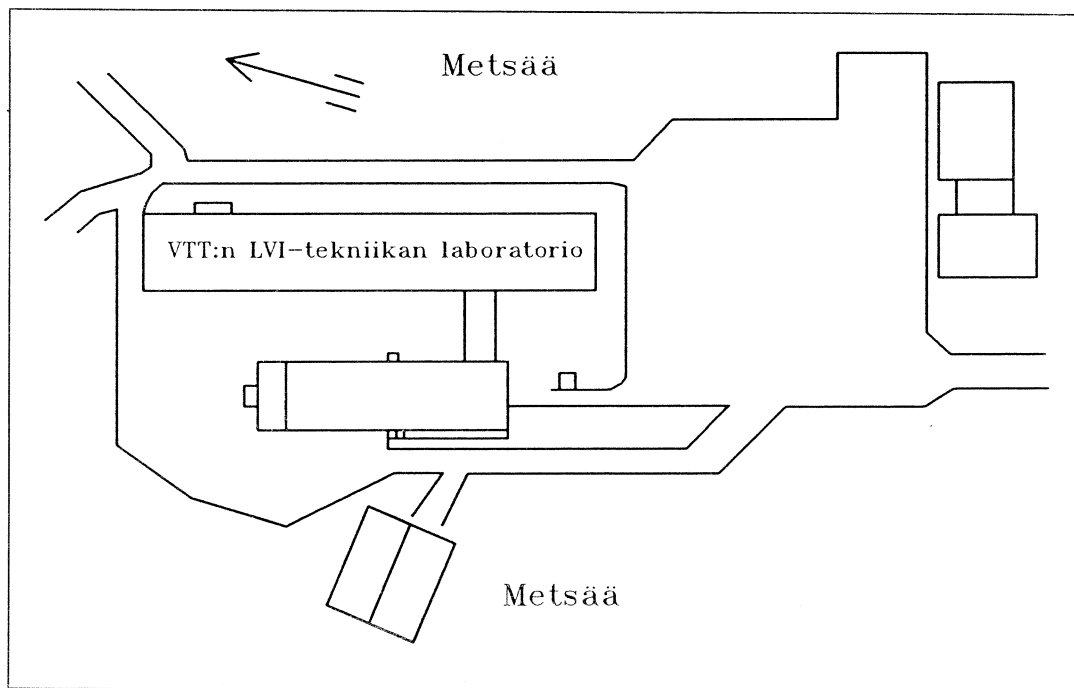
Toimenpide	Hajukynnyspitoisuus h.y./m ³	Sallittu jäteilmaosuus %
Kaalin keitto	43	2,3
Sipulin paisto	56	1,8
Lettujen paisto	107	0,9
Silakan paisto	168	0,6
Tupakan poltto	48	2,1

4 ULOSPUHALLUKOKKEET LABORATORIO- RAKENNUKSESSA

4.1 TÄYSMITTAKAAVAKOKEET

4.1.1 Menetelmät

Ensimmäisiin kenttämittauksiin valittiin kohteeksi VTT:n LVI-tekniikan kolmikerkkoinen laboratoriorakennus Espoon Otaniemessä. Sen pituus on noin 80 m, leveys 16 m ja korkeus 12 m. Ympäristössä on useita kookkaita puita, metsää ja rakennuksia, kuva 15.

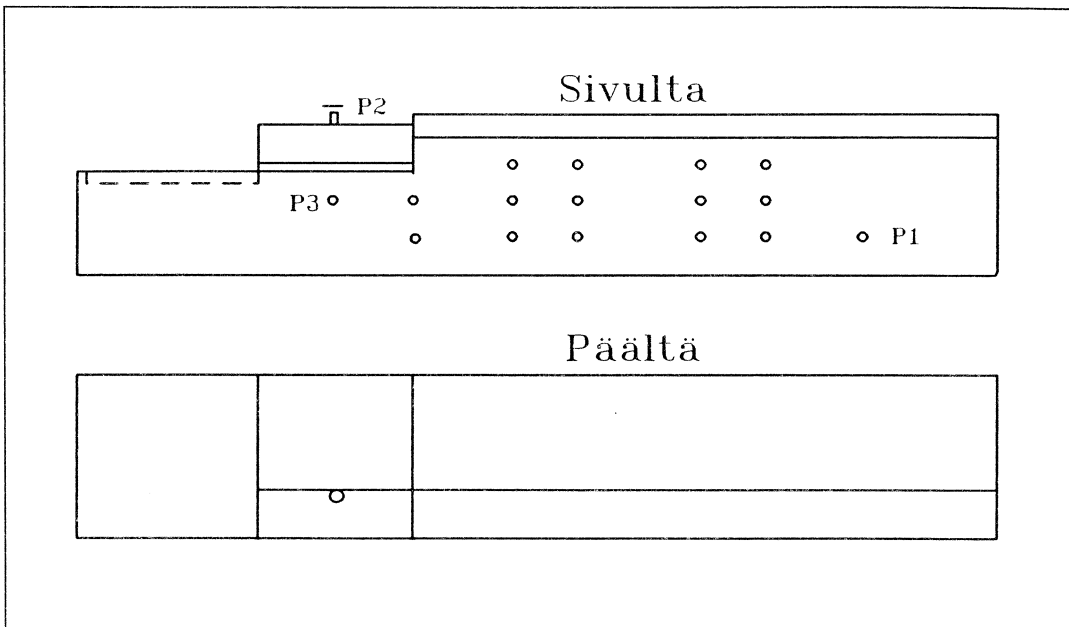


Kuva 15. Laboratoriorakennus ja sen ympäristö.

Jäteilman puhalluspaikat ja mittauspisteet sijoitettiin rakennuksen itäiselle seinustalle, kuva 16. Vertailun vuoksi yksi puhalluspaikka oli sijoitettu katolle. Tällöin jäteilma tuli pystysuorasta putkesta, jonka suuaukolle oli asennettu vaakasuora levy, jolloin pystysuora lähtönopeus oli nolla.

Savuilla tehdyt alustavat kokeet, jotka kuvattiin videonauhalle, osoittivat havainnollisesti, miten jäteilma liikkuu rakennuksen ympärillä tuulen ja pyörteisten ilmavirtojen mukana. Samalla kävi ilmeiseksi suuren lähtönopeuden edullinen vaikutus: kauas seinästä lentävä jäteilmasuihku ehtii sekoittua tehokkaasti ulkoilmaan ennen kuin mahdollinen tuulen pyörre painaa sen takaisin seinustalle. Savukokeista ei voida kuitenkaan päätellä ilman paikallisia epäpuhtauspitoisuuksia. Niiden selvittämiseksi tarvittiin merkkiainekokeita.

Savuilla määritettiin ensin kvalitatiivisesti ne kohdat, joihin jäteilmavana osuu talon seinustalla kussakin koetilanteessa. Mittauspisteet sijoitettiin sitten näille pahimmin kuormittuville alueille.



Kuva 16. Kaaviokuva laboratoriorakennuksesta. Jäteilman puhalluspaikat on merkitty P-kirjaimilla ja mittauspaikat pisteillä.

Kussakin mittaustilanteessa puhallettiin rakennuksen seinältä yhdestä pisteestä kaasusekoitusta, jonka tilavuusvirta vastasi suunnilleen keskikokoisen asunnon poistoilmavirtaa. Jäteilmaa kuvaava kaasu koostui merkkiaineen (typpioksiduuli, N_2O) ja ilman sekoituksesta, jonka merkkiainepitoisuus oli tyypillisesti 3 - 6 % tilavuudesta. Pitoisuus määritettiin mittaamalla erikseen poistoilman ja merkkiaineen tilavuusvirrat. Jäteilmavirtana käytettiin $30 \text{ dm}^3/\text{s}$, jolloin esimerkiksi 85 m^2 :n asunnon ilmanvaihtokerroin on $0,5 \text{ m}^3/\text{hm}^3$. Puhallusaukko oli pyöreä putki, jonka sisähalkaisija oli 58 mm. Tällöin jäteilman keskimääräinen lähtönopeus oli 11,4 m/s. Kattopuhalluksen tapauksessa puhallusaukon yläpuolelle asennettiin suoraan ylöspäin suuntautuvan virtauksen estävä suojalevy. Jäteilman tilavuusvirta oli kuitenkin sama kuin seinäpoistoissa.

Ulkoilman merkkiaineen pitoisuus mitattiin kaasuanalysointilaitteella (infrapunaspektrometri) kahdeksasta eri pisteestä samalta seinustalta. Tuulen suunta ja nopeus rekisteröitiin kokeiden aikana jatkuvasti 2 m katon harjan yläpuolelta, taulukko 5.

Taulukko 5. Mittausolosuhteet VTT:n laboratoriorakennuksen mittauksissa.

Mittaus	Puhallus- paikka	Tuuli 2 m katonharjan yläpuolella m/s	Jäteilman lämpötila °C	Ulkoilman lämpötila °C
A	P1, seinä	1 - 3, luode	18,8	0,5
B	P1, seinä	1 - 3, luode	18,8	0,5
C	P2, katto	2 - 5, länsi	3,4	3,3
D	P3, seinä	3, länsi	20,1	1,7
E	P3, seinä	3 - 6, etelä	20,3	0,3

Kussakin mittauspisteessä mitattiin kerrallaan 2 minuutin ajalta 17 pitoisuuden hetkellisarvoa. Näistä 17 arvosta laskettiin 2 minuutin aikajakson keskimääräinen pitoisuus. Koska kaasuanalyssaattorissa on 9 mittauskanavaa, on kunkin pisteen aikaväli 18 minuuttia. Mittauskierroksia oli useimmiten 5.

Jäteilman laimennus puhalluspaikan ja mittauspisteen välillä on

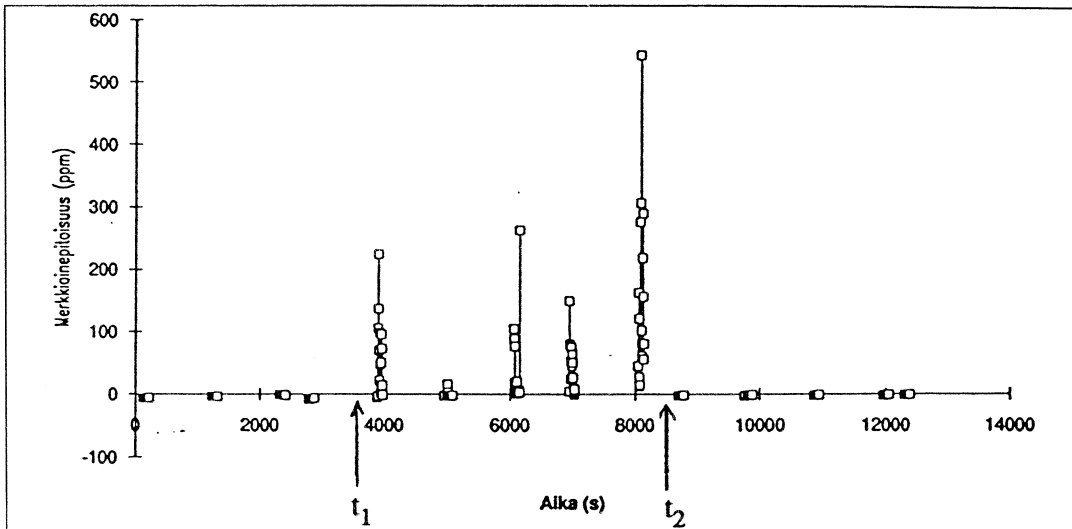
$$D = \frac{C_e}{C}, \quad (7)$$

jossa D on laimennus,
 C_e jäteilman pitoisuus poistokanavassa ja
 C jäteilman pitoisuus mittauspisteessä.

Mitattua laimennusta on verrattu Wilsonin ja Chuin teorian mukaan laskettuun laimennukseen (ks. luku 2).

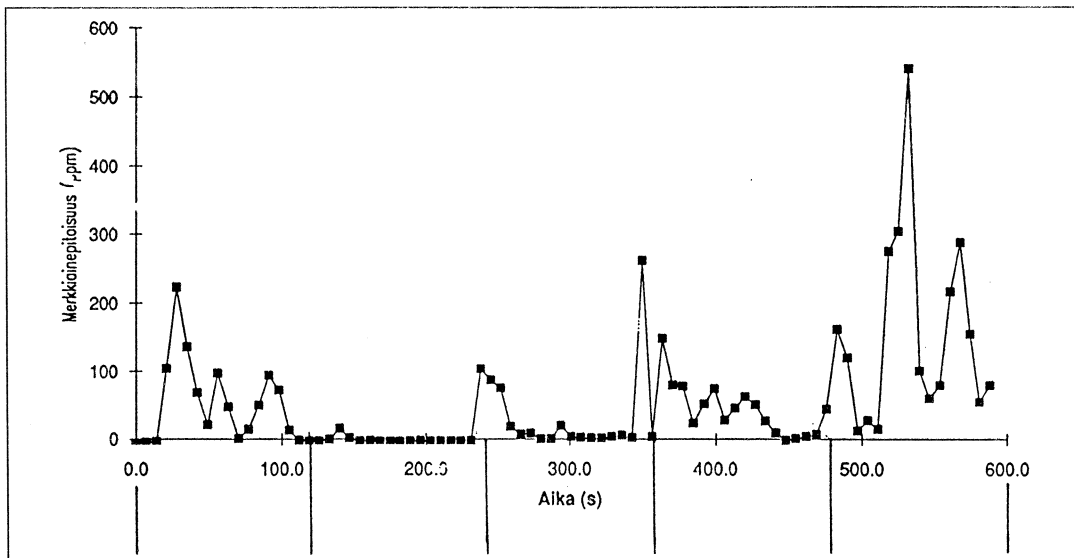
4.1.2 Tulokset

Kuvaan 17 on merkitty esimerkkinä yhden mittauspisteen hetkellinen merkkiainepitoisuus ajan funktiona. Kuvasta havaitaan, että mittauksia on tehty 14 jaksossa, joista 5 jaksossa on merkkiainetta syötetty poistoilmaan.



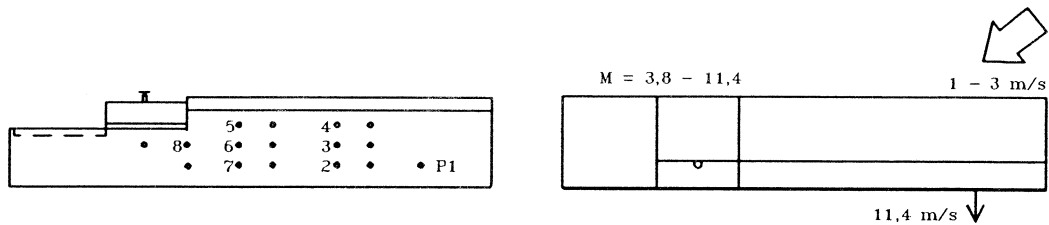
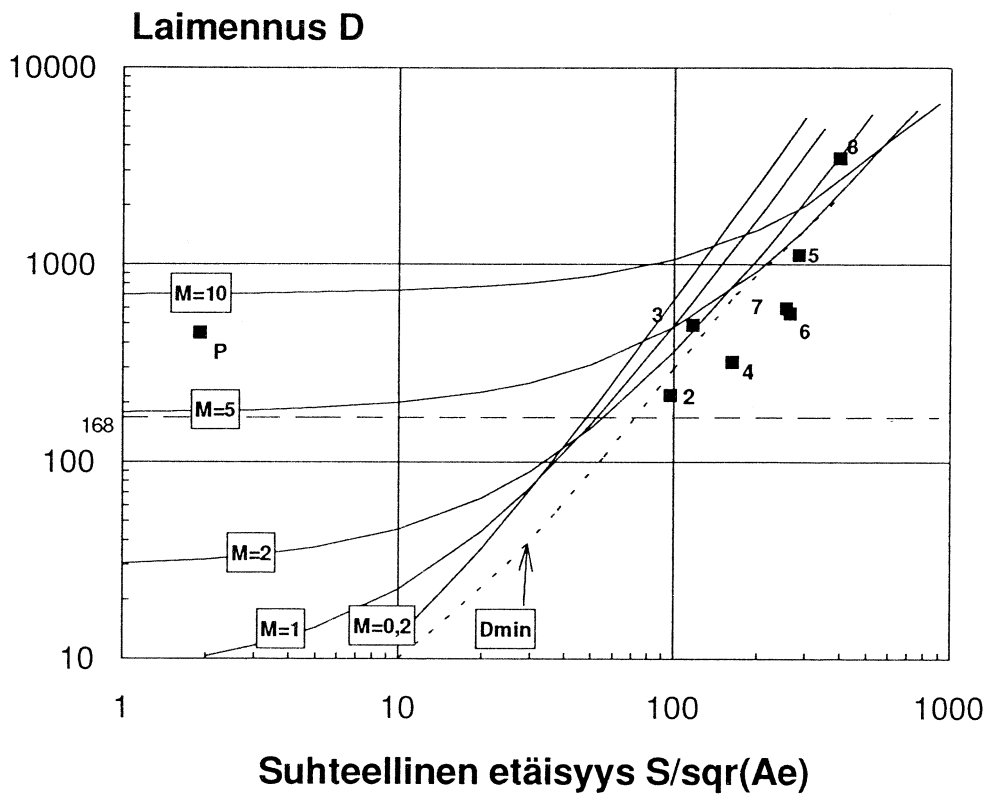
Kuva 17. Yhden mittauspisteen merkkiainepitoisuus. Merkkiaineen syöttö alkoi hetkellä t_1 ja päättyi hetkellä t_2 .

Ottamalla kuvasta 17 erilleen vain ko. mittauspisteen sellaiset jaksot, joissa merkkiainetta on syötetty, ja tiivistämällä aikaskaala yhtenäiseksi saadaan kuvan 18 mukainen käyrä. Kuvasta 18 havaitaan, että pitoisuus vaihtelee tuulen luonteesta johtuen nopeasti ja laajalla alueella. Näin ollen ääriarvot ovat hyvin lyhyitä kestoilta eikä niitä voida pitää mitoittavina arvioitaessa seinäpuhalluksen hyväksyttävyyttä. Niinpä tulosten tarkasteluissa käytetäänkin tietyltä mittausajalta laskettuja keskimääräisiä pitoisuuksia ja vastaavia laimenemissuhteita. Ero hetkellisistä pitoisuushuipuista ja aikakeskiarvotetuista (2 minuutin) pitoisuuksista laskettujen laimenemissuhteiden välillä voi olla jopa 10-kertainen.

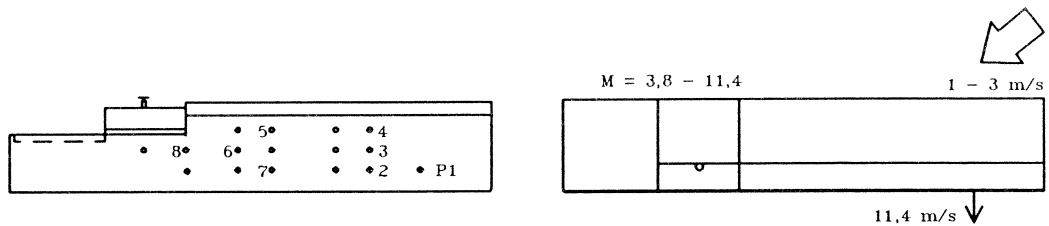
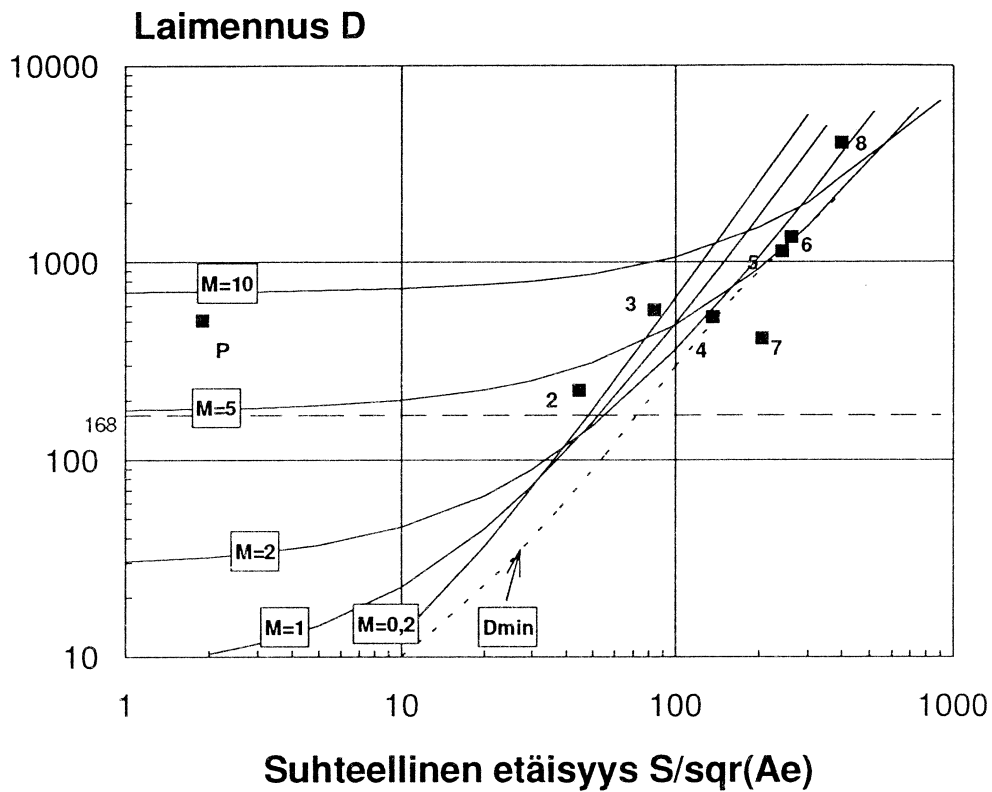


Kuva 18. Yhden mittauspisteen merkkiainepitoisuus. Tiivistelmä kuvasta 3.

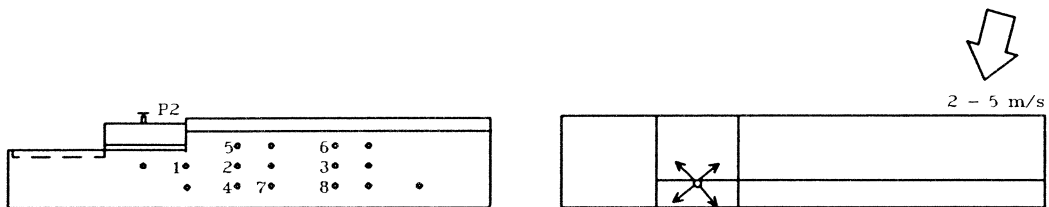
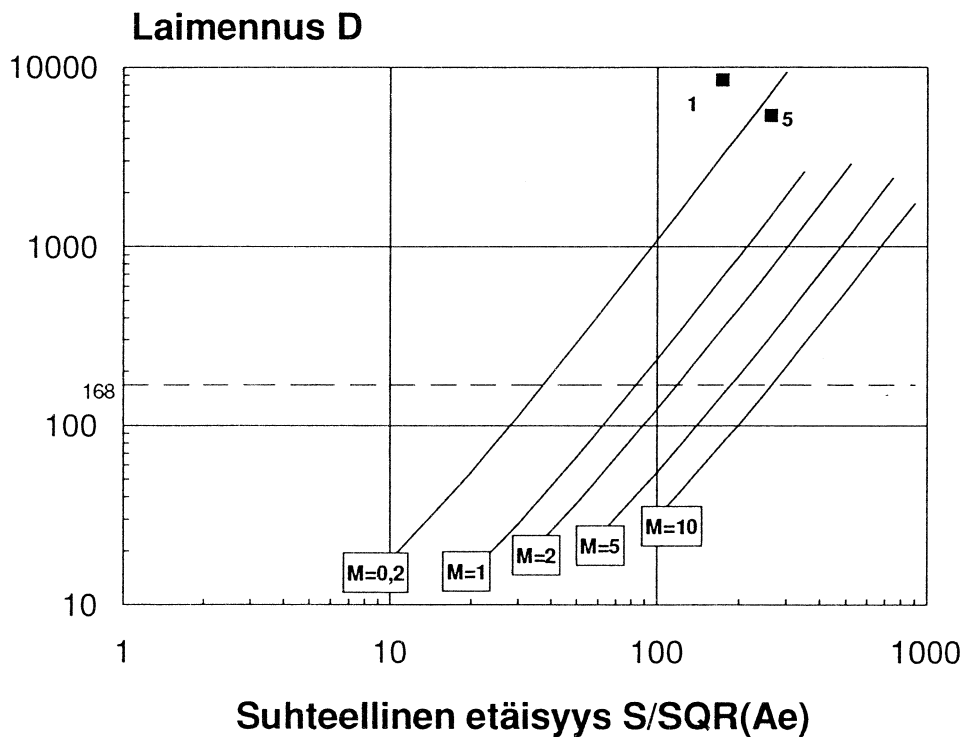
Kuvissa 19 - 23 on esitetty minimilaimennukset eli pienimmät 2 minuutin keskiarvot eri tilanteissa. Kuviiin on merkitty myös hajukokeista saatu hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168.



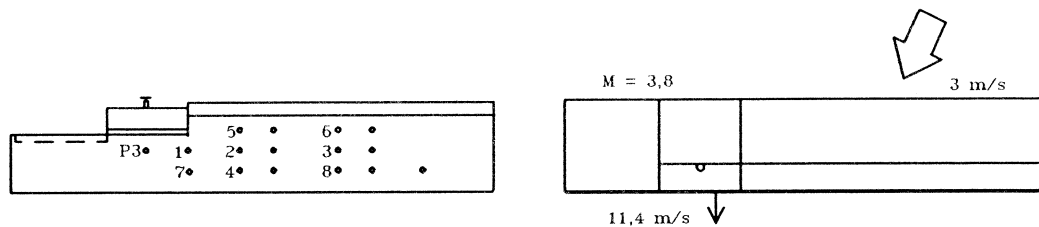
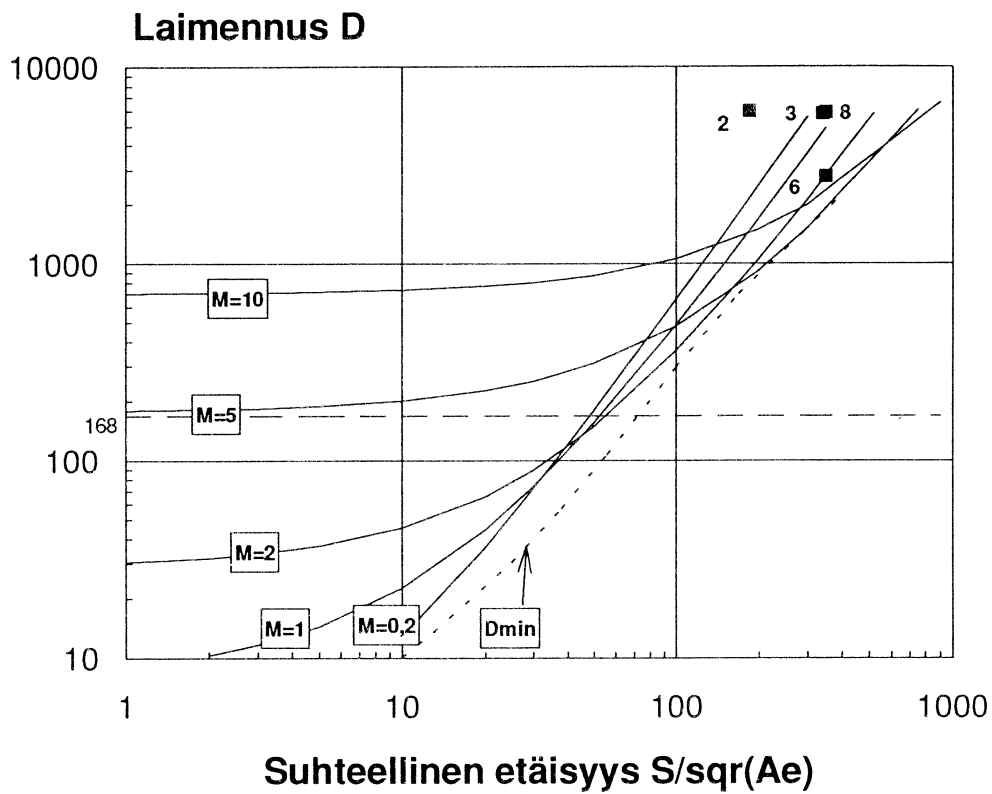
Kuva 19. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittausta A (taulukko 1), puhalluspaikka P1. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhteisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epädullisinta nopeussuhdetta.



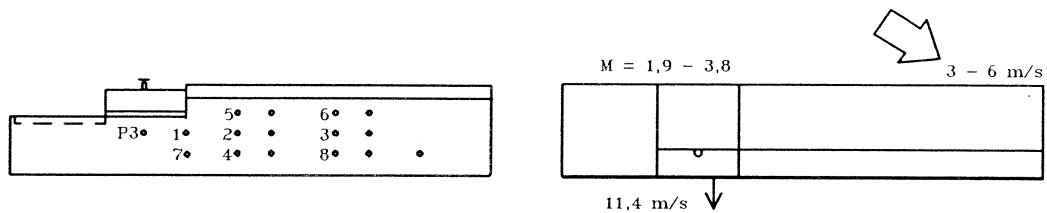
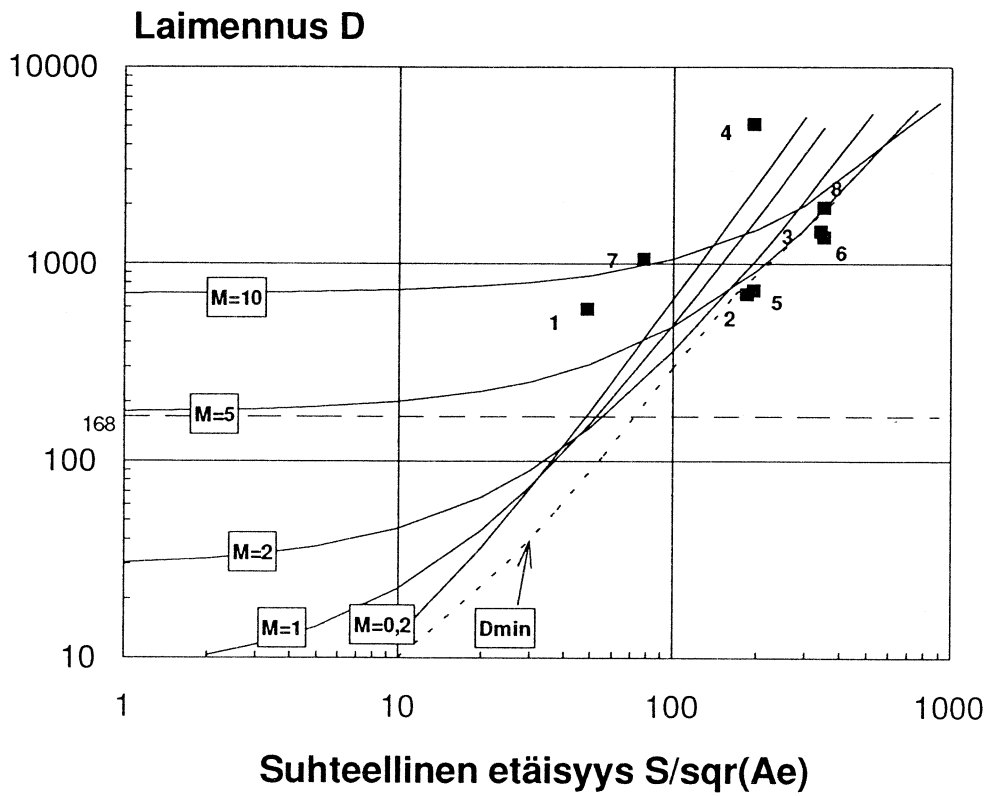
Kuva 20. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittausta B (taulukko 1), puhalluspaikka $P1$. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhteisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epädullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 21. Kattopuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaustulos C (taulukko 1), puhalluspaikka P2. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä.



Kuva 22. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittausta D (taulukko 1), puhalluspaikka P3. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 23. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittausta E (taulukko 1), puhalluspaikka P3. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.

4.1.3 Tulosten tarkastelua

Mittauksista saatujen laimennussuhteiden olisi oltava suurempia kuin kriittistä hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168, jotta keittiön jäteilman puhaltaminen suoraan seinästä ulos ei aiheuttaisi hajuongelmia kerrostalon seinustalla. Kun tarkastellaan 2 minuutin aikakeskiarvoja, ovat mittaustulokset kuvien 19, 20, 22 ja 23 mukaan hyvin turvallisella alueella. Lisäksi on muistettava, että mittaustulokset edustavat jäteilman pitoisuutta ilmanottokohdassa tai tuloilmakanavassa. Ilman tullessa huoneeseen huonetila muodostaa puskurivyöhykkeen, joka laimentaa pitoisuushuippuja. Toisaalta tulokset edustavat vain yhtä poistoilmapistettä. Useiden poistojen summavaikutus on vielä selvittämättä.

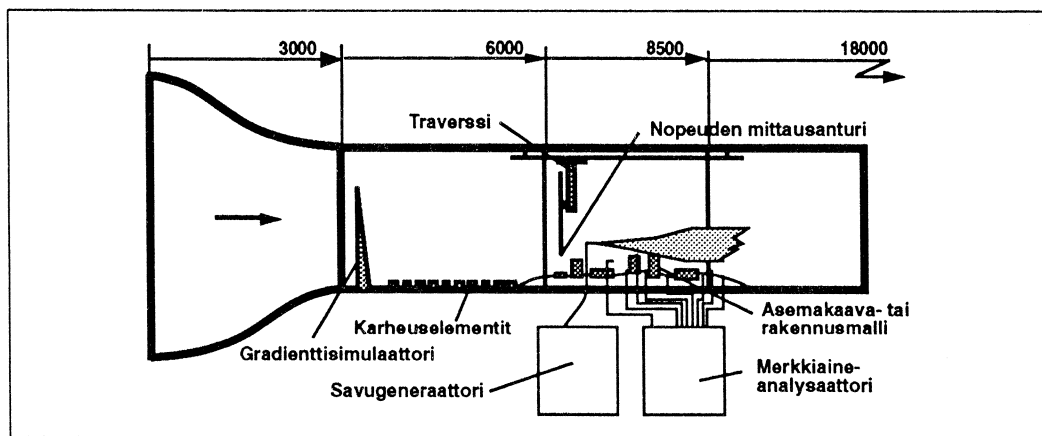
Tarkasteltaessa 2 minuutin keskiarvoja saatiin kattopuhalluksen tapauksessa seinältä vain kaksi minimilaimennuksen arvoa, jotka olivat alle 10 000.

Mittaustulosten vertaaminen Wilsonin ja Chuin minimilaimennusteoriaan on hankalaa, koska sekä nopeussuhde M että tuulen suunta muuttuvat mittausten aikana. Lisäksi mittauspisteitä on rajallinen määrä eikä todellista minimilaimennusta välttämättä havaita. Kuitenkin, jotta teoria olisi käyttökelpoinen, olisi mittaustulosten oltava suuremmat kuin teorian antama minimilaimennus, joka edustaa pahinta tilannetta (kuvissa 19 - 23 katkoviivalla merkitty D_{min}). Kuvien 19, 20 ja 23 mukaan pienillä etäisyyksillä ($S/\sqrt{A_e} < 100$; $S < 5$ m) mitatut minimilaimennukset olivat yleensä teorian mukaisia tai ennustettua suurempia. Suuremmilla etäisyyksillä mitatut arvot olivat eräissä tapauksissa pienempiä kuin teoria ennustaa. Teorian antamat liian hyvät tulokset saattavat johtua tuuliolosuhteista: teoria olettaa tuulen puhaltavan seinän suuntaisesti, kun taas kenttämittauksissa tuuli on puhaltanut osittain rakennuksen nurkan takaa, mikä on aiheuttanut muutoksia virtauskenttään seinän lähellä.

4.2 TUULITUNNELIKOKEET LVI-LABORATORIO- RAKENNUKSEN PIENOISMALLILLA

4.2.1 Koelaitteisto

Tuulitunnelikokeet tehtiin VTT:n vanhassa avoimen kierron tuulitunnelissa (kuva 24), jossa merkkiaine poistuu mittatilan jälkeen ulkoilmaan. Ilman virtausnopeutta voidaan säätää välillä 1 - 5 m/s. Luonnon tuulen korkeussuuntaisen nopeusjakouman ja turbulenssin simuloimiseksi sijoitettiin tunnelin mittatilaan mallin eteen erikokoisia kuution muotoisia karhuselementtejä sekä mittatilan alkupäähän ns. gradienttisimulaattori. Näin saavutettiin mallin edessä esikaupunkiympäristöä vastaavat tuuliolosuhteet. Tunnelin mittatila on pituudeltaan kaikkiaan 6 m, josta mallille on käytettävissä n. 2,5 m. Mittatilan leveys on 1,5 m ja korkeus 1 m.

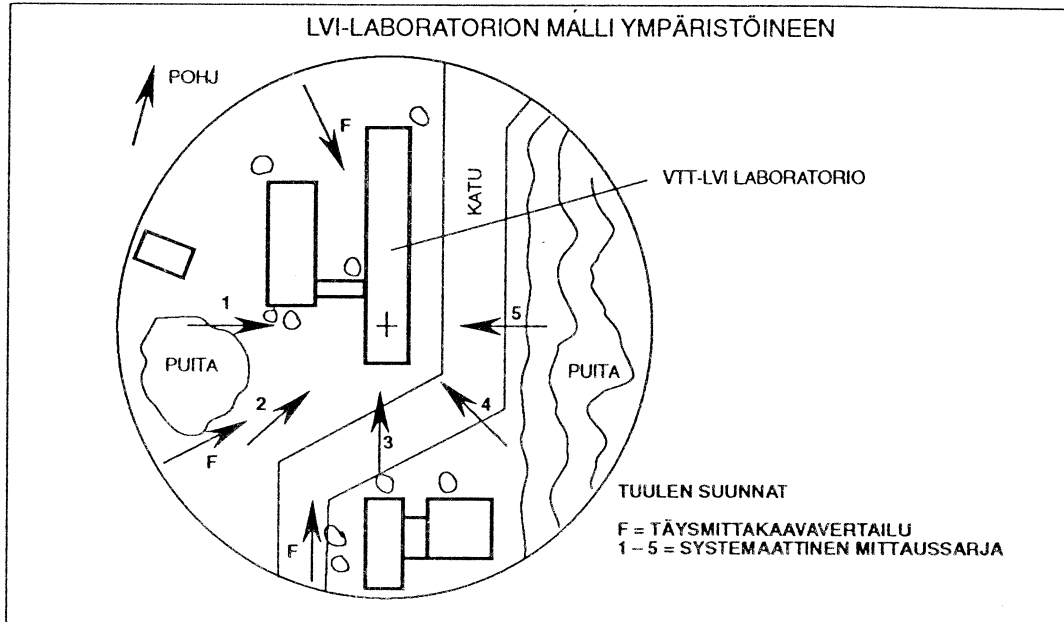


Kuva 24. Avoimen kierron tuulitunnelin kaaviokuva, jossa on esitetty tuulen simuloinnin periaate ja käytetyt mittalaitteet.

Jäteilman kulkua rakennuksen ympärillä havainnollistettiin savulla, jota voitiin laskea virtaukseen joko jäteilman poistoaukoista tai rakennuksen edestä erillisestä savusondista. Savu on höyrystettyä parafiiniöljyä, joka syötetään virtaukseen hiilidioksidia ponnekaasuna käyttäen.

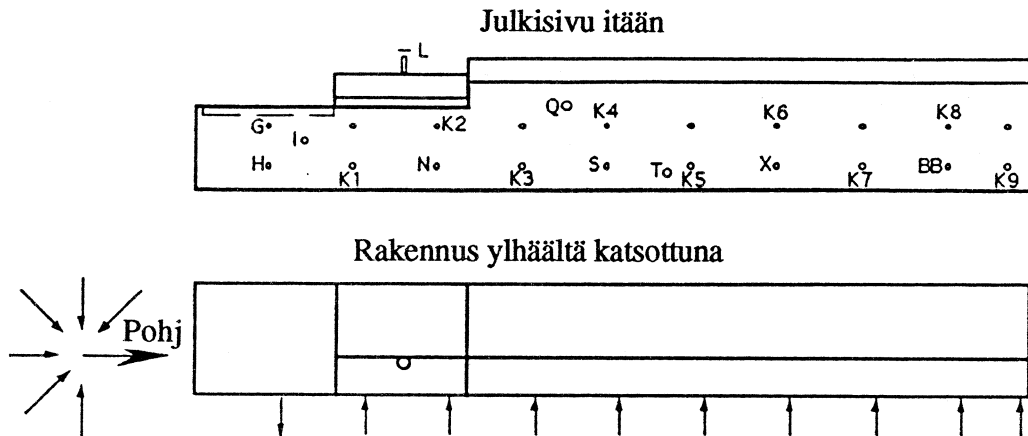
Merkkiainekokeet tehtiin käyttäen Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorion SF₆-merkkiainelaitteistoa, jossa merkkiainepitoisuus määritetään kaasukromatografilla. Koska käytetty rikkiheksafluoridi (SF₆) on ilmaa raskaampaa, on sitä lisätty poistoilmaan erittäin pieniä määriä (pitoisuus 150 - 2500 ppm), jolloin poistoilman tiheys ei muutu merkittävästi ja jäteilman virtaus rakennuksen ympärillä on todenmukaista. Merkkiaineen leviämistä rakennuksen seinällä tutkittiin imemällä ilmaa sisään yhtä aikaa kymmenestä pisteestä, jotka vastasivat ilman sisäänottopisteitä. Sisäänimetyistä ilmasta mitattiin merkkiainepitoisuus. Kaasukromatografi käyttää analysoinnissa elektronikaappausdetektoria, jolla pystytään havaitsemaan pienoismallikokeissa esiintyvät hyvin pienet merkkiainepitoisuudet, jopa alle 10 ppb.

4.2.2 Pienoismalli



Kuva 25. VTT:n LVI-laboratoriorakennuksen ympäristö pienoismallissa toteutetuine rakennuksineen.

Tuulitunnelikokeissa käytettiin VTT:n LVI-tekniikan laboratoriorakennuksen pienoismallia (mittakaava 1 : 150), jolloin voitiin tehdä vertailuja täysmittakaavakokeiden tuloksiin. Pienoismallissa oli toteutettu rakennuksen ympäristöstä viereiset rakennukset sekä jonkin verran puustoa, mutta maasto oli tasainen (kuva 25). Jäteilman poistoaukot oli sijoitettu rakennuksen itäseinälle, kolme aukkoa yhdenmukaisesti täysmittakaavakokeiden kanssa ja loput pääasiassa ensimmäisen kerroksen ikkunoiden kohdalle (kuva 26). Imuaukkoja oli kahdella eri korkeudella. Myös kattopoistomahdollisuus oli toteutettu käyttäen halkaisijaltaan 3 mm:n putkea, joka ulottui kattotason yläpuolelle ja oli suojattu horison-taalisella levyllä. Tällöin lähtönopeus ja dimensioton etäisyys määritettiin 3 mm:n putken mukaan. Alustavissa kokeissa, joissa käytettiin ensimmäistä kertaa ko merkkiainelaitteistoa tämäntyyppisiin pienoismallikokeisiin, sekä imu- että poistoaukot olivat geometrista mittakaavaa suurempia (halkaisija 3 mm). Jatkossa tehtiin malliin myös halkaisijaltaan 1 mm:n ja 0,4 mm:n poisto- ja imuaukkoja.



Kuva 26. Ilman poistoaukot (H, N, S, X ja BB) ja merkkiaineen keräyspisteet (sisäänottoaukot K1...K9) LVI-laboratoriorakennuksen pienoismallissa itäseinällä; Lisäkokeiden poistot G, H ja N sekä L:n paikalla ilmastointikonehuone, jonka seinällä poisto itään ja sisäänotto länsipuolella. Rakennuksen mitat on esitetty kohdassa 4.1.

4.2.3 Koetilanteet

Aluksi jäljiteltiin täysmittakaavassa tehtyjä kokeita. Tuulen suunta valittiin samaksi kuin luonnossa, samoin jäteilman poisto ja merkkiaineen keräyspisteet. Näitä kokeita tehtiin kahdessa tapauksessa käsittäen poistopisteet T ja L (kuvat 25 ja 26).

Systemaattisessa koesarjassa poistot oli sijoitettu itäseinälle alakertaan, jonka arveltiin olevan kriittisin tilanne kirjallisuustutkimuksen perusteella. Merkkiaineseosta poistettiin vuorotellen viidestä eri kohdasta pitkältä sivulta. Näytteet otettiin 9:stä pisteestä, jotka sijaitsivat sekä 1. että 2. kerroksessa pitkin samaa itäseinää (kuva 26). Kokeet toistettiin viidellä eri tuulensuunnalla (kuva 25).

Näiden tuulitunnelikokeiden tulosten analysoinnin jälkeen tehtiin vielä lisäkoesarja, jossa tutkittiin

- poistopuhallusta kahdesta reiästä yhtäaikaan
- poistoa ala- ja yläkerrasta
- tuulen ja poiston nopeuksien absoluuttiarvojen vaikutusta
- poiston ja imujen reikien koon vaikutusta
- poistoa ja imua erillisestä ilmastointikonehuoneesta rakennuksen katolla.

4.2.4 Laboratoriorakennuksen tuulitunnelikokeiden tulokset

Tulokset on esitetty kuvissa, joissa on käytetty samoja asteikkoja kuin täysmittakaavakokeiden tuloksia esitettäessä; vaaka-akselilla on poisto- ja imuaukon välinen dimensioton etäisyys ja pystyakselilla laimennussuhde. Mittaustulosten lisäksi kuviin on piirretty Wilsonin ja Chuin teorian mukaiset laimenemiskäyrät, jotka vastaavat 2 minuutin mittausaikaa (tarkemmin kohdassa 4.1.1).

Täysmittakaavavertailun tulokset on esitetty kuvissa 27 ja 28, joihin on merkitty myös vastaavien täysmittakaavakokeiden tulokset.

Systemaattisen koesarjan tulokset on esitetty kuvissa 29 - 33, joihin on yhdistetty myös taulukot saaduista laimennussuhteista.

Lisäkoesarjan tulokset on esitetty taulukossa 6 ja kuvissa 34 - 38. Ensimmäisessä lisäkoeksessa pyrittiin selvittämään, voidaanko erillisten poistokokeiden aiheuttamat pitoisuudet keräyspisteissä summata, jotta saataisiin selville usean poiston aiheuttama jäteilmapitoisuus. Kokeessa puhallettiin jäteilmaa kahdesta poistosta yhtä aikaa sekä vain toisesta yksin. Kuvassa 34 on esitetty tulokset poistoista H ja N (kuva 26) yhtä aikaa sekä poistosta H yksin (alakerta = H). Lisäksi tuloksia verrattiin aikaisempiin yhdestä pisteestä kerrallaan tehtyihin kokeisiin. Kokeen mukaan summausta ei voi suorittaa, koska yhdestä poistosta saatiin lähes samoja pitoisuuksia kuin kahdesta poistosta yhtä aikaa. Kahden poiston aiheuttamat pitoisuudet eivät summaudu, koska jäteilmavannat eivät yleensä mene kokonaan päällekkäin.

Kuvassa 34 on lisäksi esitetty ala- ja yläkerran poistojen vertailu. Kun lähin keräyspiste on alakerrassa, sinne ei juuri kulkeudu jäteilmaa yläkerrasta. Seuraaviin pisteisiin talon sivulla oleva pyörre sen sijaan kuljettaa jäteilmaa myös yläkerrasta. Kauempana taas laimeneminen on voimakkaampaa yläkerran poistosta, koska jäteilma sekoittuu paremmin rakennuksen yli tulevaan virtaukseen.

Kuvassa 35 on esitetty tuloksia kokeista, joissa jäteilmapuhalluksen ja tuulen nopeuksien suhde pidettiin vakiona, mutta nopeuksien absoluuttiarvoja vaihdeltiin. Nopeussuhde M oli noin 2,6 ja tuulen nopeus 1, 2 ja 4 m/s sekä puhallusnopeus vastaavasti 2,6, 5,3 ja 10,6 m/s. Kuvasta nähdään, että tulokset kaikissa tapauksissa ovat hyvin lähellä toisiaan, joten tuulitunnelikokeita voidaan tehdä halutulla nopeudella, kun nopeussuhde M pidetään oikeana.

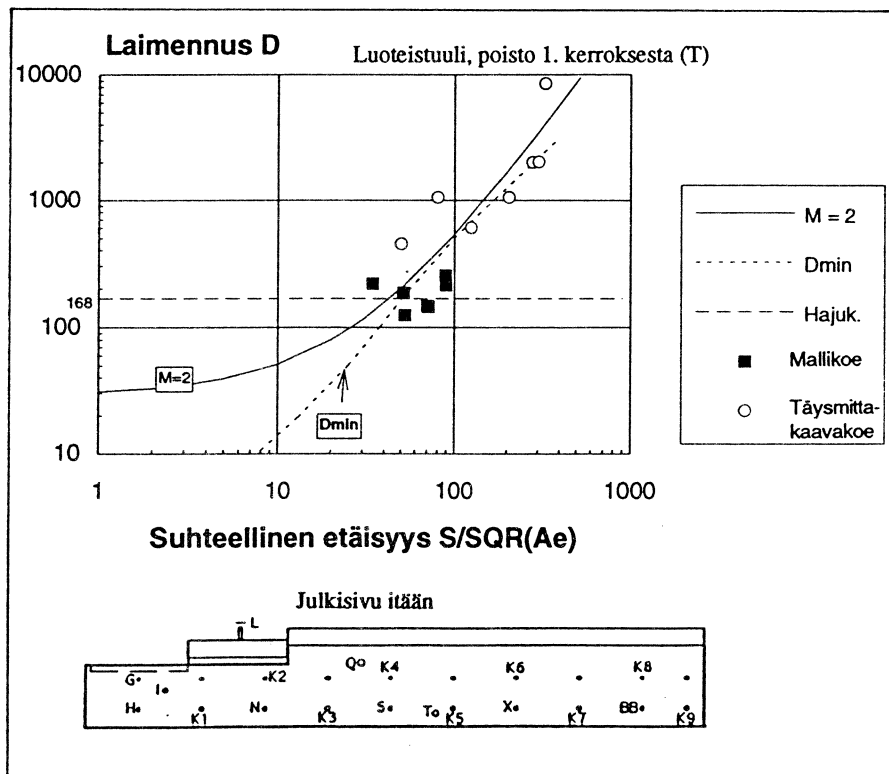
Koska kokeita aloitettaessa ei tarkalleen tiedetty, kuinka pieniä merkkiainejäämiä joudutaan mittaamaan, sekä poisto- että imureiät tehtiin geometrista malliskaalaa huomattavasti suuremmiksi (F 3mm). Reikien koon vaikutusta tutkittaessa havaittiin, että poistoreiän koolla on huomattava vaikutus mitattuihin laimennussuhteisiin (kuvat 36 ja 37). Yhden ja kolmen millin poistojen välillä on mittaustuloksissa selvä kertaluokkaero, joka ei kuitenkaan ole sama kaikkien pisteiden kohdalla. Tällöin tuloksia ei voi korjata esim. pinta-alasuhteita käyttämällä. Geometrista skaalaa suuremmasta reiästä poistosuihkun impulssi ja massavirta tulevat liian suureksi, jolloin pelkkä nopeussuhteiden skaalaaminen ei riitä. Kun lisäksi pienemmästä reiästä puhallettaessa joudutaan käyttämään noin 50-kertaista

merkkiaineepitoisuutta, on tulosten vertailu hyvin vaikeaa. Jotta tuloksia voidaan siirtää täysmittakaavaan, tarvitaan lisäkokeita, joilla selvitetään puhallusreikien oikea skaalaus. Geometrisesti skaalattaessa puhallusreikä jää niin pieneksi ($F = 0,4 \text{ mm}$), että virtaus reiässä voi olla laminaarista eikä vastaa täysmittakaavaa.

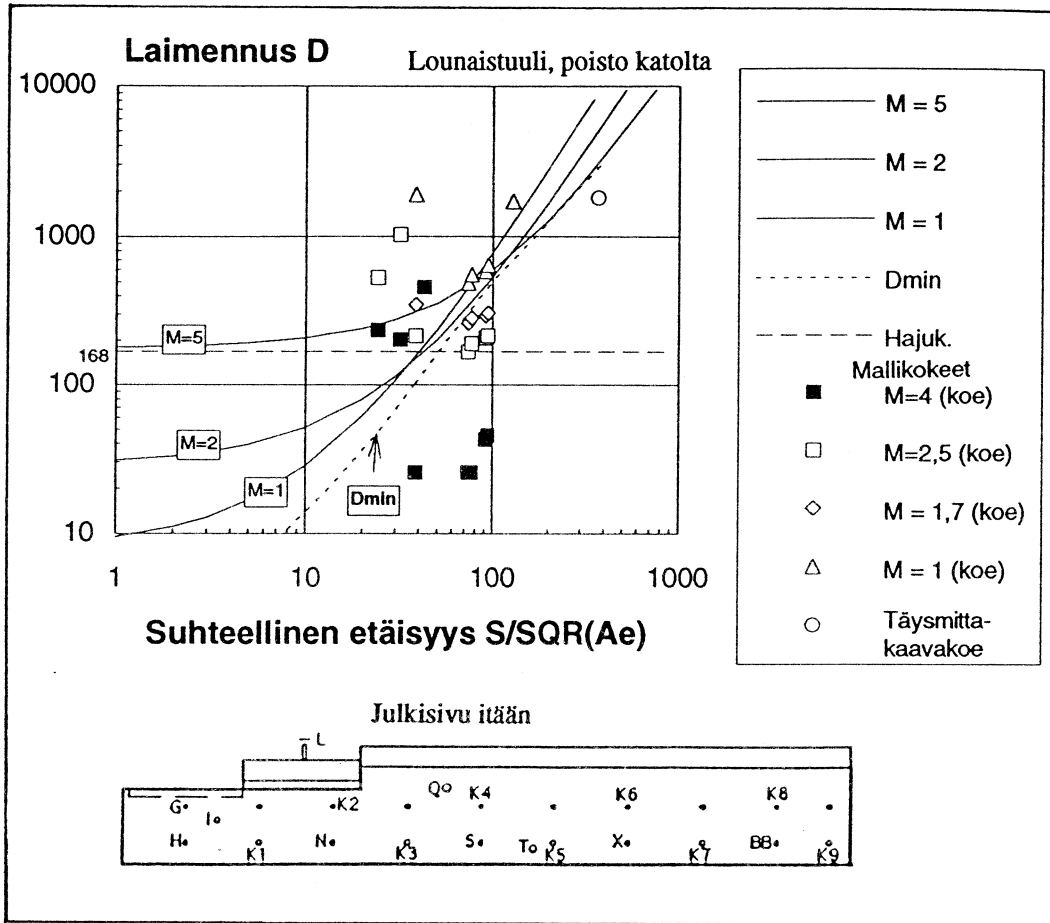
Kuvasta 38 nähdään, että yhden ja kolmen millimetrin imureikiä käytettäessä ei tuloksissa ole merkittävää eroa, jolloin imureiän koko voidaan valita tarvittaessa geometrista skaalaa suuremmaksi.

Lisäkokeissa tutkittiin myös nykyisin käytössä olevaa järjestelmää, jossa sekä poisto että ilman sisäänotto tapahtuvat saman ilmastointikonehuoneen vastakaisilta seiniltä rakennuksen katolla. Tässä tapauksessa tulokset olivat hyvin selviä (taulukko 6; koesarja 4). Tuulen puhaltaessa kohti poistopuhallusta syntyi "oikosulkuvirtaus" sisäänottoon, jolloin laimennus jäi hyvin vähäiseksi. Vastakaiselta suunnalta puhallettaessa ei merkkiainejäämiä löytynyt sisäänototosta eikä myöskään suojan puoleiselta seinältä.

Merkkiainemittausten lisäksi tehdyillä savukokeilla voitiin tarkastella poistoilman virtausta tuulen mukana. Näissä kokeissa oli esim. selvästi nähtävissä, kuinka rakennuksen päädyn läheltä (poisto H) poistettu jäteilma joutui etelän ja lännen välisillä tuulilla rakennusta sivuavaan pyörteeseen ja kulkeutui seinää pitkin rakennuksen toiseen pätyyn asti.

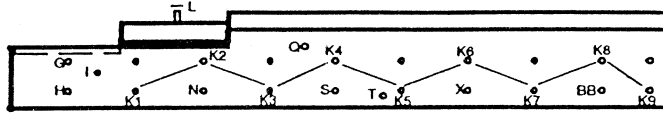


Kuva 27. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona; vertailu täysmittakaavan hetkellisiin mittaustuloksiin. Poisto T (kuva 26), $M =$ poiston nopeus/tuuli.

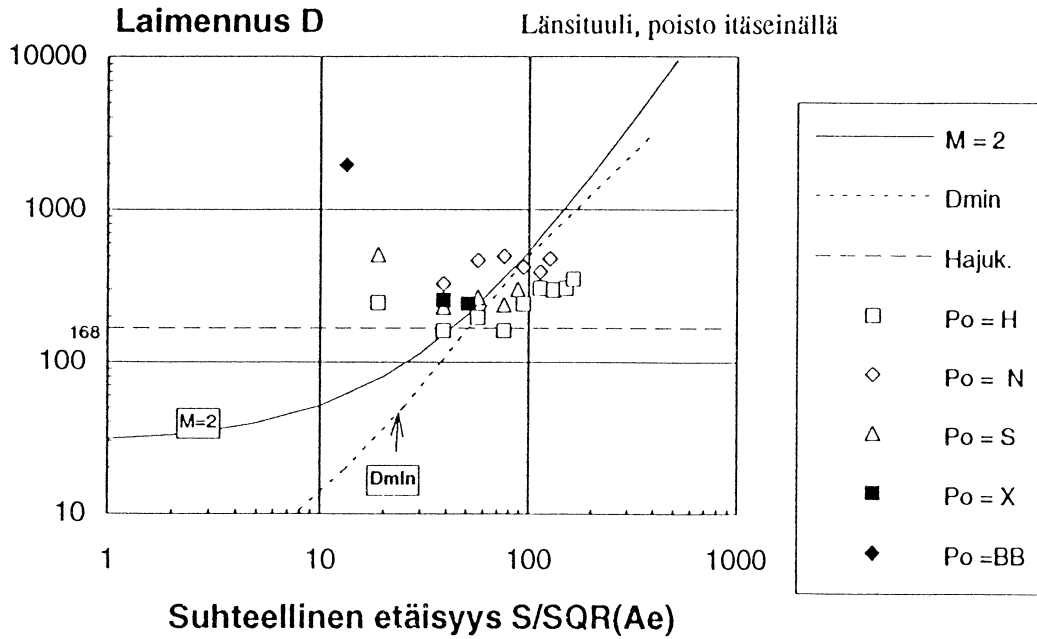


Kuva 28. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona; vertailu täysmittakaavan hetkellisiin mittaustuloksiin. Poisto L (kuva 26), M = poiston nopeus/tuuli.

TUULITUNNELIKOE, TILANNE Sarja 1 Länsituuli



Tuuli 2,00 m/s Poisto 4,00 m/s $M = \text{poiston nopeus/tuulen nopeus} = 2$
 Tulo 2,40 m/s

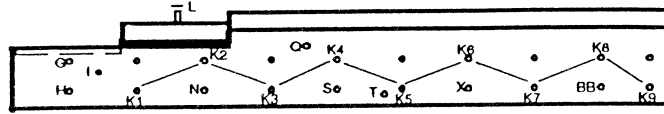


Laimennussuhde

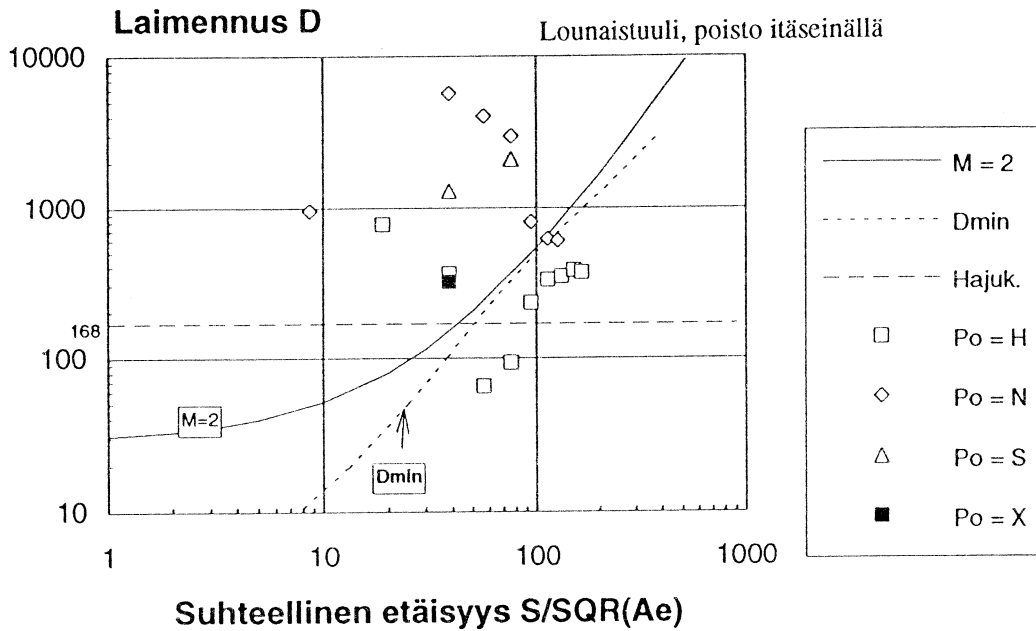
	K1	K2	K3	K4	K5	tausta	K6	K7	K8	K9
Poisto H	247	161	197	162	241	###	306	298	306	352
Poisto N	###	###	###	328	468	###	498	422	394	479
Poisto S	###	###	###	###	512	###	232	269	239	305
Poisto X	###	###	###	###	###	###	###	16904	257	244
Poisto BB	###	###	###	###	###	###	###	###	15412	1956
Poisto H	238	160	201	180	257	###	447	313	317	365

Kuva 29. Laimennussuhde seinäpoistoilla, länsituuli; mittauspisteet K1 - K9. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta $> 100\ 000$.

TILANNE Sarja2 Lounaistuuli



Tuuli 2,00 Poisto 4,00 M = poiston nopeus/tuulen nopeus = 2
 Tulo 2,40

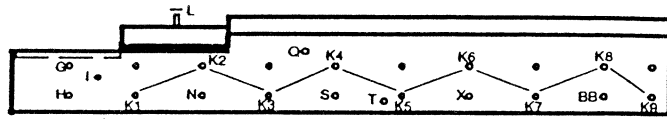


Laimennussuhde

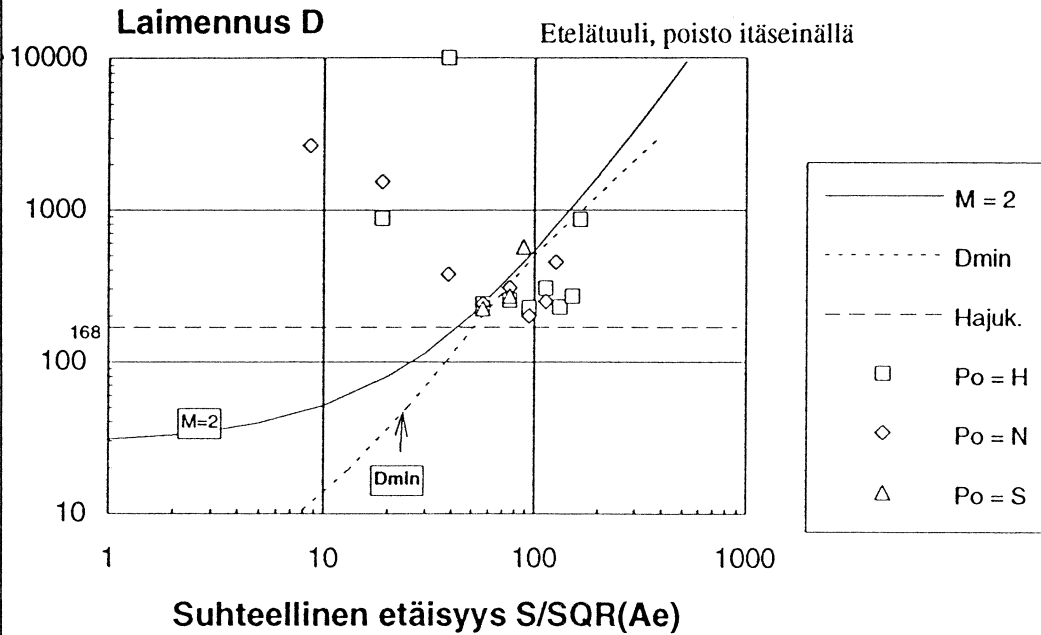
	K1	K2	K3	K4	K5	tausta	K6	K7	K8	K9
Poisto H	772	361	65	93	230	#####	328	345	381	366
Poisto N	#####	952	12635	5727	4022	#####	2979	800	621	603
Poisto S	#####	#####	#####	#####	#####	#####	1292	#####	2107	#####
Poisto X	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	316	#####

Kuva 30. Laimennussuhde seinäpoistoilla, lounaistuuli; mittauspisteet K1 - K9. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

TILANNE Sarja 3 Etelätuuli



Tuuli 2,00 m/s Poisto 4,00 m/s $M = \text{poiston nopeus/tuulen nopeus} = 2$
 Tulo 2,40 m/s

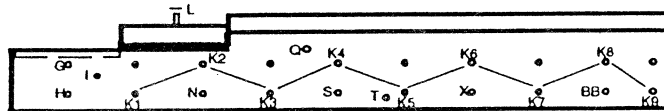


Laimennussuhde

	K1	K2	K3	K4	K5	tausta	K6	K7	K8	K9
Poisto H	872	#####	240	254	226	#####	303	227	269	863
Poisto N	#####	2685	1539	376	240	#####	306	201	249	452
Poisto S	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	224	271	571
Poisto X	kaikki äärettömiä									
Poisto BB	kaikki äärettömiä									

Kuva 31. Laimennussuhde seinäpoistoilla, etelätuuli; mittauspisteet K1 - K9. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

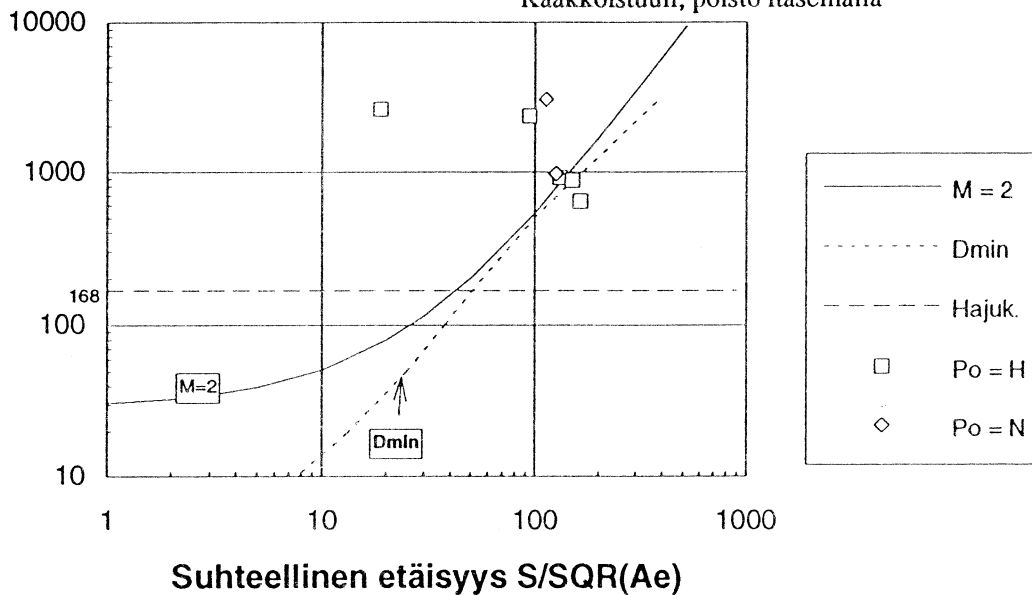
TILANNE Sarja 4 Kaakkoistuuli



Tuuli 2,0 m/s Poisto 4,0 m/s M = 2
 Tulo 2,4 m/s

Laimennus D

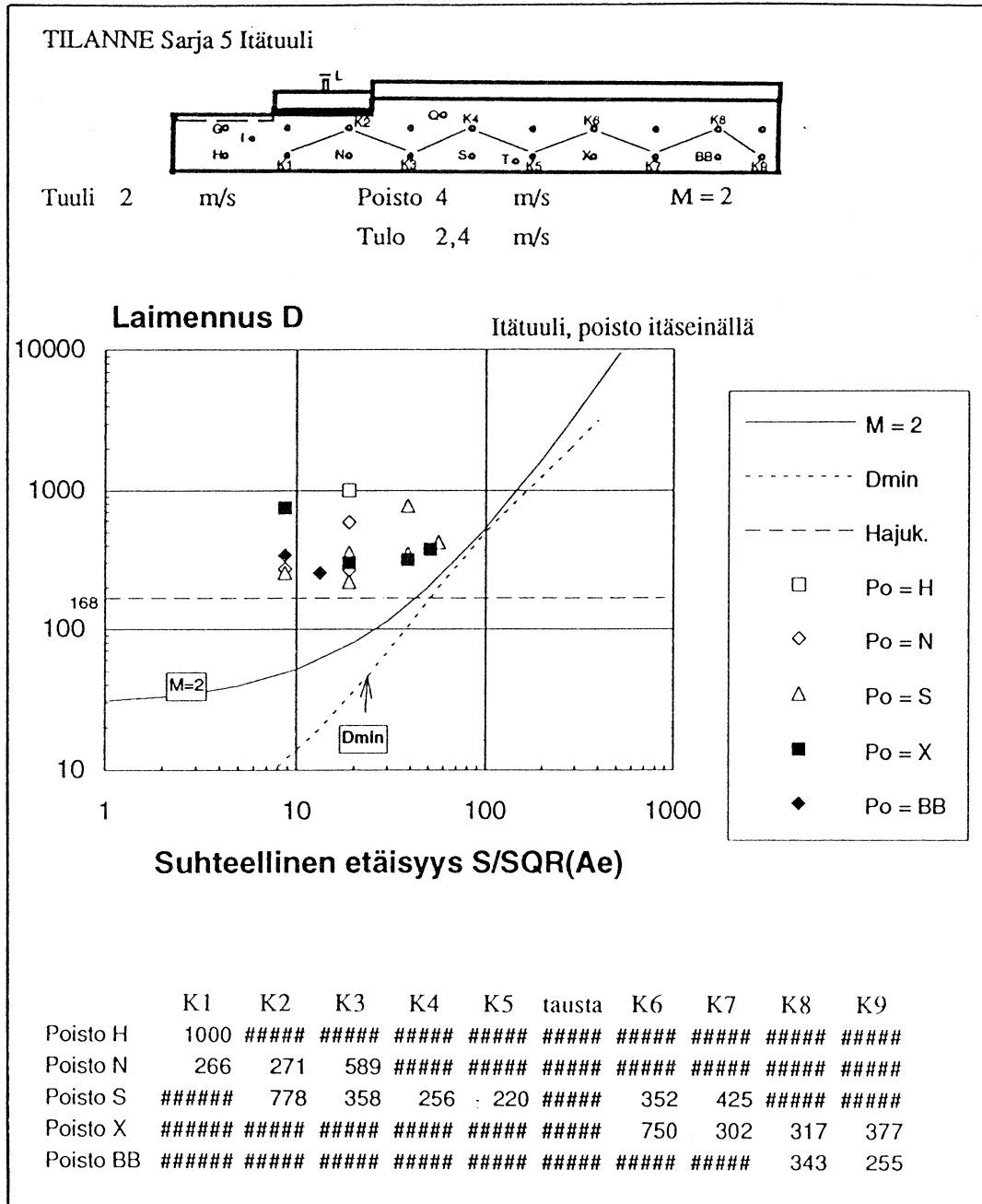
Kaakkoistuuli, poisto itäseinällä



Laimennussuhde

	K1	K2	K3	K4	K5	tausta	K6	K7	K8	K9
Poisto H	2598	#####	#####	#####	2329	#####	#####	915	874	640
Poisto N	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	3015	971
Poistot S, X ja BB	kaikki äärettömiä									

Kuva 32. Laimennussuhde seinäpoistoilla, kaakkoistuuli; mittauspisteet K1 - K9. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.



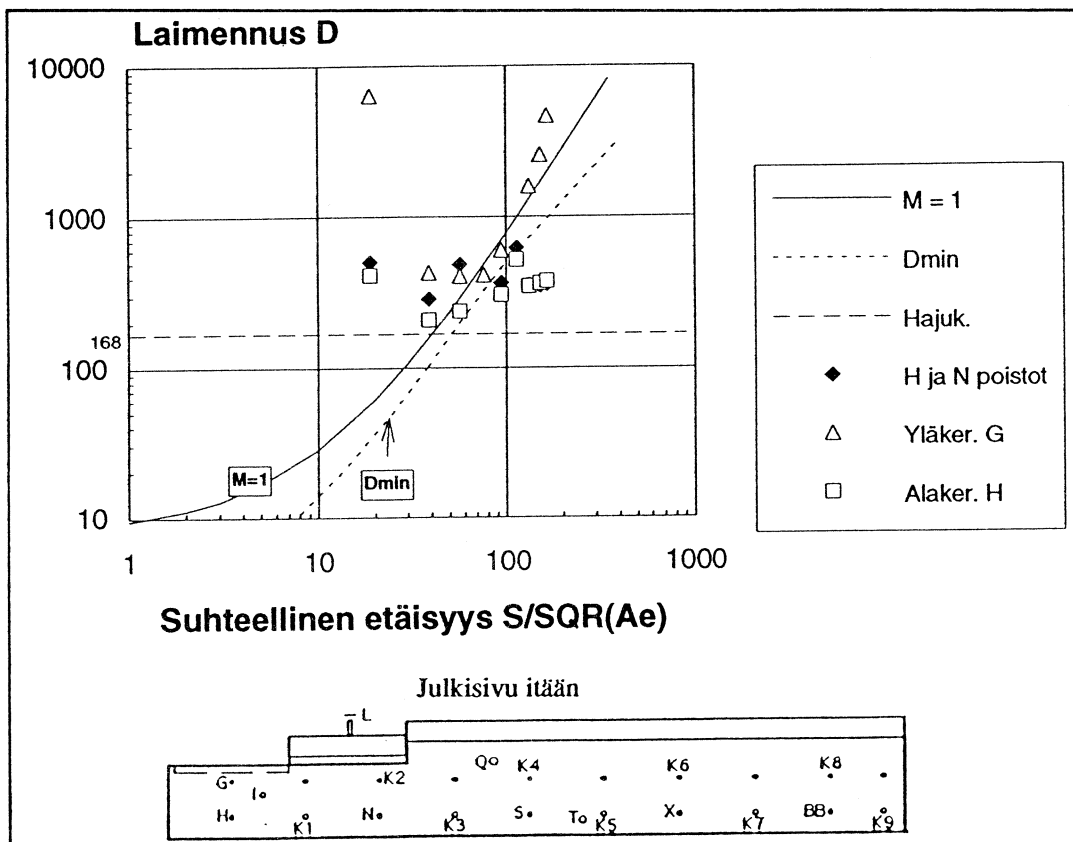
Kuva 33. Laimennussuhde seinäpoistoilla, itätuuli; mittauspisteet K1 - K9. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

Taulukko 6. Lisäkoesarjan mittaustulokset; laimennussuhteet mittauspisteissä K1...K9 (ks. kuva 26)

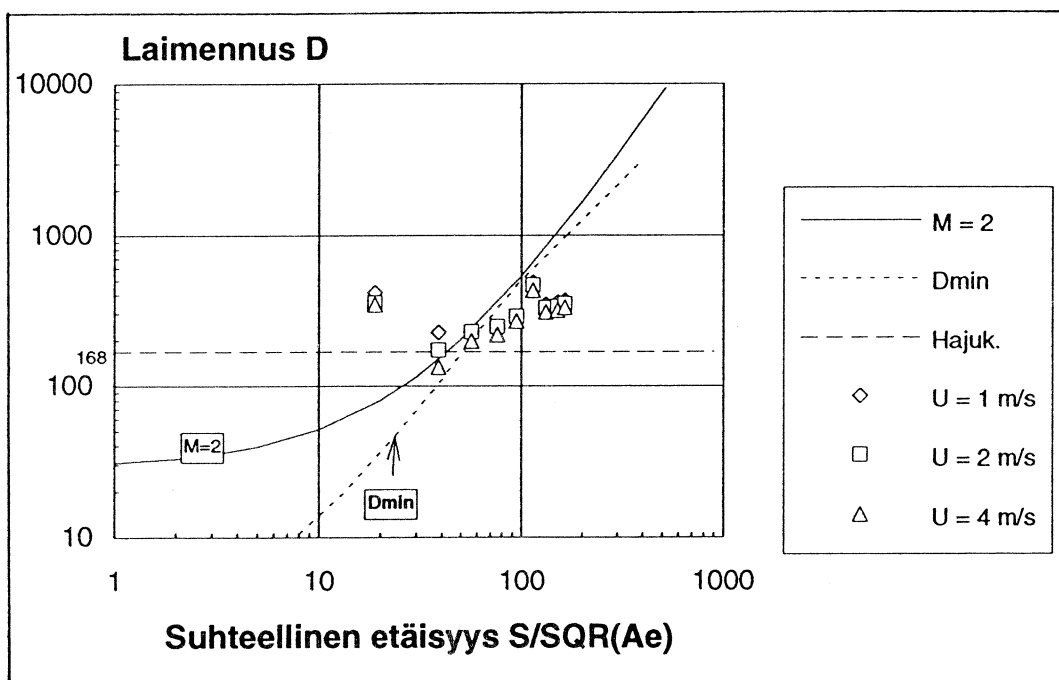
Sarake P-piste sisältää tiedot; pisteen tunnus, poistoreikien halkaisija/imureikien halkaisija ja tuulen suunta (Lo = lounas, Ka = kaakko) . M = poiston ja tuulen nopeuksien suhde. P-pit. = poiston merkkiainepitoisuus (ppm)

Laimennussuhde												
Koe no	P-piste	M	P-pit.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
S 1.1	H,N-3/3Lo 1,3		21,7	501	287	483	-	368	625	355	353	360
S 1.2	G-3/3Lo	1,3	21,7	6308	429	406	415	599	-	1576	4637	
S1.1.1	H-3/3Lo	1,3	21,7	412	210	238	-	306	520	350	363	376
S1.3.1	H-3/3Lo	2,60	21,7	415	225	228	240	286	483	346	357	368
S1.3.2	H-3/3Lo	2,64	21,7	356	173	227	247	287	462	327	333	348
S1.3.3	H-3/3Lo	2,65	21,7	346	134	198	219	268	428	310	316	330
S 2.1	H-1/3Lo	1,0	950	1366	1372	4509	3041	4795	10950	8087	8795	9417
S 2.2	H-1/1Lo	1,0	950	1280	2769	6952	5782	6369	-	-	9869	9343
S 2.3	H-1/1Ka	1,0	950	1	792	95	10882	9195	-	-	10598	12883
S2.4.1	T-1/1Lo	1,0	950	-	-	-	-	1267	-	-	26236	25040
S2.4.2	T-1/1Itä	1,0	950	-	-	-	-	13324	-	-	10278	9592
S3.1	I-0,4/1Ka	1,0	950	4		12650	14767	-	-	-	-	-

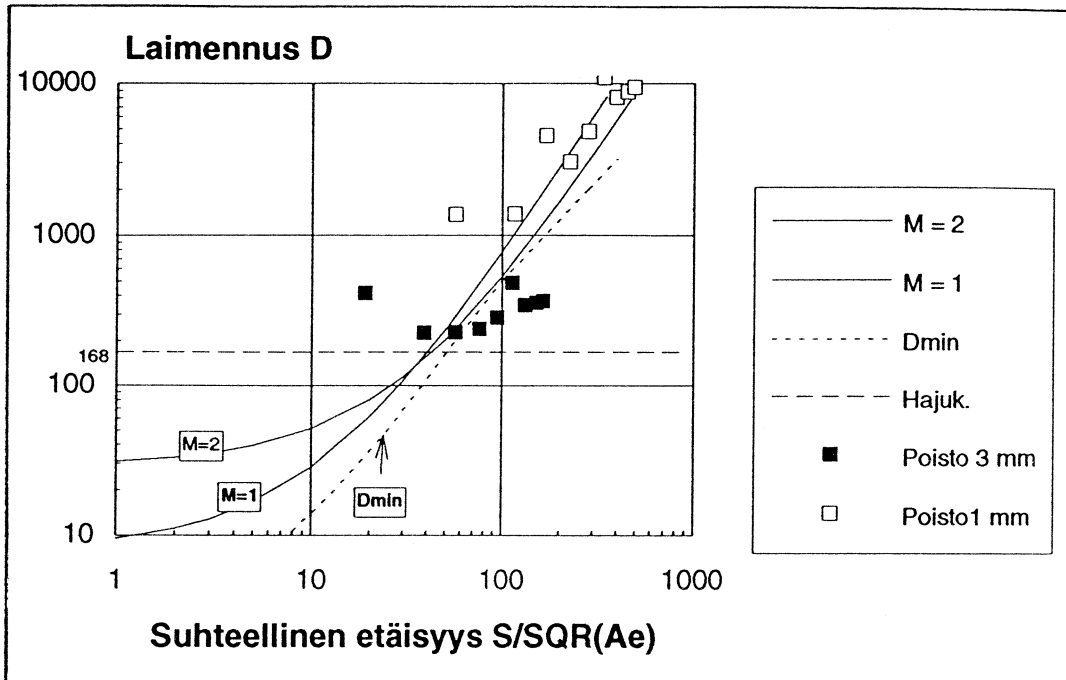
Koe no.	P-piste	M	P-pit.	Kattoimu, dimensioton etäisyys n.25
S4.1.1	Kat-3/3Itä 1,0	1,2	39,7	
S4.1.2	Kat-3/3Itä 1,0	9,1	12,9	
S4.1.3	Kat-3/3Itä 0,5	9,1	68,5	



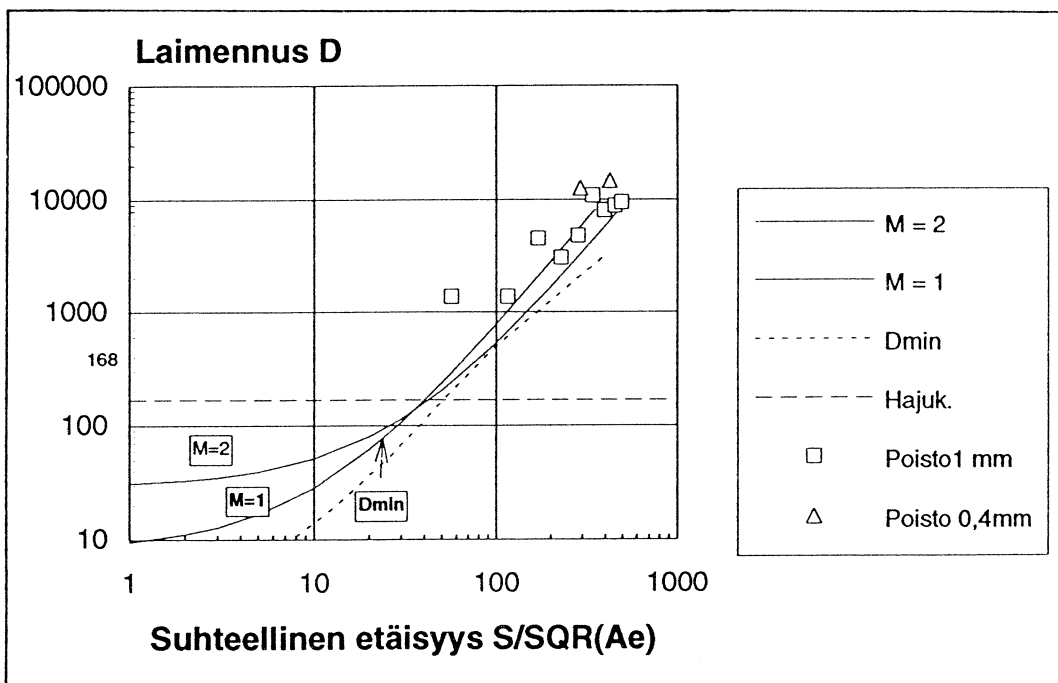
Kuva 34. Kahden yhtäaikaisen poiston sekä ylä- alakerran poistojen vertailu. Koesarjat S.1.1, S 1.2 ja S 1.1.1, taulukko 6.



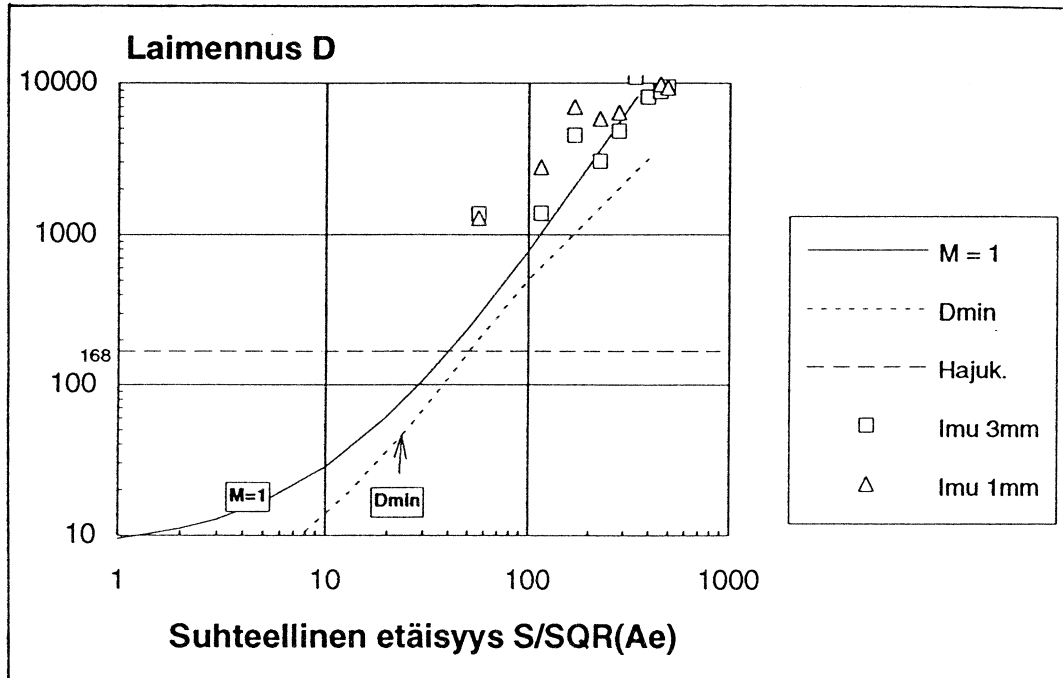
Kuva 35. Poiston ja tuulen nopeuksien absoluuttiarvojen vertailu nopeussuhteen (M) ollessa vakio. Koesarjat 1.3.1 - 1.3.3, taulukko 6.



Kuva 36. Laimennussuhde erikokoisista poistoista; halkaisijat 1 mm ja 3 mm. Koesarjat S 1.1.1 ja S 2.1, taulukko 6.



Kuva 37. Laimennussuhde erikokoisista poistoista; halkaisijat 1 mm ja 0,4 mm. Koesarjat S 2.2 ja S 3.1, taulukko 6.



Kuva 38. Laimennussuhde mitattuna erikokoisia imureikiä käyttäen. Koesarjat S 2.1 ja S 2.2, taulukko 6.

4.2.5 Johtopäätöksiä laboratoriorakennuksen tuulitunnelikokeista

LVI-laboratoriomallilla tehdyt tuulitunnelikokeet osoittivat, että tuulitunneli soveltuu jäteilman leviämisen tutkimiseen ja varsinkin erilaisten ilmanvaihtotapojen ja poistopuhallusten keskinäiseen vertailuun, koska sekä tuuliolosuhteita että koejärjestelyjä voidaan muuttaa helposti. Myös tulokset ovat tältä osin luotettavia. Esim. tuulitunnelissa käytettävien poiston ja tuulen nopeuksien ei tarvitse olla samoja kuin luonnossa, koska vain nopeuksien suhde on merkitsevä.

Sen sijaan laimennussuhteiden absoluuttiarvojen siirtäminen täysmittakaavaan vaatii vielä lisätutkimusta, joka voidaan tehdä esim. eri mittakaavaisia malleja käyttämällä. Samoin sekoittumisen dynamiikka vaatii lisätutkimusta aikaskaalauksen ja merkkiaineen oikean keräämisajan selvittämiseksi.

Kokeet vahvistivat osaltaan myös Wilsonin teoriaa. Wilsonin suositus sijoittaa poistot rakennuksen alimman kolmanneksen yläpuolelle on hyvä, jos se vain on mahdollista. Alimmasta kerroksesta poistettu ilma jää pahimmin rakennuksen seinämää huuhtelevaan pyörteeseen. Näyttää siltä, että Wilsonin ja Chuin kaavaa voidaan käyttää laimennussuhteen laskemiseen myös seinäpoistoille lähi-etäisyyksillä. Kaava antaa tällöin varmalla puolella olevia arvoja, ts. pienempiä laimennussuhteita kuin mittaustulokset osoittavat. Toisaalta joillakin tuulen suunnilla esiintyy tuulen kanavoitumista ja sellaisia rakennuksen aiheuttamia virtaus-häiriöitä, että laimeneminen ei lisäänty etäisyyden funktiona kaavan mukaan.

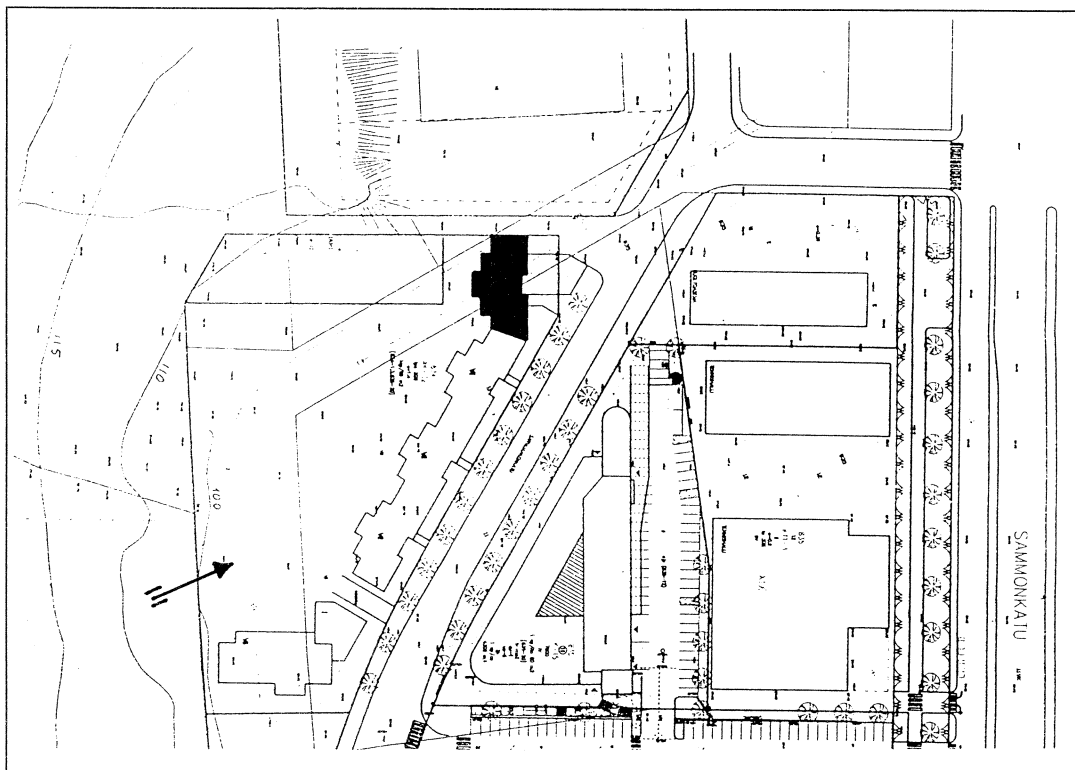
Kokeet osoittivat myös, että nykyisin hyväksyttävä järjestelmä, jossa sekä poisto että sisäänotto ovat katolla, johtaa joillakin tuulen suunnilla huomattavasti huonompaan tilanteeseen kuin seinäpoistojen käyttö. Samoin jäteilmaa kulkeutuu katolta myös suojanpuoleisilla seinillä oleviin ilmanottoaukkoihin.

5 SEINÄPUHALLUKSEN TOIMINTA KOERAKENNUSKOHTEISSA

5.1 TÄYSMITTAKAAVAKOKEET

5.1.1 Tampere

Tampereen mittauskohteena oli keväällä 1993 valmistunut 7+1-kerroksinen asuin-kerrostalo (pituus noin 28 m, leveys 12 m ja korkeus 23 m), jossa on koneellinen, huoneistokohtainen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä varustettuna LTO-laitteella. Kohde sijaitsee teollisuusalueen reunakorttelissa, jonka eteläpuolella on nouseva metsäinen harju. Ympäristön rakennuksista virtauksiin vaikuttavat eniten noin 30 metrin etäisyydellä kulmittain koillisessa sijaitseva pitkä toimistorakennus ja pohjoisessa, kauempana oleva kaupunkirakenne. (Kuva 39.)



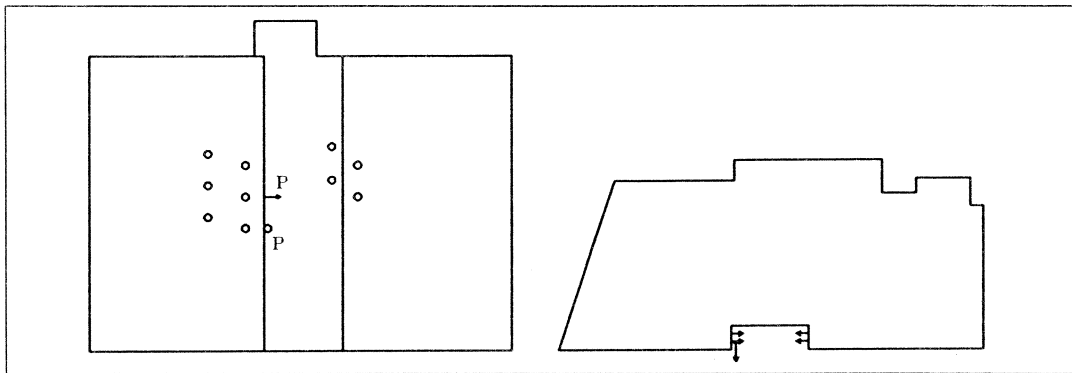
Kuva 39. Tampereen 7-kerroksinen asuin-kerrostalo ja sen ympäristö.

Jäteilman puhallusaukot on keskitetty porraskäytävän kohdalla koillisseinustalla olevaan ulkoseinän syvennykseen kunkin kerroksen yläosaan, jolloin poistosuunta on pääjulkisivun suuntainen. Puhallusaukot ovat alaspäin suunnattuja $12 \times 12 \text{ cm}^2$:n suuruisia säleikköjä, jolloin lähtönopeus jää alhaiseksi. Poistoja on syvennyksen molemmilla reunoilla. Erikseen kokeiltiin tilannetta, jossa jäteilmasuihku käännettiin mutkakanavalla ulospäin rakennuksesta.

Koillisseinällä noin 4 metrin päässä syvennyksestä sijaitsee kussakin kerroksessa yhden asunnon ilmanottoaukko. Muiden asuntojen ilmanottoaukot ovat luoteis- ja

lounaisseinillä. Asuntojen parvekkeet ovat lounaisseinällä, joten koillisseinällä ei ole tuulivirtauksia rajoittavia esteitä.

Tuloilman puhtautta tutkittiin merkkiainekokein talon koillisseinustalla, jossa ilmanottoaukot ovat lähimpänä jäteilman puhallusaukkoja. Savuilla tehdyt alustavat kokeet osoittivat havainnollisesti, että virtaukset rakennuksen koillisseinustalla olivat hyvin pyörteisiä ja jatkuvasti suunnaltaan vaihtelevia, joten savulla merkitty jäteilmaviuhka osui vain hetkittäisesti talon seinustan eri kohtiin. Savuilla määritettiin myös ensin kvalitatiivisesti ilmanottoaukot ja tuuletusikkunat, jotka näyttivät olevan eniten alttiina jäteilmalle. Mittauspisteiksi valittiin sitten nämä pahimmat kohdat, kuva 40. Mittauslaitteisto ja -menetelmä olivat samoja kuin kohdassa 4.1. Mittausolosuhteet on koottu taulukkoon 7.



Kuva 40. Kaaviokuva Tampereen asuinkerrostalosta. Jäteilman puhalluspaikat on merkitty P-kirjaimilla ja mittauspaikat pisteillä.

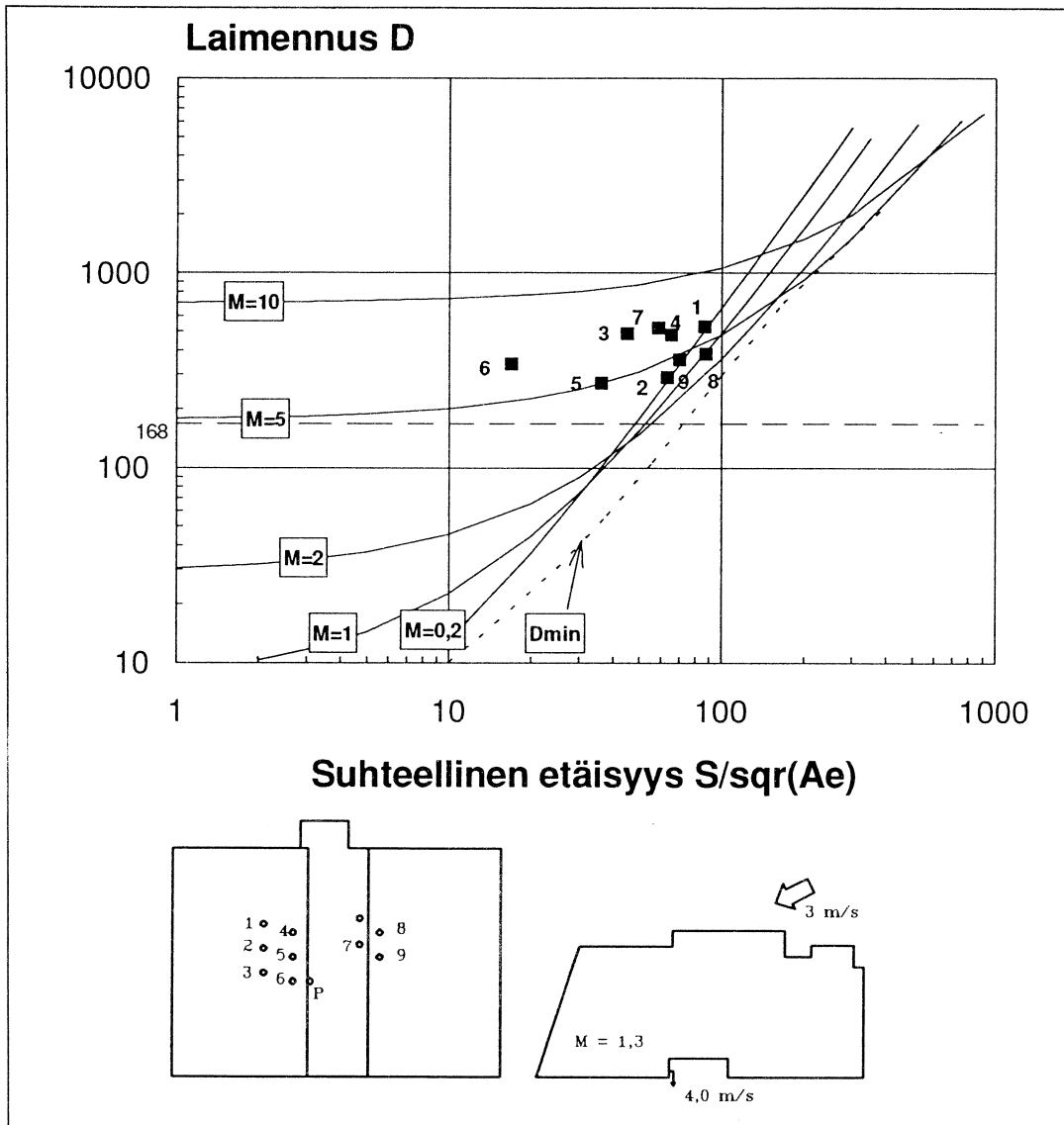
Taulukko 7. Olosuhteet Tampereen kohteen mittauksissa.

Tilanne, aika	q	V_e	T(jäteilma)	T(ulkoilma)	Tuuli
Puhalluspaikka	dm ³ /s	m/s	°C	°C	
TKOE1, 22.4.93 3. krs;mutkapuhallus	31,8	4,0	15,5	6,1	länsi 3 m/s
TKOE2, 23.4.93 4. krs;säleikkö	31,5	2,3	19	12	kaakko 1 m/s
TKOE3, 23.4.93 4. krs;säleikkö	67,9	4,9	19,3	12,6	länsi 3 - 5 m/s

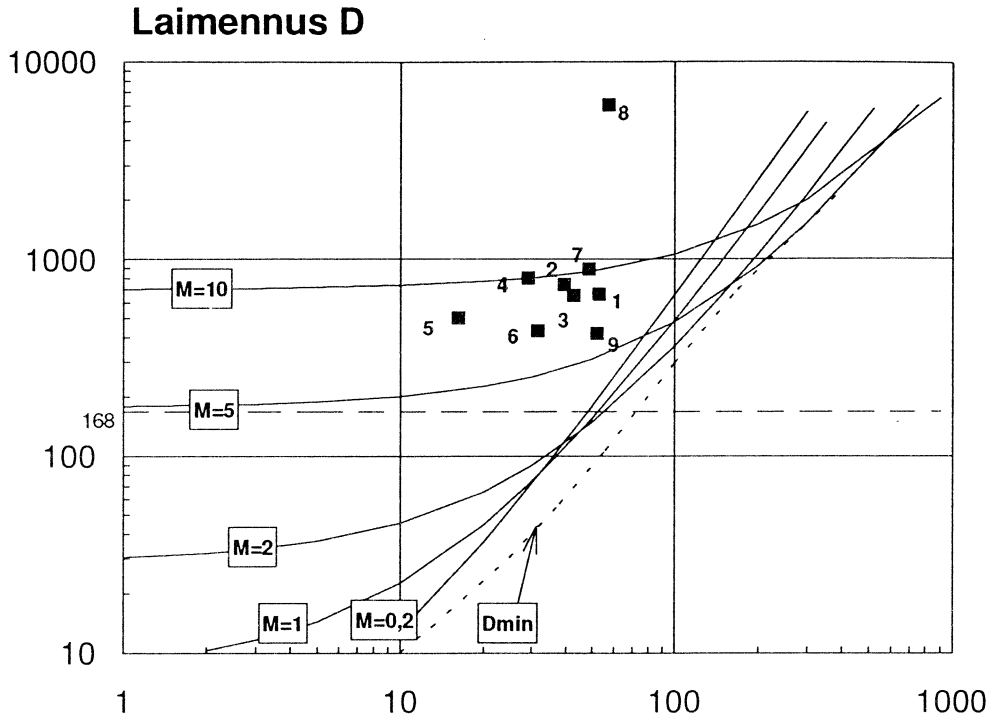
q = jäteilman tilavuusvirta, V_e = jäteilmasuihkun lähtönopeus, T = lämpötila

Tuulen nopeus on mitattu 3 m kattotason yläpuolella.

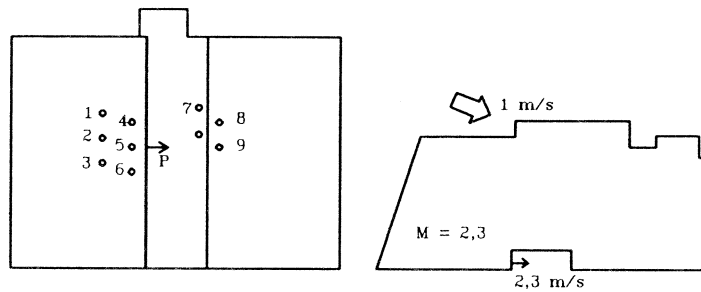
Kuvissa 41 - 43 on esitetty minimilaimennukset eli pienimmät 2 minuutin keskiarvot eri tilanteissa. Kuviin on merkitty myös hajukokeista saatu hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168.



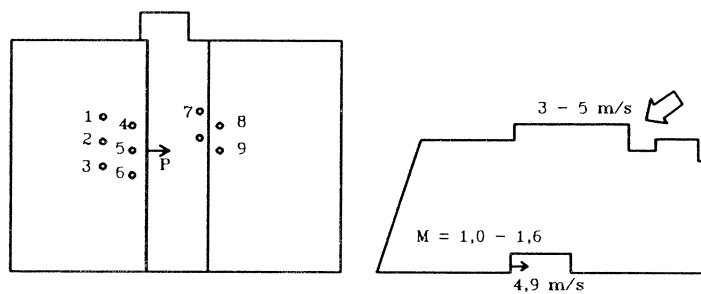
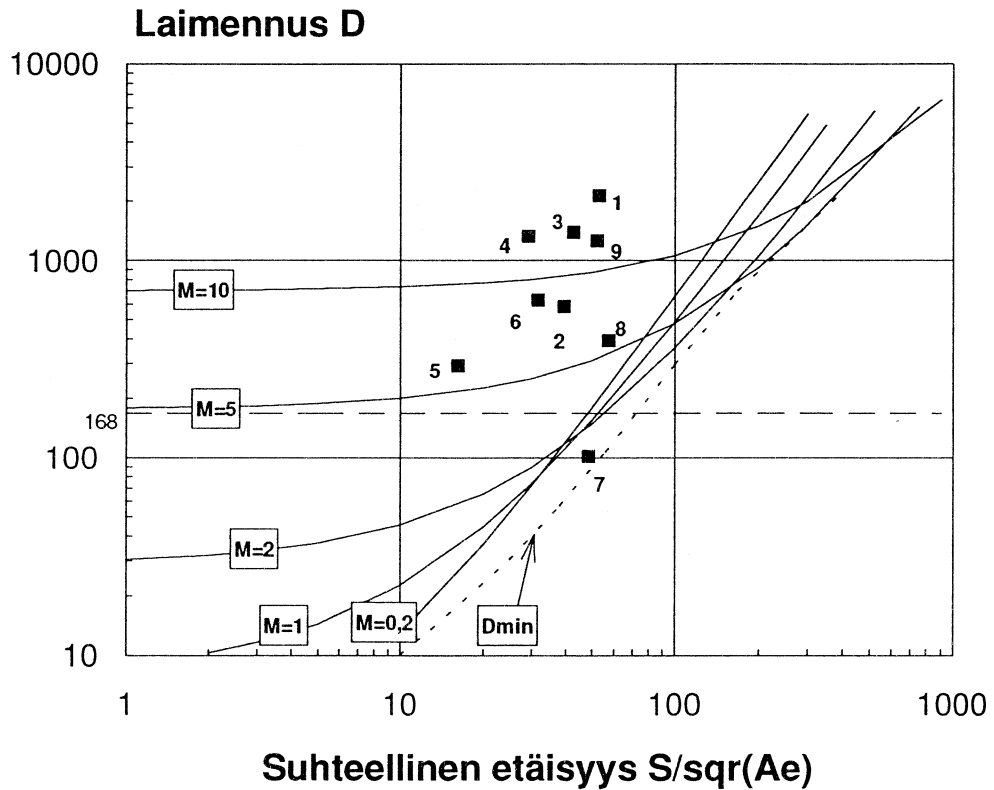
Kuva 41. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus TKOEl (taulukko 7), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.



Suhteellinen etäisyys S/\sqrt{Ae}



Kuva 42. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus TKOE2 (taulukko 7), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epädullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 43. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus TKOE3 (taulukko 7), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.

5.1.2 Tulosten tarkastelu (Tampere)

Mittauksista saatujen laimennussuhteiden olisi oltava suurempia kuin kriittistä hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168, jotta keittiön jäteilman puhaltaminen suoraan seinästä ulos ei aiheuttaisi hajuongelmia kerrostalon seinustalla. Tulosten mukaan jäteilmapuhallus ulkoseinän syvennykseen näyttää turvalliselta, sillä seinäsyvennyksessä jäteilma laimenee jo ennen kuin se mahdollisesti kulkeutuu tuulen mukana ikkunoiden ja ilmanottoaukkojen kohdalle. Parhaassa tapauksessa syvennyksessä näyttää savuhavaintojen mukaan toimivan kuin puoliavoin hormi, jossa jäteilma kohoaa suoraan katolle. Tällöin seinäsyvennyksessä voi esiintyä korkeita jäteilmapitoisuuksia, eikä se näin ollen sovellu ilman sisäänottopaikaksi. Jäteilman kääntäminen mutkakanavalla ulospäin syvennyksestä (TKOE1) huononsi tilannetta.

On muistettava, että mittaustulokset edustavat jäteilman pitoisuutta ilmanotokohdassa tai tuloilmakanavassa. Ilman tullessa huoneeseen muodostaa huonetila puskurivyöhykkeen, joka laimentaa pitoisuushuippuja. Toisaalta tulokset edustavat vain yhtä poistoilmapistettä. Useiden poistojen summavaikutus on vielä selvittämättä.

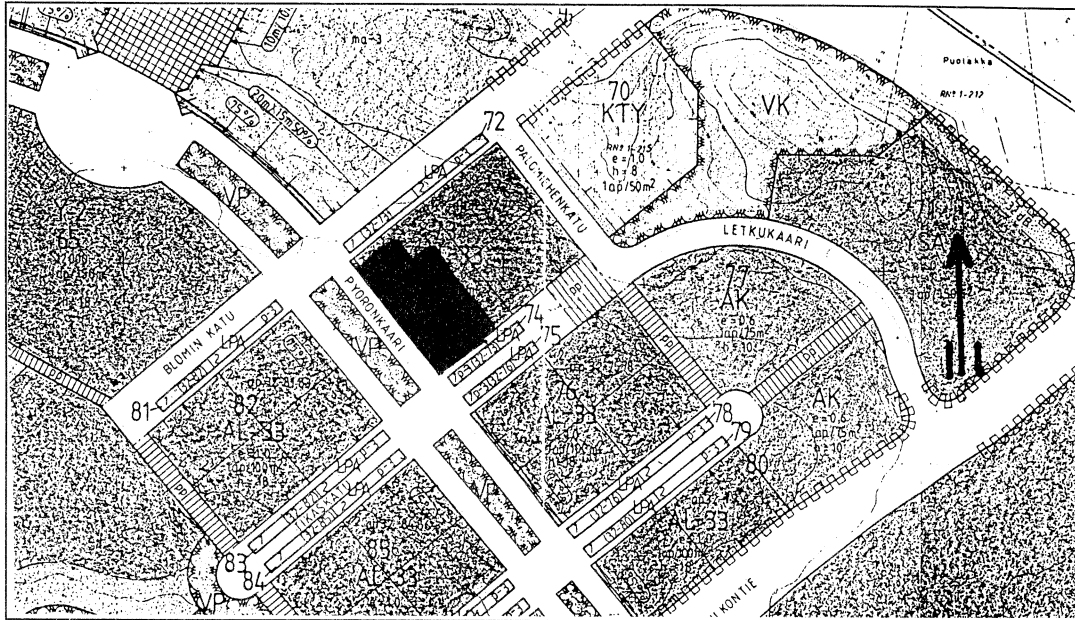
Mittaustulosten vertaaminen Wilsonin ja Chuin minimilaimennusteoriaan on kyseenalaista, kun jäteilma puhalletaan ulkoseinän syvennykseen.

5.1.3 Kuopio

Kuopiossa mittauskohteena oli keväällä 1993 valmistunut 5+1-kerroksinen asuin-kerrostalo (pituus noin 32 m, leveys 19 m ja korkeus 18 m), jossa on koneellinen, huoneistokohtainen poistoilmavaihtojärjestelmä. Kohde sijaitsee samankokoisten ja matalampien kolmekerroksisten rakennusten muodostamassa kerrostalolähiön reunakorttelissa, jonka pohjoispuolella on laskevaa metsäistä maastoa, kuva 44.

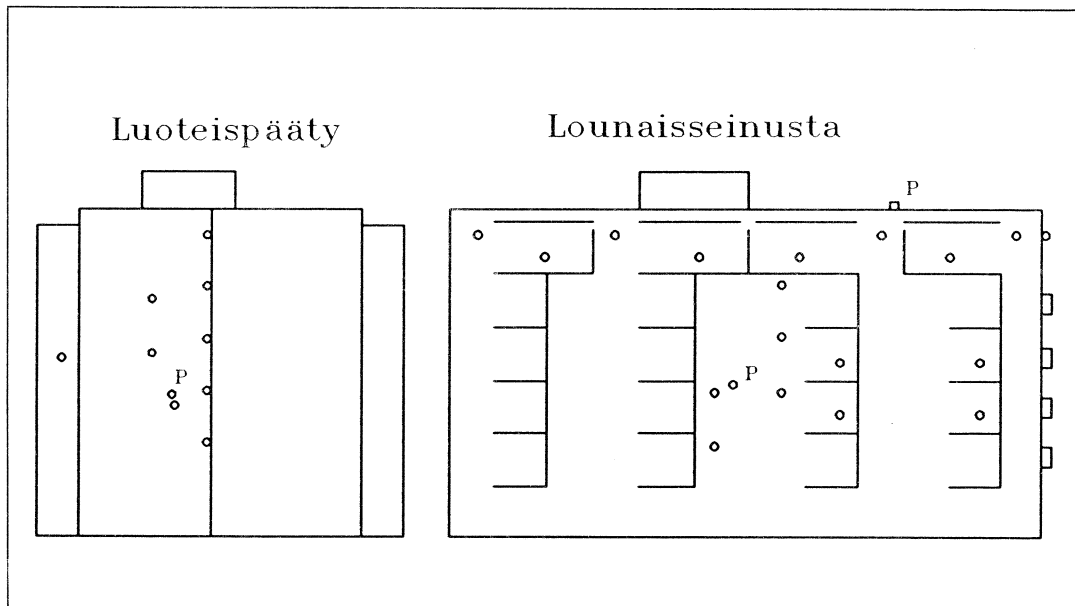
Asuntokohtaiset jäteilman puhallusaukot sijaitsevat kussakin kerroksessa lounaisella, kadun puoleisella parvekeseinällä (4 asuntoa/kerros) sekä talon luoteispäädyssä olevassa sisäkulmassa ja kaakkoispäädyssä (molemmissa päädyissä 1 asunto/kerros). Puhallusaukot ovat poikkileikkaukseltaan pyöreitä (ϕ 70 tai 80 mm), ja niihin on asennettu ristikko estämään lintujen sisäänpääsy. Laboratoriokokeissa todettiin ristikkojen vaikutus ilmasuihkun heittopituuteen vähäiseksi. Pieniä puhallusaukkoja käyttäen lähtönopeudet on saatu melko suuriksi, mikä on aikaisemmin todettu edulliseksi suorassa seinäpuhalluksessa.

Korvausilmaventtiilit on sijoitettu ikkunoiden yläkarmeihin. Rakennuksen lounaisseinustalla on massiivinen kannatuspalkeista ja sivulevyistä koostuva parvekerakennelma.



Kuva 44. Kuopion 5+1-kerroksinen asuinkerrostalo ja sen ympäristö.

Tuloilman puhtautta tutkittiin rakennuksen lounais- ja luoteisseinustoilla. Savuilla määritettiin ensin kvalitatiivisesti ilman sisäänoton kannalta pahimmat kohdat. Mittauspisteiksi valittiin sitten nämä pahimmat kohdat, kuva 45.



Kuva 45. Kaaviokuva Kuopion asuinkerrostalosta. Jäteilman puhalluspaikat on merkitty P-kirjaimilla ja mittauspaikat pisteillä.

Mittauslaitteisto ja -menetelmä olivat samoja kuin kohdassa 4.1. Mittausolosuhteet on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Olosuhteet Kuopion kohteen mittauksissa.

Tilanne, aika Puhalluspaikka	q dm^3/s	V_e m/s	$T(\text{jäteilma})$ $^{\circ}\text{C}$	$T(\text{ulkoilma})$ $^{\circ}\text{C}$	Tuuli
KKOE1, 11.5.93 2. krs;kulmapuhallus	20,9	6,4	23,0	14,9	lounas 2 m/s
KKOE2, 11.5.93 2. krs;kulmapuhallus	29,9	9,1	23,0	16,0	länsi 2 m/s
KKOE3, 12.5.93 2. krs;seinäpuhallus	21,4	6,5	23,3	13,0	länsi 2 - 6 m/s
KKOE4, 12.5.93 2. krs;seinäpuhallus	29,9	9,1	24,6	16,7	länsi 2 - 6 m/s
KKOE5, 13.5.93 Kattopuhallus	39,5	2,0	25,0	13,0	itä 1 m/s

q = jäteilmän tilavuusvirta

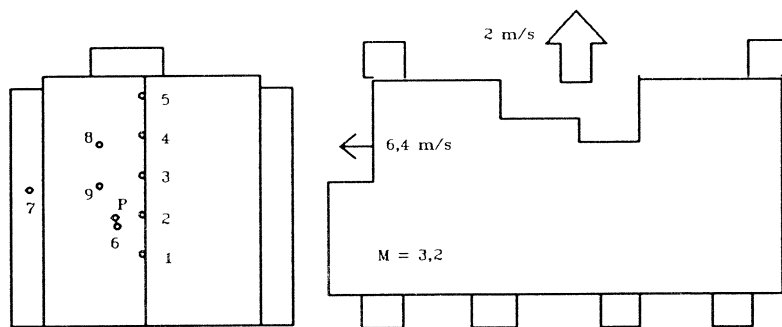
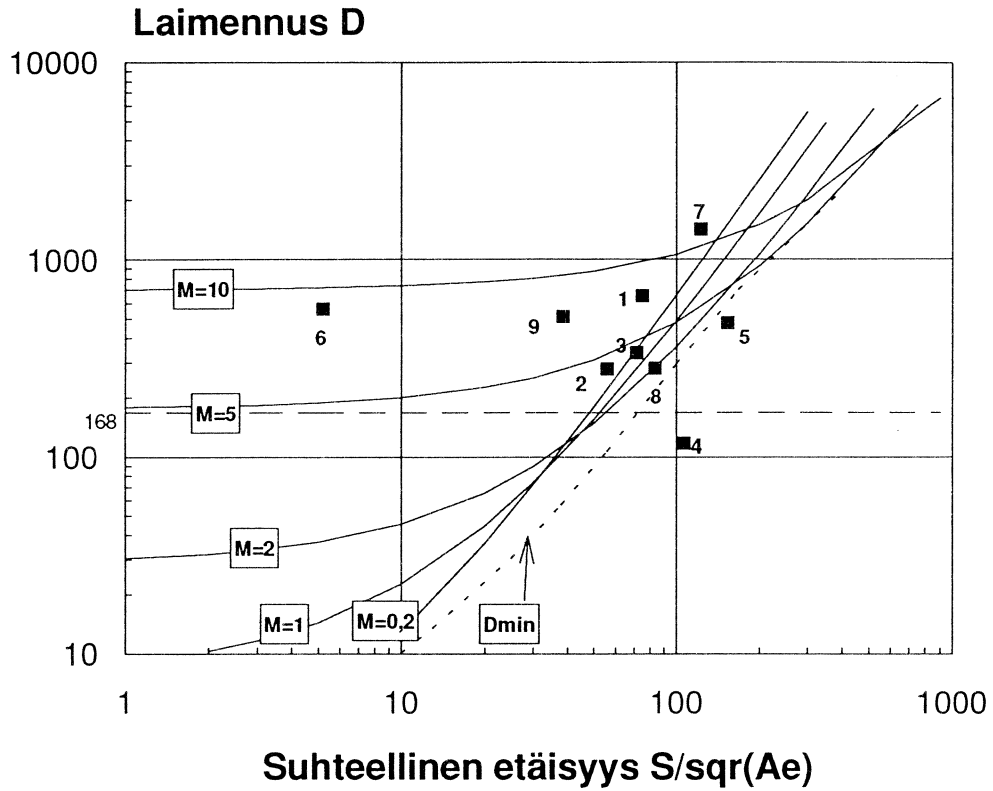
V_e = jäteilmasuihkun lähtönopeus

T = lämpötila

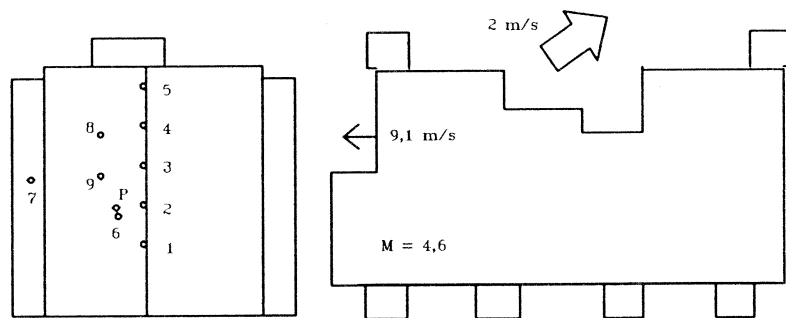
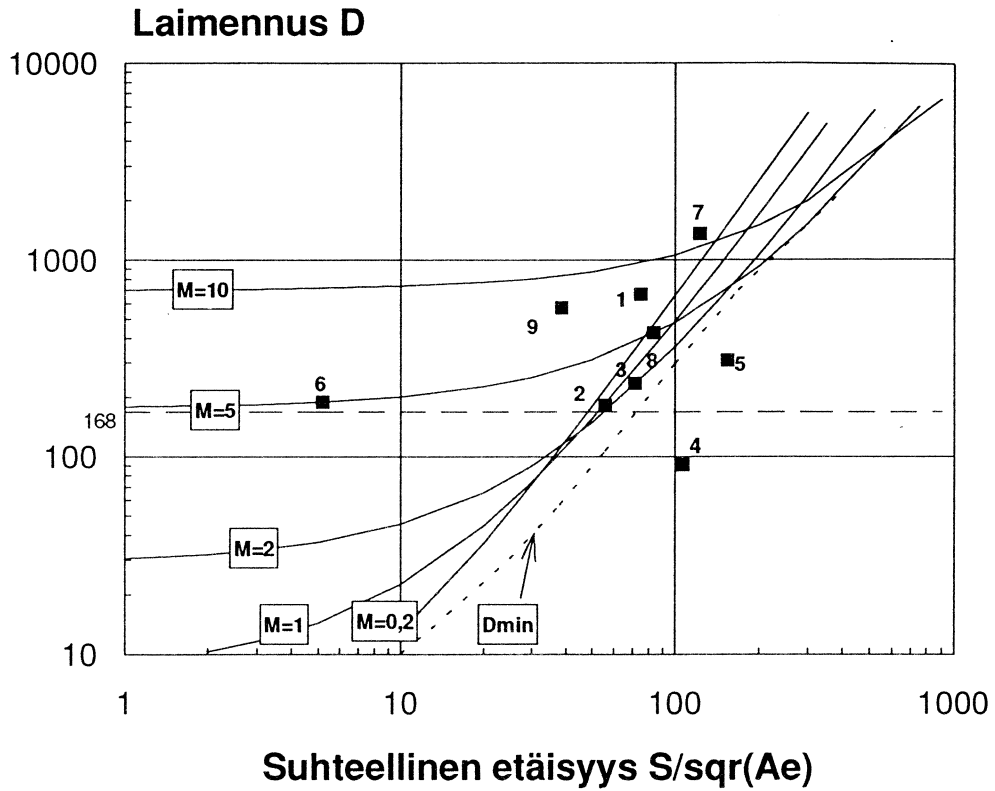
Tuulen nopeus on mitattu 3 m kattotason yläpuolella.

Kattopuhalluksen tapauksessa merkkiainetta syötettiin saunatilojen poistoilmakanavaan, jonka sisähalkaisija on 160 mm. Saunatilojen poistoilma meni katolla sijaitsevaan huippuimuriin, josta puhallussuunta oli suoraan ylöspäin. Jäteilmasuihkun lähtönopeus on laskettu olettamalla huippuimurin poistoaukon sisähalkaisija samaksi kuin poistoilmakanavan halkaisija.

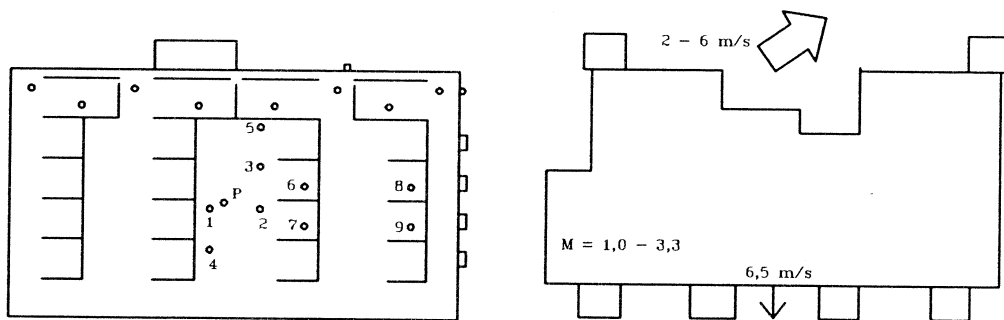
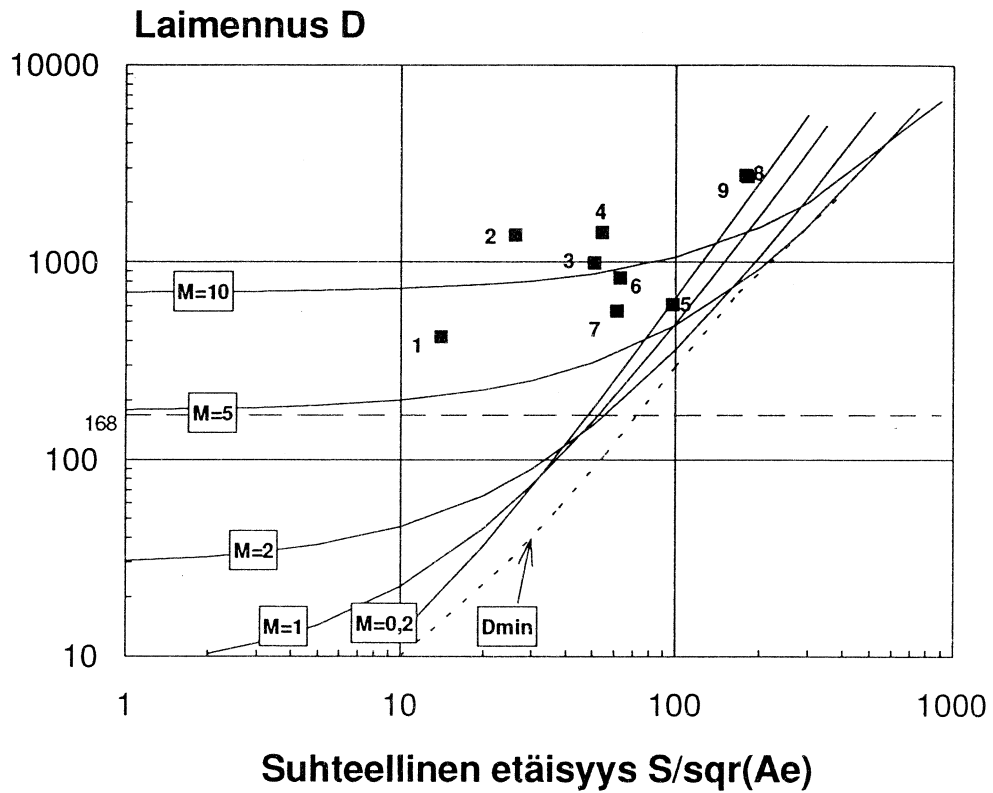
Kuvissa 46 - 50 on esitetty minimilaimennukset eli pienimmät 2 minuutin keskiarvot eri tilanteissa. Kuviin on merkitty myös hajukokeista saatu hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168.



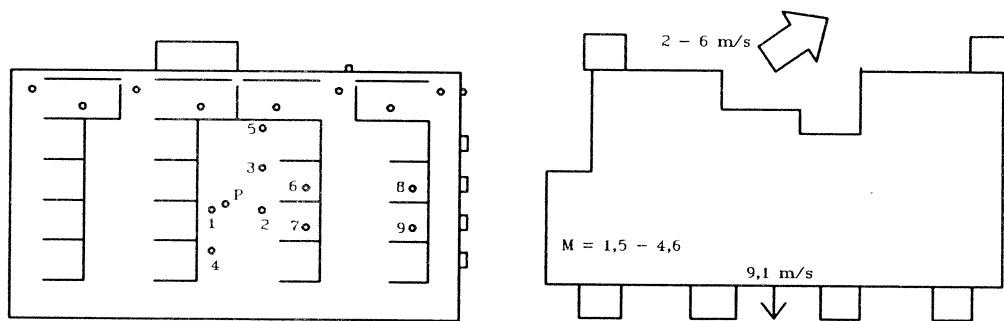
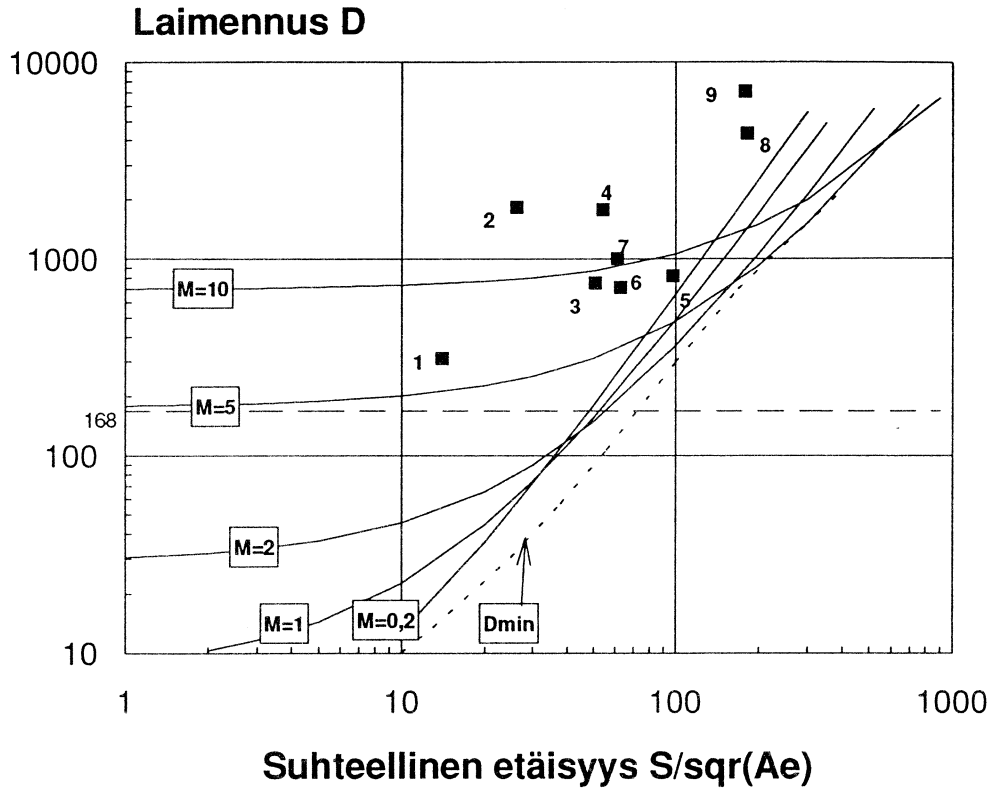
Kuva 46. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus KKOEI (taulukko 8), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.



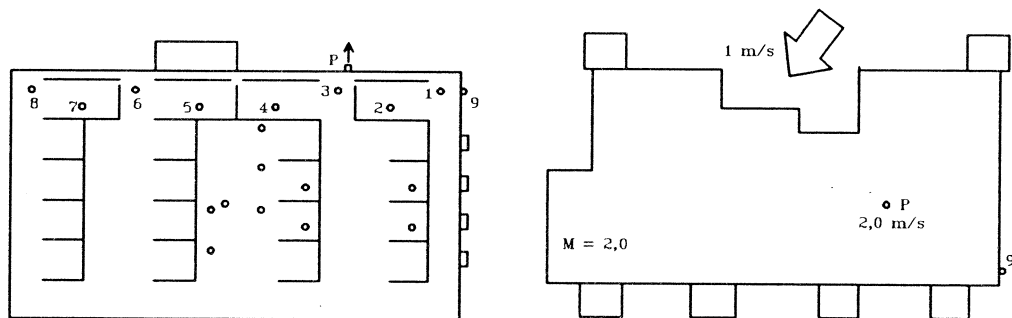
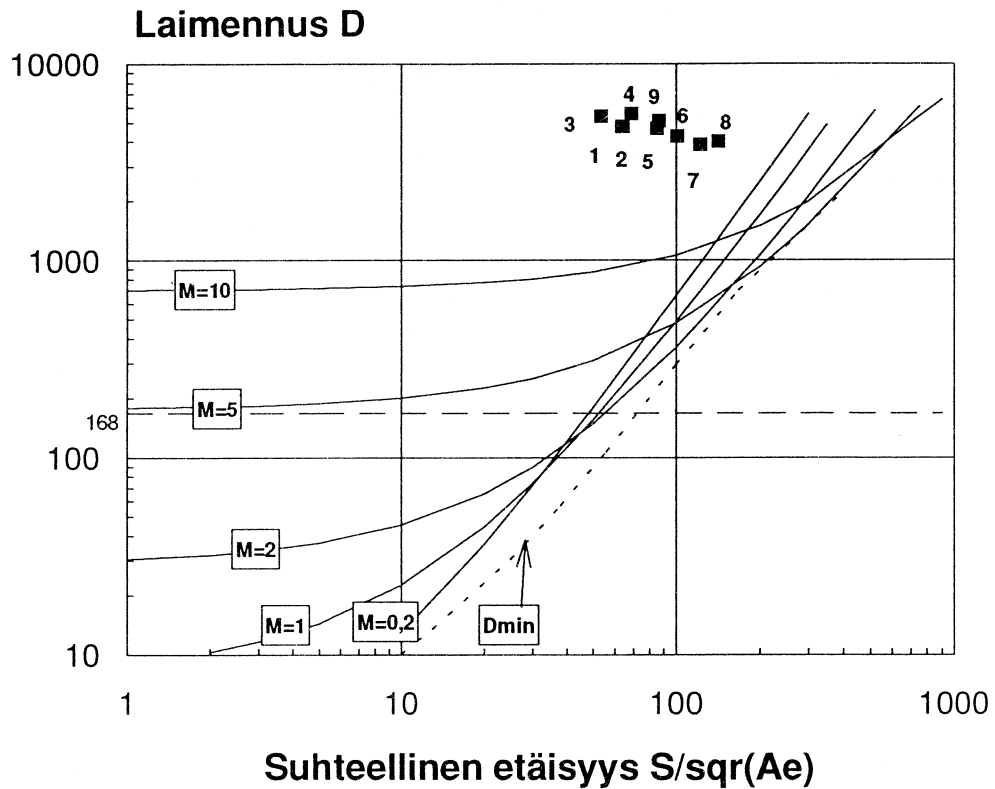
Kuva 47. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus KKOE2 (taulukko 8), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 48. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus KKOE3 (taulukko 8), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epädullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 49. Seinäpuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus KKOE4 (taulukko 8), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennukset eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.



Kuva 50. Kattopuhalluksen minimilaimennukset eri pisteissä rakennuksen seinällä, mittaus KKOE5 (taulukko 8), puhalluspaikka P. Wilsonin ja Chuin teorian antamat epäpuhtauksien pienimmät laimennussuhteet eri nopeussuhteilla M on esitetty yhtenäisillä käyrillä. Käyrä D_{min} vastaa epäedullisinta nopeussuhdetta.

5.1.4 Tulosten tarkastelu (Kuopio)

Mittauksista saatujen laimennussuhteiden olisi oltava suurempia kuin kriittistä hajukynnystä vastaava laimennussuhde 168, jotta jäteilmän puhaltaminen suoraan seinästä ulos ei aiheuttaisi hajuongelmia kerrostalohuoneistoissa. Tulosten mukaan rakennuksen luoteispäädystä oleva sisäkulma näyttää ongelmalliselta. Siinä tuulen pyörre voi tuoda jäteilmaa läheisten ulkoilmaventtiilien edustoille niin, että niissä hajukynnys ajoittain ylittyy. Sen sijaan talon lounaisella parvekeseinällä jäteilma-aukkojen lähellä sijaitsevat ulkoilma-aukot eivät näytä olevan vaaravyöhykkeessä, sillä suuren lähtönopeuden ansiosta jäteilmasuihku lentää parveketason ulkopuolelle ja kääntyy vasta sitten jo laimentuneena taloa kohti. On toki muistettava, että kenttämittaukset koskivat vain seinän suuntaisia tuulia.

On huomattava, että mittaustulokset edustavat jäteilmän pitoisuutta ilmanotokohdassa tai tuloilmakanavassa. Ilman tullessa huoneeseen huonetila muodostaa puskurivyöhykkeen, joka laimentaa pitoisuushuippuja. Toisaalta tulokset edustavat vain yhtä poistoilmapistettä. Useiden poistojen summavaikutus on vielä selvittämättä.

Kuvien 46 ja 47 mukaan Wilsonin ja Chuin minimilaimennusteoria antaa liian hyvät tulokset sisäkulmapuhalluksen tapauksissa, kun suhteellinen etäisyys $S/\sqrt{A_e}$ on yli 100. Tämä johtuu siitä, että teoria olettaa tuulen puhaltavan seinän suuntaisesti, kun taas kuvien 46 ja 47 tapauksissa tuuli on puhaltanut osittain rakennuksen nurkan takaa, mikä on aiheuttanut muutoksia virtauskenttään seinän lähellä. Savukokeista otetuista videokuvauksista näkyi, että jäteilma jäi pyörimään sisäkulmaukseen. Lisäksi kyseessä on sisäkulma, jolloin etäisyyden määrittäminen on epämääräistä (suihku suuntautuu kulman sivua pitkin, eli osittain ilmanotto-pisteeseen päin). Edelleen kyseessä on soppimainen seinäsyvennys, joka voi toimia puoliavoimen hormin tapaan, kuten Tampereen kohteessa. Mittausten vertaaminen Wilsonin ja Chuin teoriaan sisäkulmapuhallusten tapauksissa on edellä mainituista syistä johtuen kyseenalaista.

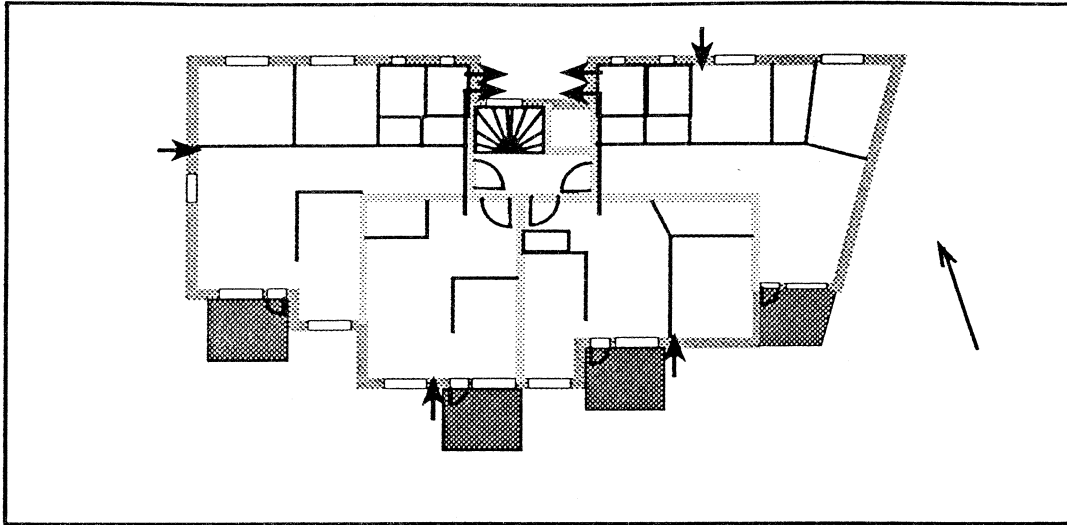
Sen sijaan seinäpuhallustapauksissa mitatut laimennukset olivat suuremmat kuin teorian antama minimilaimennus, joka edustaa pahinta tilannetta (kuvissa 48 ja 49 katkovivalla merkitty D_{min}). Näin ollen teoria johtaisi seinäpuhalluksessa turvalliseen mitoitukseen siinä tapauksessa, että jäteilmän lähtönopeus on tarpeeksi suuri heittämään suihku parveketason ulkopuolelle.

5.2 KOERAKENNUSKOHTEIDEN PIENOISMALLIKOKEET TUULITUNNELISSA

5.2.1 Koerakennusten pienoismallit

Kokeissa käytettiin VTT:n laivatekniikan laboratoriossa akryylimuovista valmistettuja pienoismalleja, joiden mittakaava oli 1 : 100. Kokeissa vain tutkittavat rakennukset oli toteutettu tarkasti oikeassa skaalassa. Ympäröivät rakennukset oli tehty yksinkertaisista särmiöistä siten, että niiden päämitat ja sijoitus olivat likimain esikuvan mukaiset. Koerakennukset oli maalattu mustiksi savun

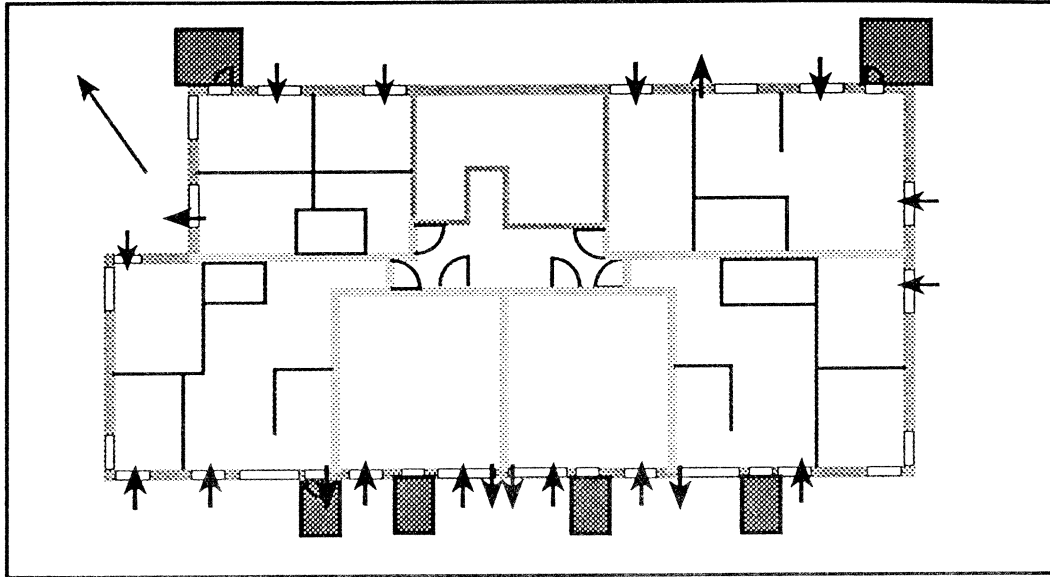
näkymisen parantamiseksi. Kuopion kohteen parvekerakennelma oli irroitettavissa. Myös ympäröiviä rakennuksia voitiin vapaasti poistaa niiden vaikutuksen tutkimiseksi. Läheisiä metsiä simuloitiin verkoilla.



Kuva 51. Tampereen koerakentamiskohteen pohjapiirustus sekä poistojen ja sisäänottojen sijainti. Rakennuksen mitat on esitetty kohdassa 5.1.

Tampereen koerakennuskohde (As. Oy. Kalevankilpi)

Tampereen kohde oli 7+1-kerroksinen asuintalo, jonka jatkoksi on myöhemmin tarkoitettu rakentaa yhtä korkea, mutta kolme kertaa pitempi rakennus. Asuntojen jäteilmapoistot on koottu pohjoisella sijaitsevaan syvennykseen kunkin kerroksen yläosaan, jolloin poistosuunta on pääjulkisivun suuntainen (kuva 51). Poistoja on syvennyksen molemmilla reunoilla, jolloin ne suuntautuvat toisiaan vasten. Mallissa on toteutettu 1., 4. ja 7. asuinkerroksen poistot, joista savua tai merkkiainetta puhallettiin. Pohjoisella n. 4 metrin päässä syvennyksestä sijaitsee kussakin kerroksessa yhden asunnon ilman sisäänottoaukot. Muiden asuntojen sisäännotot ovat länsi- ja eteläisillä. Asuntojen parvekkeet ovat eteläisellä. Päähuomio kohdistuu näin ollen pohjoisella sijaitseviin sisäänottoihin. Ympäristön rakennuksista virtaukseen vaikuttavat eniten n. 30 metrin etäisyydellä kulmittain koillisessa sijaitseva pitkä toimistorakennus, pohjoisessa kauempana oleva kaupunkirakenne ja etelässä harju ja sillä kasvava puusto. Näiden vaikutus otettiin huomioon myös tuulitunnelikokeissa. Kokeita tehtiin eri tuulen suunnilla siten, että virtaus kohdistui suoraan tai vinosti kohti pohjoisella, sen suuntaisesti ja myös rakennuksen yli etelästä. Sekä jäteilmapoistoaukot että ilman sisäänottoaukot, joista merkkiainetta kerättiin, olivat halkaisijaltaan 1 mm. Poistoaukon vapaan pinnan mukaan laskien aukon halkaisijan olisi pitänyt olla 1,3 mm, jos mittakaava on 1 : 100.



Kuva 52. Kuopion koerakentamiskohteen pohjapiirustus sekä poistojen ja sisäänottojen sijainti. Rakennuksen mitat on esitetty kohdassa 5.1.

Kuopion koerakennuskohde (As. Oy. Tikaskatu 1)

Kuopion tutkimuskohde oli 5+1-kerroksinen asuintalo, joka sijaitsee samanlaisten ja pienempien kolmikerroksisten rakennusten muodostamassa kerrostalolähiön reunakorttelissa, jonka pohjoispuolella on laskevaa metsäistä maastoa. Asuntokohtaiset poistot sijaitsevat kussakin kerroksessa lounaisella julkisivulla (4 asuntoa/kerros) sekä luoteis- ja koillisjulkisivuilla (molemmilla 1 asunto/kerros). Sisäännotot ovat ikkunapuitteissa kaikilla seinillä. Rakennuksen lounaisseinällä on poikkeuksellinen parvekerakennelma massiivisin kannatuspalkein. Pienoismallissa toteutettiin poistot lounaisseinän keskeltä kolmannesta ja viidennestä asuinkerroksesta sekä luoteispäädyn poisto kolmannesta asuinkerroksesta (kuva 52). Parvekerakennelma oli kokonaisuutena irroitettavissa sen vaikutuksen tutkimiseksi. Myös tässä tapauksessa poistoaukot olivat halkaisijaltaan 1 mm, kun niiden tarkka geometrinen skaalaus antaisi halkaisijaksi 0,7 ja 0,8 mm.

5.2.2 Koerakennuskohteiden visualisointikokeet savulla

Visualisoimalla rakennusta ympäröivää virtausta savulla saadaan näkyviin virtauskenttä, jolloin voidaan tarkastella jäteilman leviämisuuntia eri tuulensuunnilla. Samalla voidaan tarvittavien merkkiainekokeiden määrää vähentää karsimalla pois ne tilanteet, joissa jäteilma ei kulkeudu rakennuksen seinille. Nykyisellä savutekniikalla poistosavulla on aina oltava verrattain suuri nopeus, jotta savu olisi havaittavissa. Toisaalta laskemalla savua virtaukseen rakennuksen edestä saadaan tuulen virtaukset näkyviin. Pienellä lähtönopeudella poistuvan jäteilman voidaan olettaa kulkevan tuulivirtausten mukana. Tässä tutkimuksessa käytettiin molempia savutekniikoita. Savukokeilla saadaan selville, mihin jäteilma kulkeutuu ja miten se osuu tutkittaviin sisäänottopisteisiin, esim. jatkuvasti vai ajoittain. Myös sekoittumista voi arvioida virtauksen pyörteisyyden perusteella.

Laimenemissuhteen määrittämiseksi merkkiainekokeet ovat kuitenkin välttämättömiä. Eri tuulensuuntia tutkittiin kääntämällä mallia tunnelissa.

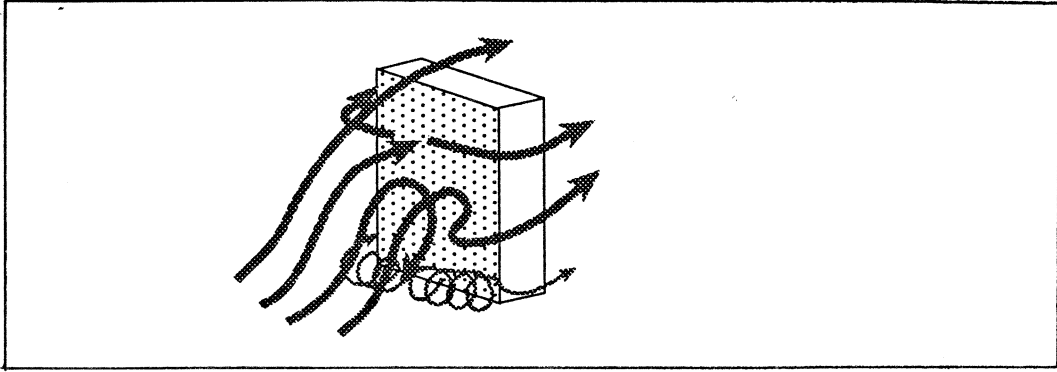
Savukokeissa käytettiin tuulen virtausnopeutta 1,5 m/s, jolloin savu ohittaa rakennuksen 10 kertaa nopeammin kuin 15 m/s tuuli todellisuudessa. Rakennuksen terävistä nurkista johtuen virtaus on Reynoldsin luvusta riippumaton, jolloin virtauskenttä on nopeudesta riippumaton ja mallin virtauskenttä on samanlainen kuin täysmittakaavassa. Savukokeet kuvattiin videokameralla, jolloin virtausta voitiin tarkastella tarkemmin jälkeenpäin mm. hidastusten avulla.

Koerakentamiskohteet Kuopiossa ja Tampereella poikkeavat kohdassa 4.2 käsitellystä LVI-laboratoriorakennuksesta paitsi mittasuhteiltaan erityisesti ympäristöltään (ks. kohta 5.1). Molempien koerakennusten lähellä on samaa kokoluokkaa olevia taloja, jotka vaikuttavat koerakennusta kohtaavaan virtaukseen eri tuulensuunnilla eri tavoin. Lisäksi Kuopion kohteessa oli massiivinen parvekerakennelma ja Tampereella taas jäteilma poistettiin rakennuksen julkisivussa olevaan syvennykseen. Tämän takia koerakentamiskohteiden tuulitunnelikokeet aloitettiin savukokeilla.

5.2.3 Visualisointikokeiden tulokset

Tampere

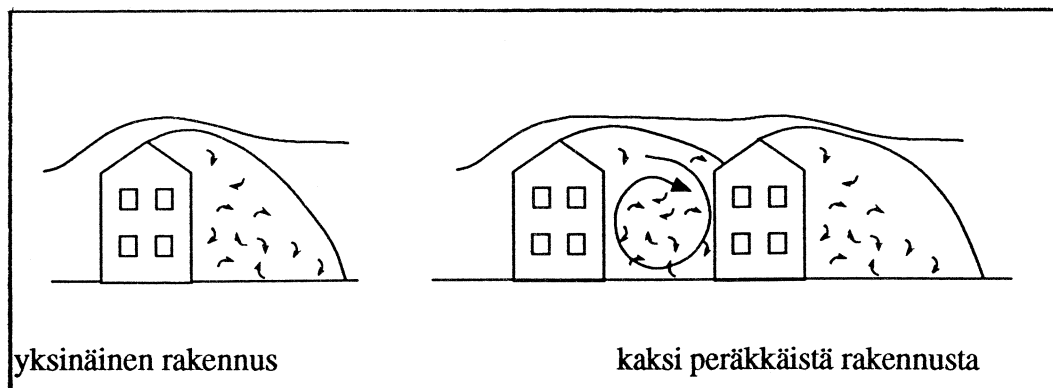
Tampereen tutkimuskohteen ensimmäinen rakentamisvaihe on tyypillinen tornitalo, jonka tuulenpuoleisella julkisivulla esiintyy voimakkaita pystysuuntaisia virtauksia (kuva 53). Rakennuksen jäteilmapoistot on keskitetty kerroksittain pohjoisjulkisivulla olevaan syvennykseen. Tämä syvennys toimii ikään kuin hormina, josta puuttuu yksi seinä. Tässä "hormissa" ilma kulkee pääasiassa pystysuuntaisesti. Tuulen käydessä pohjoissektorilta seinän kohtaava virtaus jakaantuu noin rakennuksen 2/3:n korkeudelta ylös ja alas. Tällöin myös jäteilma kulkeutuu alakerroksista alaspäin ja ylimmistä (5 - 7) kerroksista ylöspäin tuulen mukana varsinkin, kun jäteilman lähtönopeus on pieni. Pohjoisjulkisivun suuntaisilla itä- ja länsituulilla syvennyksestä vuotaa jäteilmaa myös julkisivulle, tosin voimakkaasti sekoittuneena. Tällöin on mahdollista, että jonkin verran jäteilmaa kulkeutuu itätuulella pohjoisjulkisivulla oleviin sisäänottoihin ja länsituulella itäpäädyssä oleviin sisäänottoihin. Etelätuulella poistot ovat rakennuksen vanavedessä, jossa virtaus on seinän lähellä ylöspäin jättöpyörteen takia. Turbulenssi on hyvin voimakasta, joten jäteilma sekoittuu ympäröivään ilmavirtaukseen eikä sen kulkeutumista voi kovin tarkasti ennustaa. Eteläisellä julkisivulla olevat parvekkeet ovat kaukana poistoista eikä jäteilmaa kulkeudu niille mainittavina pitoisuuksina. Myös virtausta rakennuksen katolla visualisoitiin kattopuhallusta ajatellen. Katolle syntyy voimakas pyörre, johon jäteilma sekoituisi. Ilma purkautuu katolta vanaveden pyörteisiin rakennuksen suojanpuolelle, jolloin jäteilma voisi kulkeutua katutasolle ja edelleen seinälle. Pitoisuudet olisivat kuitenkin tässä vaiheessa jo pieniä. Jatkorakentaminen ei vaikuta rakennusta ympäröivään virtaukseen siten, että jäteilman virtaukset muuttuisivat ratkaisevasti.



Kuva 53. Tornitaloa ympäröivän virtauksen kaaviokuva.

Kuopio

Savukokeissa oli selvästi havaittavissa ympäröivien rakennusten ja luoteessa olevan metsikön vaikutus tuulen virtauskuvioiden rakennuksen ympärillä. Lounaistuulella, jolloin tuuli käy kohti parvekejulkisivua kadun toisella puolella olevien rakennusten yli, muodostuu rakennuksen eteen suuri pyörrealue. Tällöin seinältä puhallettu jäteilma sekoittuu tulevaan virtaukseen ja kulkeutuu julkisivulla oleviin eri huoneistojen sisäänottoihin. Ylimmän kerroksen jäteilmapuhallus käyttäytyy muista kerroksista poiketen. Varsinkin suurella poistonepeudella puhallettu ilma ohjautuu parvekkeen katoksen yli katolle eikä joudu seinille. Tuulen käydessä vinosti kohti julkisivua (etelä- ja länsituulet) virtaus kääntyy enemmän tai vähemmän rakennuksen julkisivun suuntaiseksi, jolloin jäteilmaa kulkeutuu tuulen mukana alavirran puoleisiin sisäänottoihin. Parvekkeet ja niiden tukirakennelmat aiheuttavat jälleen voimakkaita häiriöitä virtaukseen ja edistävät jäteilman sekoittumista ja leviämistä laajemmalle alueelle. Tässä tilanteessa jäteilman ulospuhallusnopeudella on suuri merkitys, koska pienellä ulospuhallusnopeudella jäteilma jää pyörimään parvekerakennelman sisään ja voi joutua takaisin rakennukseen. Ero kokeisiin, joissa parvekerakennelmat oli poistettu, oli selvä. Edessä olevat rakennukset lisäävät kanavoitumista kadun suuntaiseksi, mutta leveällä kadulla vain vähän. Sen sijaan niiden takia koetaloa kohtaava virtaus on näilläkin ilmansuunnilla pyörteistä (kuva 54).



yksinäinen rakennus

kaksi peräkkäistä rakennusta

Kuva 54. Kaaviokuva edessä olevan rakennuksen vaikutuksesta virtauskenttään.

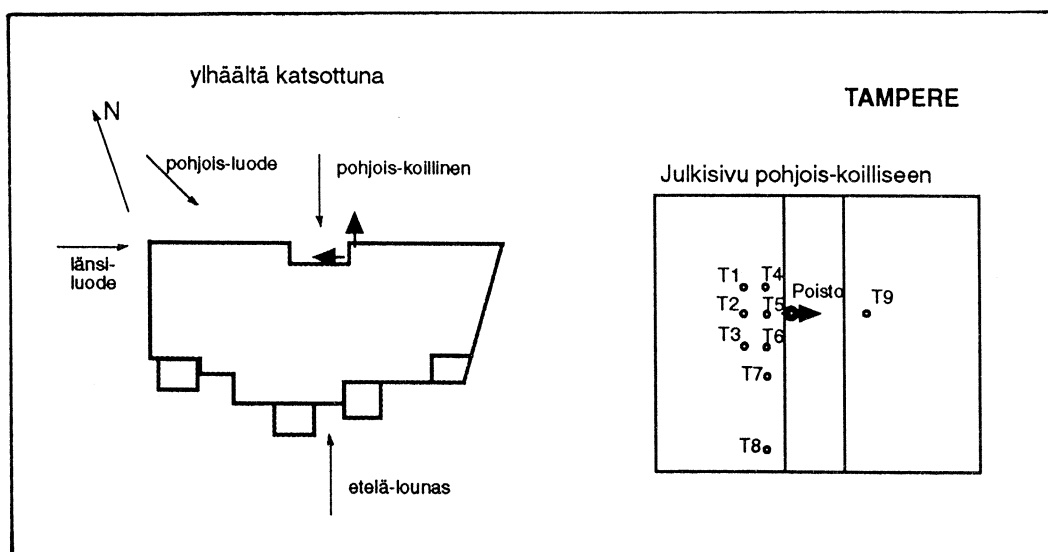
Etelätuulella rakennuksen päädyssä oleva poisto jää rakennuksen vanaveteen, joka on hyvin pyörteistä. Tällöin päätyseinällä esiintyy pystysuuntaista virtausta lähinnä ylöspäin, jolloin jäteilma voi joutua yläpuolella olevien asuntojen ikkunoille. Päädyssä olevat poistot aiheuttavat ongelmia melkein kaikilla ilmansuunnilla, koska samassa nurkkauksessa sijaitsee viereisen asunnon ilman sisäänotto. Lännen ja koillisen välisillä tuulilla kyseiseen nurkkaukseen syntyy pyörteitä, jotka voivat aiheuttaa oikosulkuvirtauksen poistosta viereisiin sisäänottoihin. Vertailun vuoksi savua puhallettiin katolle ylhäältä ja sivulta (varsinaista kattopoistoreikää ei tässä vaiheessa ollut). Katolta poistettu ilma sekoittuu katolle syntyvään pyörteeseen ja edelleen vanaveteen. Tuulen ollessa kohtisuoraan rakennuksen seiniä kohti laimeneminen on todennäköisesti voimakasta eikä suojan puoleiselle seinälle joudu mainittavasti jäteilmaa. Tässä kohdin vallitsee selvä ero tasakattoisen ja harjakattoisen rakennuksen (aikaisemmin tutkittu laboratoriorakennus) välillä. Sen sijaan tuulen käydessä vinosti kohti julkisivua molemmissa kattotyypeissä syntyy suojan puolelle kartiomainen pyörre alkaen katon reunalta, jolloin virtaus huuhtelee enemmän suojanpuoleista sivua.

5.2.4 Koerakennusten merkkiainekokeet tuulitunnelissa

Tampere

Tampereen koerakennuskohteen mallilla merkkiainekokeita tehtiin neljällä tuulen suunnalla käyttäen kahta seinäpoistoa 4. kerroksessa, joista toinen suuntautui pääjulkisivun suuntaisesti julkisivussa olevaan syvennykseen ja toinen syvennyksen reunalta julkisivusta poispäin (kuva 55). Nopeussuhteet olivat seuraavat:

1. Poistonopeus 4,9 m/s Tuuli 1 m/s $M = 4,9$ syvennykseen
2. Poistonopeus 4,9 m/s Tuuli 4 m/s $M = 1,2$ syvennykseen
3. Poistonopeus 4,0 m/s Tuuli 4 m/s $M = 1,0$ ulospäin



Kuva 55. Tampereen koerakennuskohteen pienoismallilla tutkitut tuulensuunnat ja poistot sekä keräyspisteiden sijainti.

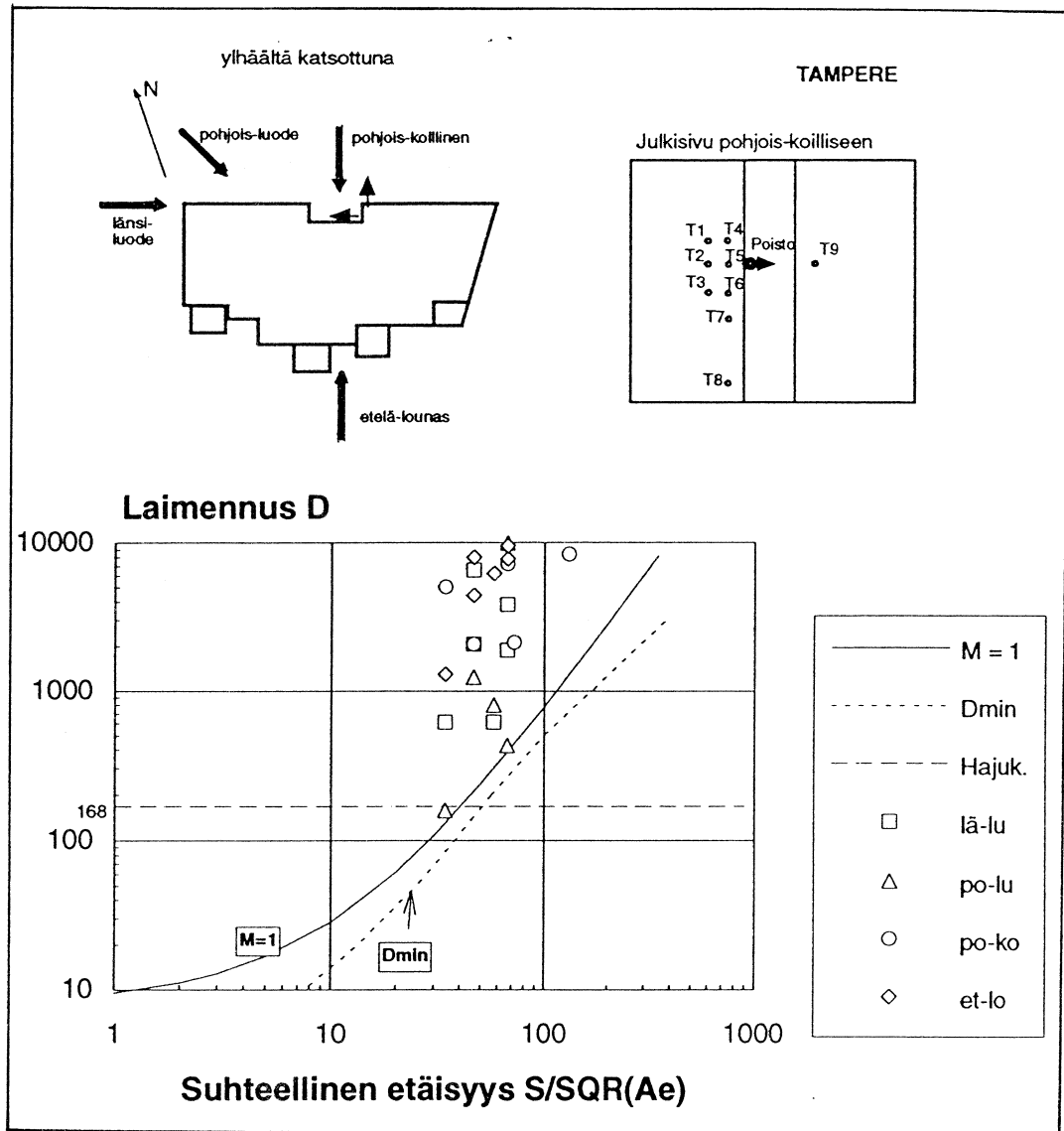
Tulokset on esitetty taulukossa 9 ja kuvissa 56 - 58. Mittausten mukaan pienimmät laimennussuhteet saatiin käytettäessä julkisivusta ulospäin suuntautuvaa poistoa (kuva 56). Tällöin verrattain suuria merkkiainepitoisuuksia mitattiin alavirran puolelta läheltä poistoaukkoa samalta korkeudelta kuin poisto julkisivun suuntaisella ja sivuvastaisella tuulella. Poistettaessa jäteilma rakennuksen julkisivussa olevaan syvennykseen laimennussuhteet pysyivät hyvin suurina kaikilla tuulen suunnilla; kaikissa tapauksissa > 500 ja vain kolmessa < 1 000 molemmilla tutkituilla nopeussuhteilla (kuva 57).

Taulukko 9. Merkkiainekokeissa määritetyt laimennussuhteet Tampereen koetalon pienoismallilla eri tuulensuunnilla ja poistoilla. Keräyspisteet ks. kuva 55. #-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

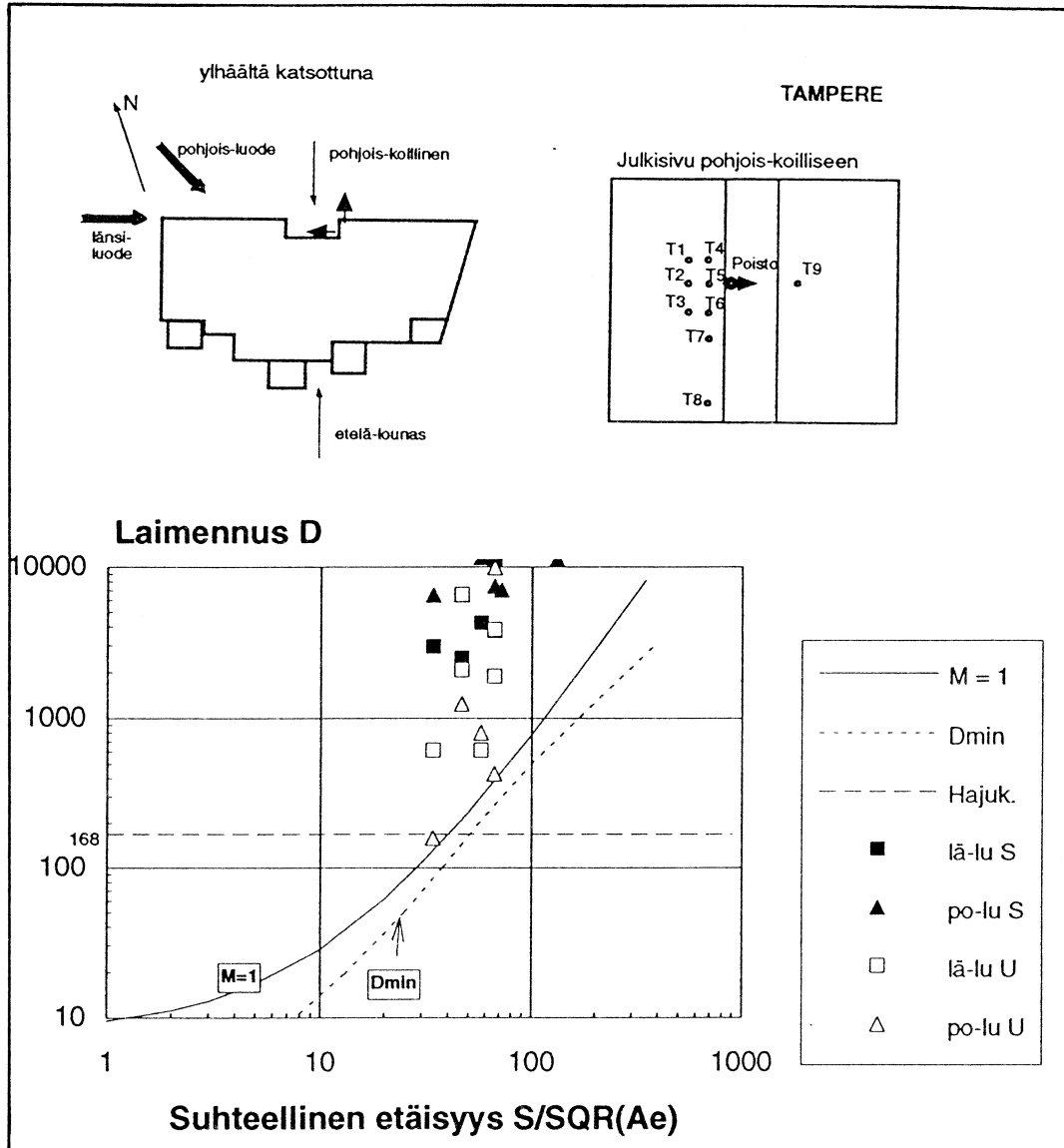
Laimennussuhde

Dimensioton etäisyys	74	65	74	46	34	46	72	131	90
tuuli länsi-luoteesta									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
M = 4,9 syv.	732	1246	3060	659	878	4335	9098	75162	7988
M = 1,2 syv.	3775	4243	11318	2493	2942	13619	52920	5437500	65169
M = 1,0 ulos	1875	611	3815	2062	611	6556	108267	1309677	141463
tuuli pohjois-luoteesta									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
M = 4,9 syv.	2374	1505	1523	1627	1013	2061	1746	2243	####
M = 1,2 syv.	28426	11670	7443	13636	6498	6577	7022	11259	####
M = 1,0 ulos	9980	803	431	21383	158	1240	15298	####	####
tuuli pohjois-koillisesta									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
M = 1,2 syv.	111431	25444	6799	50435	5098	3466	2668	3688	69964
M = 1,0 ulos	####	50847	7192	####	5068	2069	2121	8359	####
tuuli etelä-lounaasta									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
M = 1,2 syv.	5368	5192	6212	3135	2616	5571	6249	13325	18690
M = 1,0 ulos	7833	6224	9535	4454	1289	8035	20443	173913	152866

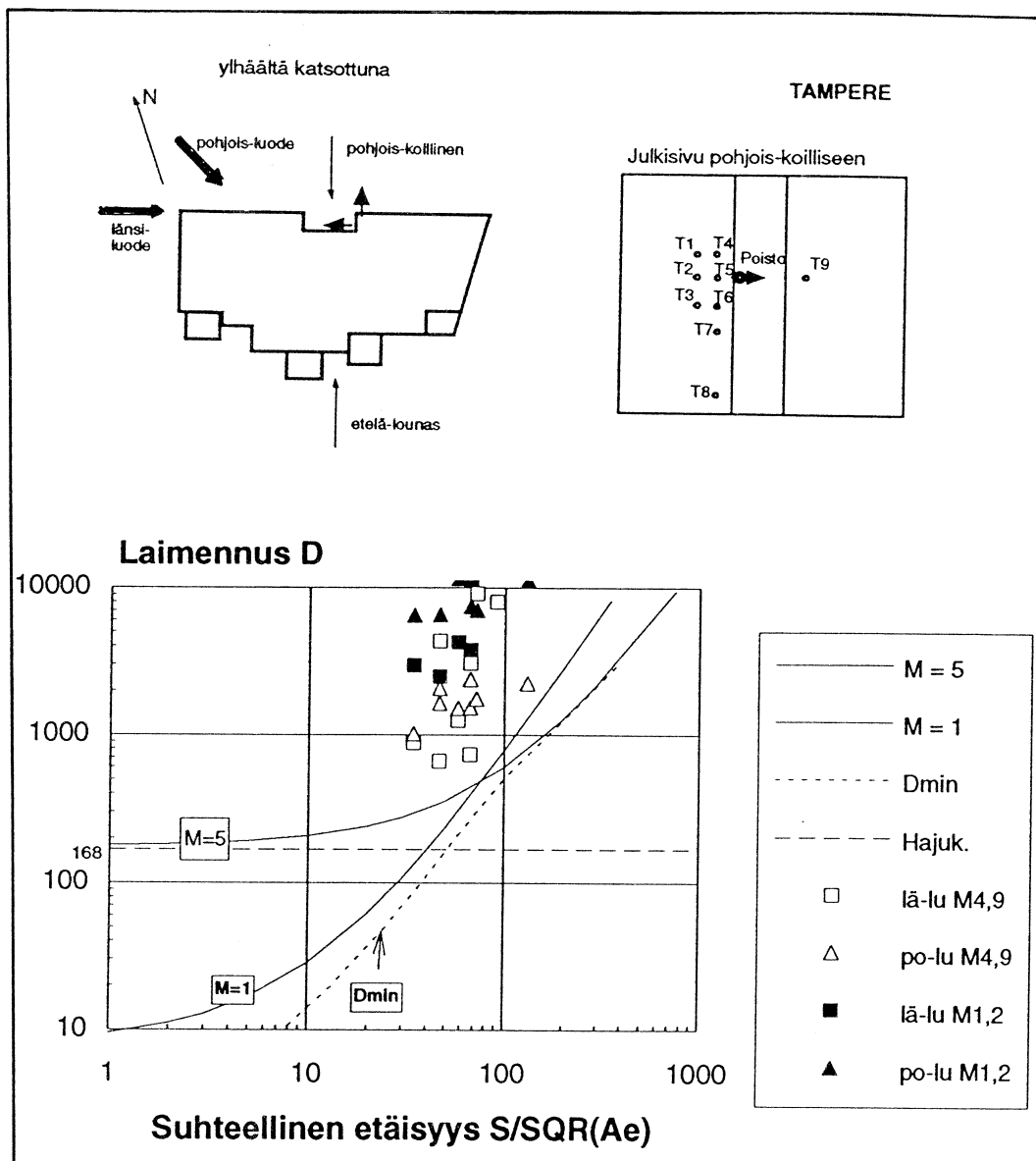
Laimennussuhde oli suurempi pienemmällä nopeussuhteella eli poistonopeuden ollessa samaa suuruusluokkaa tuulen nopeuden kanssa (kuva 58). Ilmeisesti suuremmalla poistonopeudella jäteilma osuu syvennyksen vastakkaiseen seinään ja leviää laajemmalle myös ulos syvennyksestä. Pienemmällä poistonopeudella syvennyksessä toimii hormina, jossa ilma liikkuu pääasiassa vertikaalisesti ylös tai alas. Tällöin jäteilma kulkeutuu joko katolle tai rakennuksen juurelle huomattavasti laimentuneena, jolloin siitä ei aiheudu haittaa eikä se joudu ilman sisäänottoihin.



Kuva 56. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Tampereen koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto julkisivusta ulospäin (kuva 55), käyrät Wilsonin mukaan 2 min:n keskiarvoina (ks. luku 4.1). Nopeussuhde $M = 1,0$.
 Tuulen suunnat: lä-lu = länsi-luode po-ko = pohjois-koillinen
 po-lu = pohjois-luode et-lo = etelä-lounas



Kuva 57. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Tampereen koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto syvennykseen S ($M = 1,2$) ja julkisivusta ulospäin U ($M = 1$). Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 56.



Kuva 58. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Tampereen koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto syvennykseen poiston ja tuulen nopeussuhteilla $M = 4,9$ ja $M = 1,2$. Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 56.

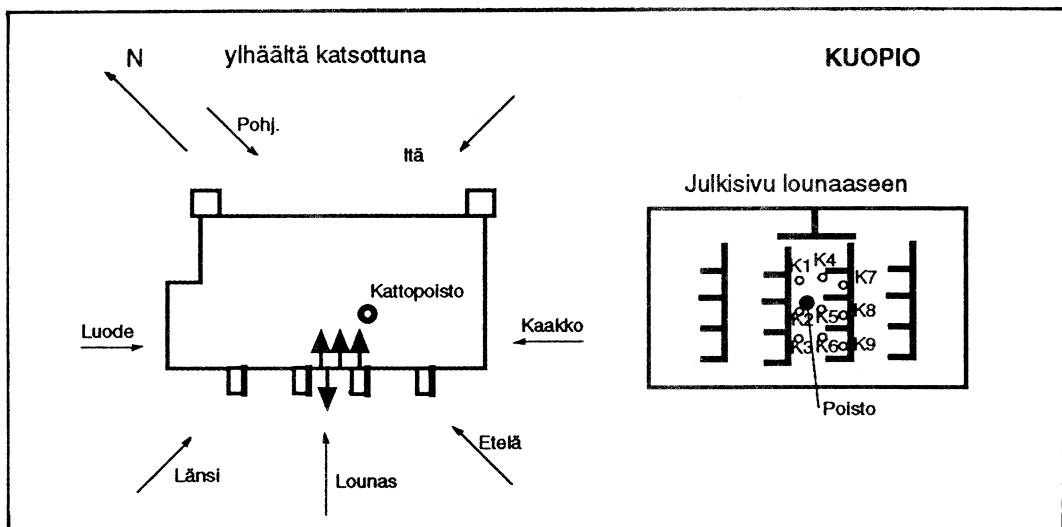
Julkisivua vastaan kohtisuoralla tuulella ja talon takaa tulevalla tuulella sekä syvennykseen poistaminen että julkisivusta ulospäin puhaltaminen toimivat hyvin; mitatut laimennussuhteet olivat 2 000:sta ylöspäin.

Kuopio

Merkkiainemittauksia tehtiin Kuopion koetalon pienoismallilla seitsemällä tuulen suunnalla käyttäen yhtä seinäpoistoa parvekejulkisivulla (Kuva 59). Kokeita tehtiin kolmessa eri tapauksessa:

1. poistonopeus 9,1 m/s tuulen nopeus 1 m/s $M = 9,1$
2. poistonopeus 9,1 m/s tuulen nopeus 4 m/s $M = 2,3$
3. poistonopeus 9,1 m/s tuulen nopeus 4 m/s $M = 2,3$ ilman parvekkeita

Merkkiainetta kerättiin yhdeksästä pisteestä poistopisteen ympäriltä kuten täysmittakaavakokeissakin. Syötössä merkkiainepitoisuus oli tilanteesta riippuen 100 - 2 500 ppm, jolloin saatiin sopiva erottelukyky keräyspisteissä. Eräissä tapauksissa laimeneminen vaihteli eri pisteissä niin paljon, että valitulla syötöllä jossakin pisteessä maksimi mitattavissa oleva pitoisuus ylitettiin. Näistä tilanteista tehtiin lisäkokeita minimilaimennuksen mittaamiseksi. Kaikkia tilanteita ei kuitenkaan ollut mahdollista tarkistaa, joten tilanteesta ilman parvekkeita näitä minimiarvoja ei saatu. Seinäpoiston lisäksi tehtiin kokeita yhdellä kattopoistolla kolmella tuulensuunnalla. Kattopoistoon käytettiin halkaisijaltaan 3 mm:n putkea, jonka yläpuolelle oli asennettu suoraan ylöspäin suuntautuvan virtauksen estävä suojalevy. Poistoputkessa nopeus oli sama kuin seinäpoistoissa (9,1 m/s).



Kuva 59. Kuopion koerakennuskohteen pienoismallilla tutkitut tuulensuunnat ja poistot sekä keräyspisteiden sijainti.

Tulokset on esitetty taulukoissa 10 ja 11 sekä kuvissa 60 - 64. Tuloksia tarkasteltaessa voidaan havaita merkkiainemittausten tuloksien korreloivan hyvin savukoikeissa tehtyjen havaintojen kanssa. Minimilaimennukseksi saatiin alle 168 vain kolmessa pisteessä niistä pisteistä, joissa se voitiin määrittää (7 tapauksessa 216:sta tiedetään vain, että laimennussuhde oli < 472). Laimennussuhde < 500 saatiin n. 15 %:ssa kaikista tutkituista tapauksista.

Ilman parvekkeita minimilaimennus saatiin lähimmässä pisteessä poiston alavirran puolella lukuun ottamatta luoteistuulta, jossa minimilaimennus saatiin poiston vieressä ylävirran puolella. Tämä epäloogiselta vaikuttava tulos voi selittyä rakennusta ympäröivässä rajakerroksessa esiintyvistä pyörteistä imu- ja poistoaukon sijaitessa hyvin lähellä toisiaan. Muuten tulokset ovat hyvin ennustettavissa; jäteilma kulkeutui tuulen mukana alavirtaan, mikä näkyi parhaiten

julkisivun suuntaisilla ja sivuvastaisilla tuulilla. Julkisivua vastaan kohtisuoralla tuulella virtaus suuntautui poistopisteestä alaspäin ja talon takaa tulevilla tuulilla jättöpyörteen mukana ylöspäin.

Taulukko 10. Merkkiainekokeissa määritetyt laimennussuhteet Kuopion koetalon pienoismallilla eri tuulensuunnilla ja poistoilla. Keräyspisteet ks. kuva 59, EP = ilman parvekerakennelmaa lounaisjulkisivulla,

*1 = tuulikulmaa muutettu n. 2 astetta

*2 = ympäröivien rakennusten sijaintia muutettu hieman

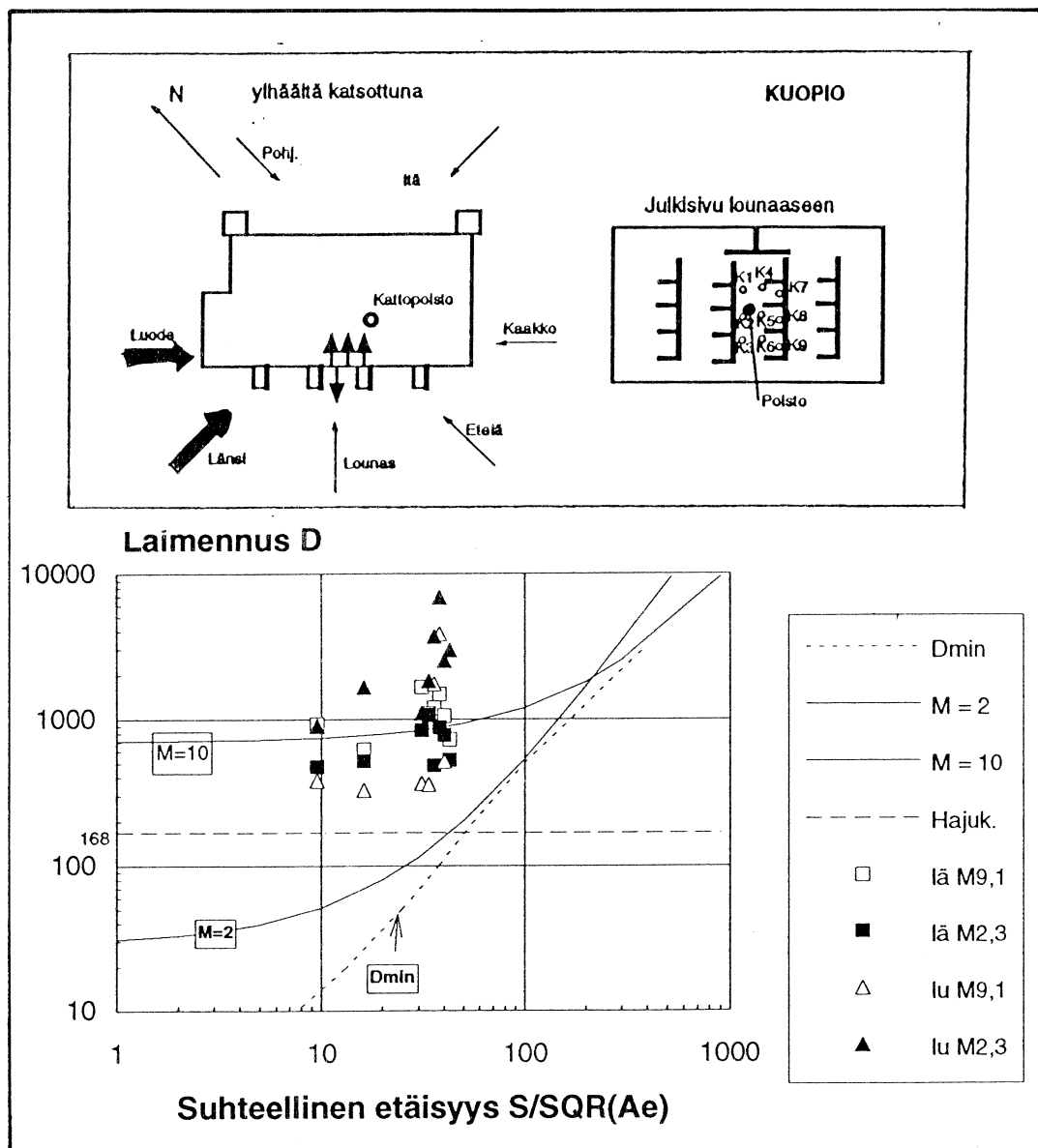
Toisto = edellisen rivin kokeen toisto

#-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

Laimennussuhde

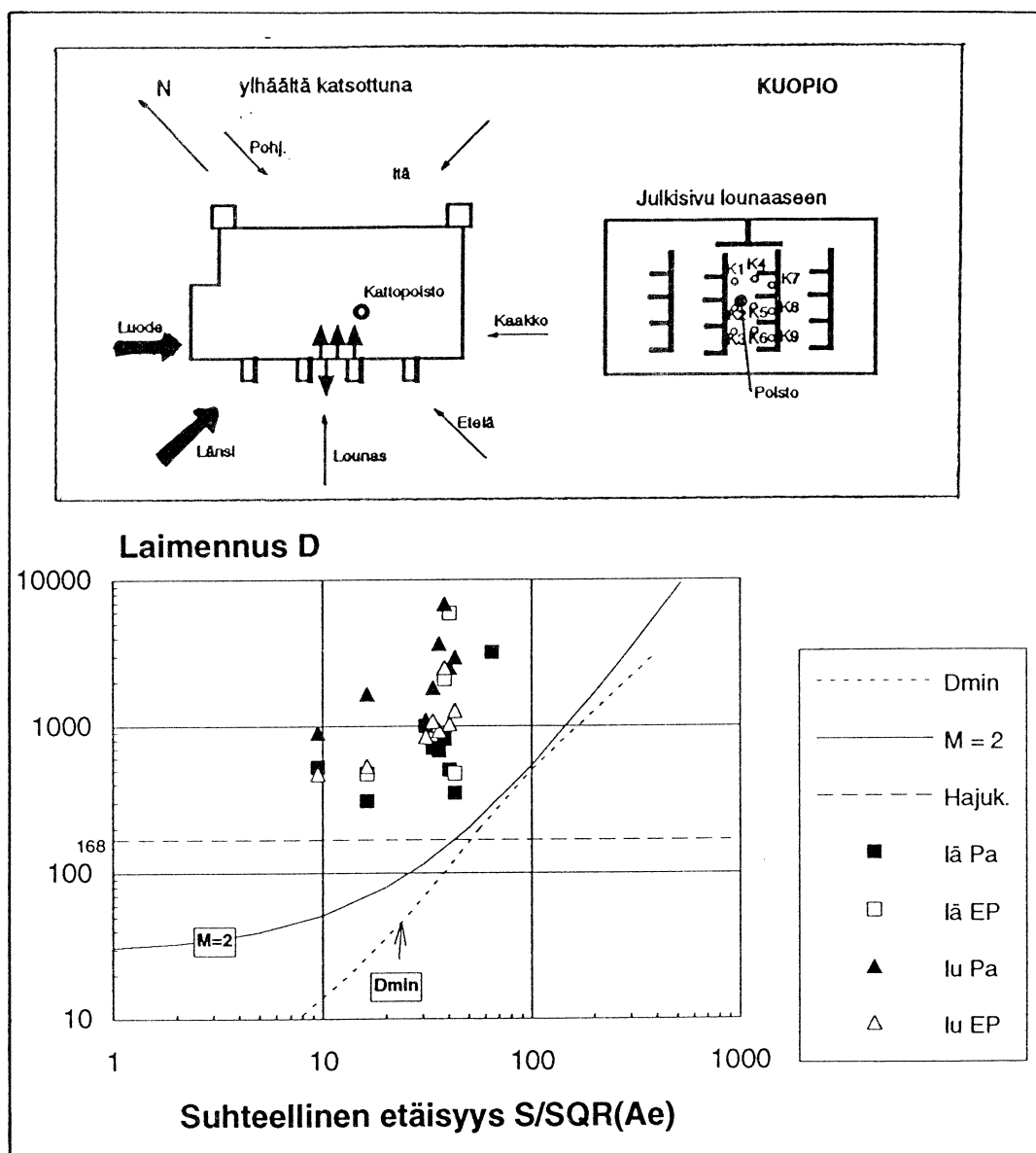
Dimensioton etäisyys	31	9	36	34	16	38	40	43	65
pohjoistuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	137	1277	7003	496	4416	9270	1386	6086	49401
M = 2,3	535	7972	8705	472	6920	10089	771	7469	36943
M =2,3 EP	774	10473	13079	14350	14920	21084	15882	15741	42647
itätuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	1563	4545	8333	248	1119	###	215	2459	###
M = 2,3	2113	8333	###	2459	8824	###	4286	###	###
M =2,3 EP	7843	28393	30541	472	3935	21894	472	17801	35229
kaakkoistuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	519	230	1024	858	272	1369	449	323	9146
M = 2,3	2891	956	841	1215	472	630	472	472	17786
Toisto	176	302	2336	165	347	4487	256	506	21895
M =2,3 EP	30038	472	5662	133753	34505	29146	216271	127092	27921
etelätuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	5556	1875	560	###	2459	1364	7500	1351	8824
M = 2,3	4491	2016	864	2039	472	472	1052	472	15954
Toisto	487	343	549	632	460	785	951	535	4389
M =2,3 EP	183333	472	6617	134599	144018	38831	199375	319000	22680
lounaistuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	2174	393	761	6818	1786	1563	###	4545	###
M = 2,3	6265	607	472	6347	1415	648	12849	3270	131519
M =2,3 EP	67863	472	532	58546	2631	1324	64065	3559	34996
länsituuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	1655	921	1184	1083	621	1480	1047	723	14194
M = 2,3	840	472	480	1054	514	879	773	523	18977
Toisto	995	526	678	707	309	811	503	349	3184
*1	1227	603	712	835	338	738	642	341	2473
*2	843	481	629	643	302	772	475	368	2813
M =2,3 EP	411613	38503	24342	79950	472	2089	5913	472	18265
toisto	###	###	###	###	15622	24202	38478	5602	38972
luoteistuuli									
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
M =9,1	365	381	1743	359	327	3832	515	###	###
M = 2,3	1095	898	3659	1807	1648	6818	2500	2941	###
M =2,3 EP	844	472	929	1076	533	2497	1035	1269	24491

Parvekkeiden kanssa tehtiin mittaukset kahdella nopeussuhteella $M = 9,1$ ja $M = 2,3$. Nopeussuhdetta muutettiin tuulen nopeutta lisäämällä pitäen poistonopeus vakiona $9,1$ m/s. Nopeussuhteen vaikutus laimenemiseen oli erilainen eri tuulensuunnilla (kuva 60). Vain sivuvastaisilla tuulilla tuulen nopeutta huomattavasti suuremmasta poistonopeudesta oli selvä hyöty. Julkisivun suuntaisilla tuulilla tilanne oli lähes päinvastainen. Suuri tuulen nopeus lisää parvekkeiden välisten syvennyksien huuhtelua, jolloin laimenemista pääsee tapahtumaan. Toisaalta käytetty poistonopeus ei ole riittävä poistamaan jäteilmaa kokonaan parvekkeiden välistä ja rakennusta ympäröivästä häiriökentästä. Julkisivua vastaan kohtisuoralla tuulella ja talon takaa tulevilla tuulilla laimeneminen riippuu enemmän imupisteen sijainnista eikä nopeussuhteella ole selvää vaikutusta.



Kuva 60. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Kuopion koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto lounaisjulkisivulta poiston ja tuulen nopeussuhteilla $M = 9,1$ ja $M = 2,3$. Käyrät Wilsonin mukaan (ks. luku 4.1). Tuulen suunnat: lä = länsi, lu = luode. Parvekkeet paikalla.

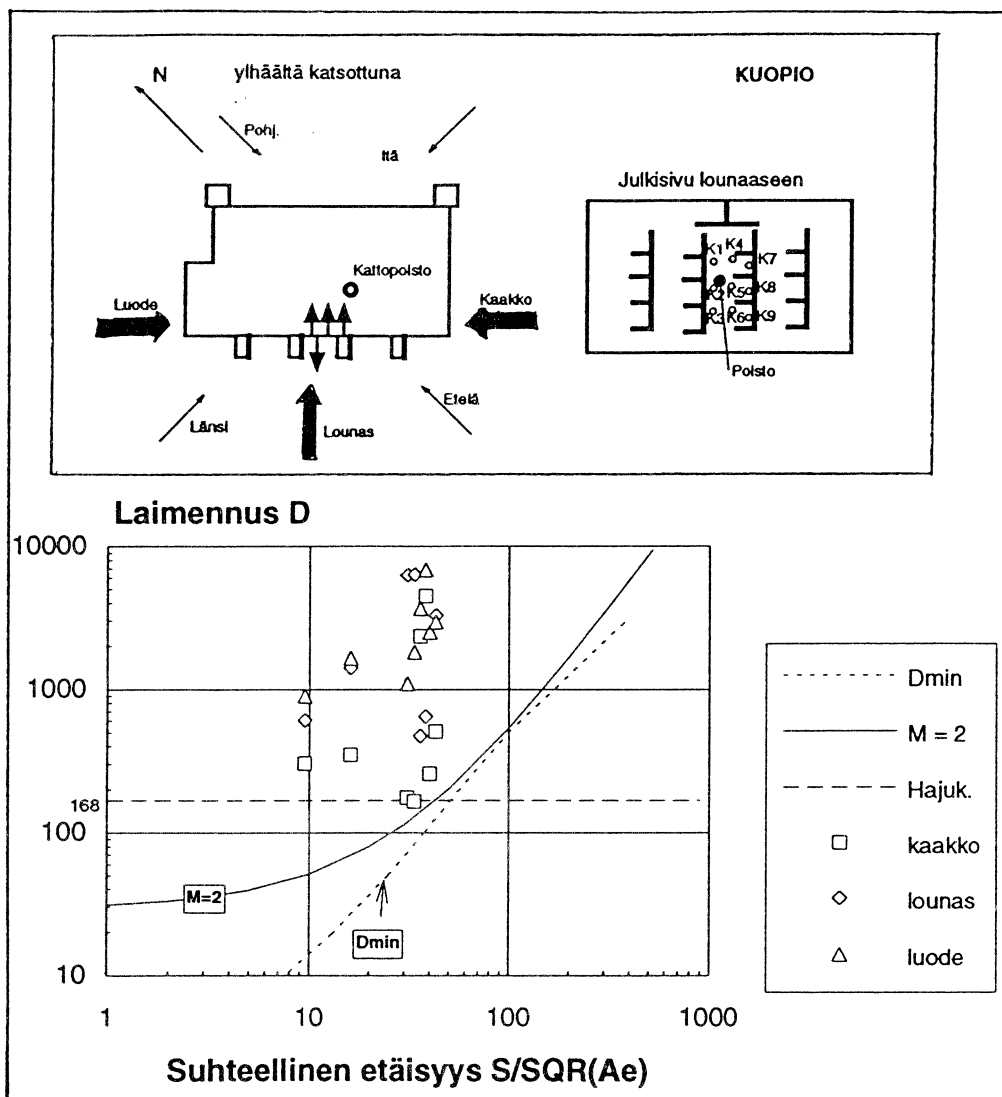
Useimmissa tapauksissa parvekerakennelma huononsi laimenemista synnyttäen parvekkeiden väliin seisovia pyörteitä, joista jäteilma ei huuhtoudu kovin nopeasti (kuva 61). Vain luoteis- ja itätuulilla tulokset olivat huonompia ilman parvekkeita kuin niiden kanssa. Kuopion tapauksessa kaikki pisteet olivat melko lähellä poistoa, joten etäisyyslaimeneminen ei tule selvästi esiin. Pisteessä K9, joka oli kauimpana poistosta, oli laimeneminen kuitenkin voimakkainta. Muuten leviämisseunnat olivat samansuuntaisia kuin ilman parvekkeita kuitenkin siten, että sekoittuminen ja vaihtelut olivat suurempia.



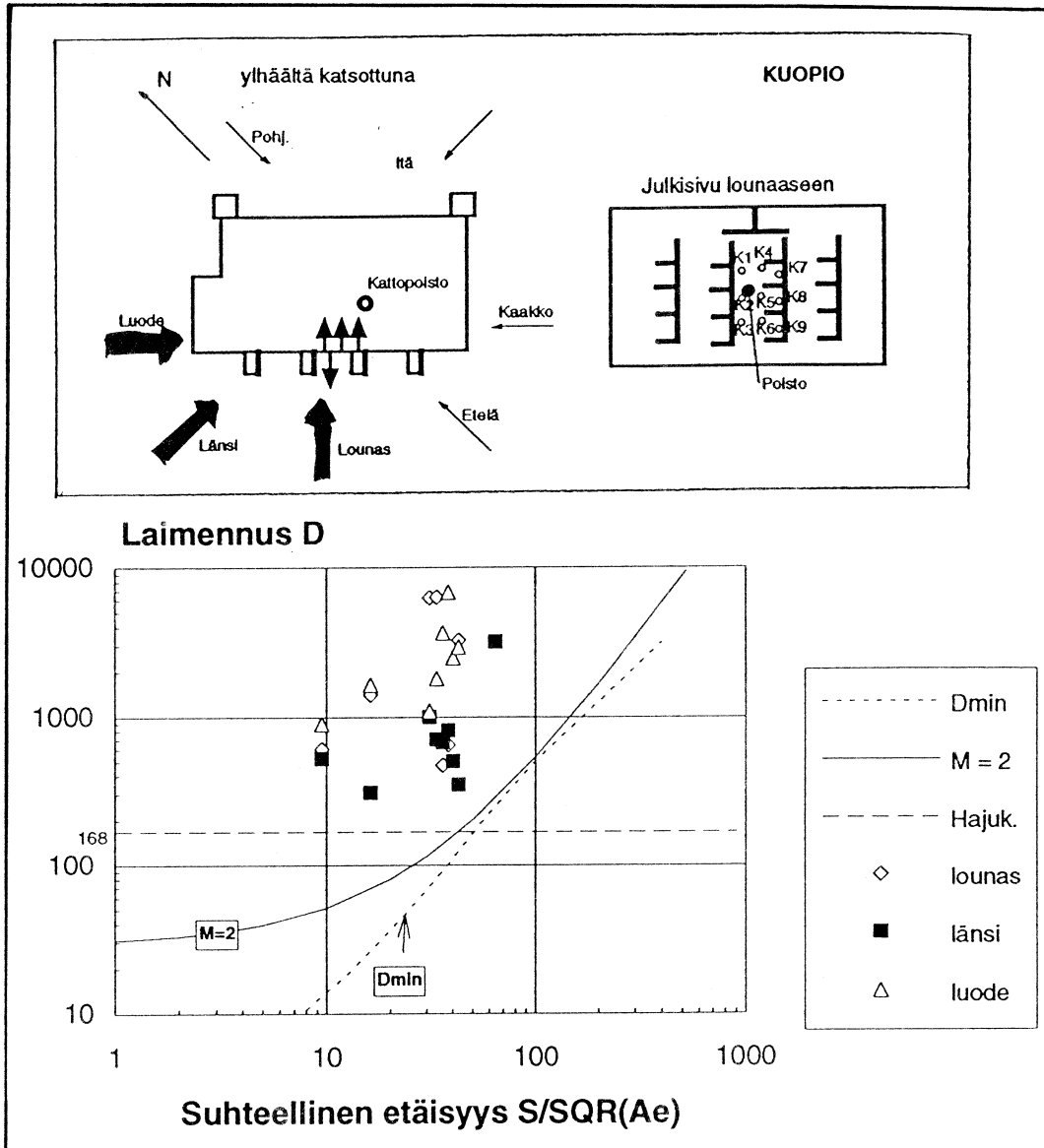
Kuva 61. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Kuopion koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto lounaisjulkisivulta ($M = 2,3$) parvekkeiden kanssa (Pa) ja ilman (EP). Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 60.

Korkeussuunnassa poistopisteen kanssa samalla tasolla olevissa pisteissä pieni laimennus oli yleisempi kuin ylä- tai alapuolella, koska päävirtaus on maan

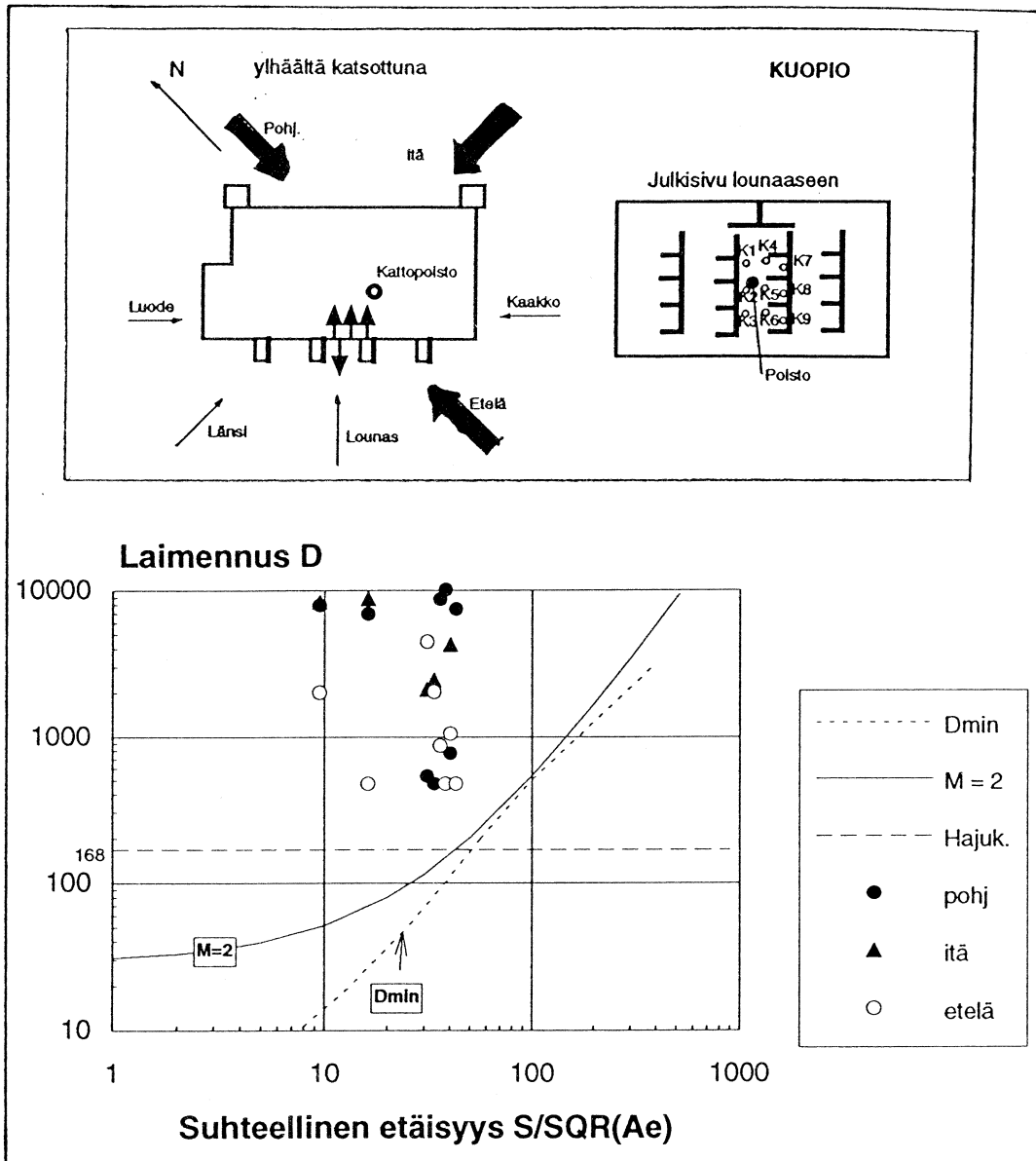
vaikutuksesta horisontaalista. Laimennussuhde oli enemmän riippuvainen tuulen suunnasta kuin keräys- ja poistopisteen välisestä etäisyydestä lukuun ottamatta aivan lähietäisyyttä (piste K2), jossa oli melkein kaikissa tilanteissa pieni laimennus, ja kauinta pistettä (K9), jossa taas oli kaikissa tapauksissa suuri laimennus. Tuulen suunnan vaikutusta havainnollistavat kuvat 62 - 64. Kuvasta 62 nähdään, että vähäisin laimennus saatiin julkisivun suuntaisella kaakkoistuulella, jolloin mittauspisteet ovat lähellä Wilsonin käyrää. Sen sijaan vastakkaisella luoteistuulella laimennus oli voimakasta samoin kuin julkisivua vastaan kohtisuoralla lounaistuulella. Tuulen kääntyessä lounaasta luoteeseen havaitaan pienin laimennus sivuvastaisella länsituulella (kuva 63). Talon takaa tulevilla tuulilla (kuva 64) laimennus vaihtelee huomattavasti eikä riipu niinkään poiston ja sisäänoton välisestä etäisyydestä. Etäisyyden vaikutusta tarkasteltaessa on otettava huomioon, että toiset pisteet sijaitsevat poistosta ylävirtaan ja toiset alavirtaan päin. Wilsonin kaavaan verrattaessa on tarkasteltava pahinta tilannetta.



Kuva 62. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Kuopion koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto lounaisjulkisivulta ($M = 2,3$) eri tuulen-suunnilla parvekkeet paikalla. Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 60.



Kuva 63. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Kuopion koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto lounaisjulkisivulta ($M = 2,3$) eri tuulensuunnilla parvekkeet paikalla. Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 60.



Kuva 64. Laimennussuhde dimensiottoman etäisyyden funktiona Kuopion koetalon tuulitunnelikokeissa. Poisto lounaisjulkisivulta ($M = 2,3$) eri tuulen-suunnilla parvekkeet paikalla. Käyrät ja tuulen suunnat kuten kuvassa 60.

Taulukko 11. Laimennussuhteet Kuopion koetalon pienoismallilla eri tuulen suunnilla käyttäen katto- tai seinäpoistoa.

Toisto = edellisen rivin kokeen toisto

EP = ilman parvekkeita

#-merkki tarkoittaa laimennussuhdetta > 100 000.

Laimennussuhde

koillistuuli Kattopoisto	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	
	M = 2,3	72061	104229	109443	77657	104105	69252	75905	106093	59768
Toisto	54113	112581	120154	60748	110429	194030	62729	111721	52008	
M = 2,3 EP	70009	99341	122602	72780	101344	38216	73062	109593	70665	
M = 9,1 EP	23118	26789	28411	22135	26090	43059	20602	25452	47769	
itätuuli Kattopoisto	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	
	M = 2,3	37189	44431	45753	35178	44046	39899	40491	44736	54191
M = 2,3 EP	34932	47589	53004	40000	47468	32808	41322	46325	67265	
M = 9,1 EP	3965	7090	7164	4252	7405	10945	4835	7410	15702	
Seinäpoisto	M = 2,3	2113	8333	###	2459	8824	###	4286	###	###
	M = 9,1	1563	4545	8333	248	1119	###	215	2459	###
	M = 2,3 EP	7843	28393	30541	472	3935	21894	472	17801	35229

Vertailun vuoksi tehtiin mittaukset kahdella tuulen suunnalla myös käyttäen kattopoistoa ja samoja imupisteitä seinällä (Taulukko 11). Kattopoistolla laimeneminen oli yleensä selvästi voimakkaampaa kuin seinäpoistoilla. Vain ilman parvekkeita itätuulella tulokset olivat samaa suuruusluokkaa, mutta tällöinkin laimennussuhde oli hyvin suuri. Kattopoistokokeiden tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon, että poistomäärä ei vastannut koko talon poistoa ja lisäksi imupisteet sijaitsivat melko kaukana poistosta eivätkä välttämättä kriittisimmällä alueella.

5.2.5 Johtopäätökset koerakentamiskohteidentuulitunnelikokeista

Laboratoriorakennuksen tuulitunnelikokeet osoittivat, että Wilsonin & Chuin kaava antaa lähietäisyyksillä pienemmän laimennuksen kuin, mitä mittauksissa saatiin, mutta laimeneminen ei lisääntynyt etäisyyden funktiona kaavan mukaan. Koerakentamiskohteiden malleilla saatiin samanlaisia tuloksia. Dimensiottomalla etäisyydellä n. 100 mittaustulokset olivat likimain kaavan antamalla tasolla. Suurempia etäisyyksiä taas oli tuulitunnelikokeissa vähän, joten kaavan pätevyyttä suurilla etäisyyksillä ei voi arvioida tuulitunnelikokeiden perusteella.

Koerakentamiskohteissa tutkittiin poiston ja tuulen nopeussuhteita 1 - 9. Laimeneminen ei lisääntynyt nopeussuhteen kasvaessa Wilsonin & Chuin kaavan mukaan, vaan oli lähes riippumaton nopeussuhteesta. Koska kaava antoi useimmissa tapauksissa varmallalla puolella olevia tuloksia minimilaimennukselle

verrattuna tuulitunnelikokeisiin, voidaan sitä käyttää lähtökohtana määrittäessä laskennallista arvoa minimilaimennukselle.

Koetuloksia verrattiin myös Wilsonin esittämiin kattopoistoa koskeviin tuulitunnelikokeiden tuloksiin (Wilson 1976). Seinäpoistoja käytettäessä laimennus samalla seinällä on erityisesti julkisivun suuntaisilla tuulilla samankaltaista kuin laimeneminen Wilsonin kokeissa katolla. Myös kattopoistoa käytettäessä tulokset seinällä korreloivat kohtalaisesti Wilsonin tuloksiin takaseinällä, joskin vaihtelu on suurta erilaisista rakennustyypeistä johtuen. Esim. laboratoriorakennuksen kattopoistokokeet johtivat suojanpuoleisella seinällä vähäiseen laimenemiseen ($D < 1\ 000$) ja Kuopion koerakennuksen kokeet suureen laimenemiseen ($D > 4\ 000$). Wilsonin tulokset sijoittuvat pääosin tälle välille ($1\ 000 < D < 10\ 000$). Tässä tulee esiin rakennuksen mittasuhteiden ja kattomuodon huomattava vaikutus laimenemiseen kattopoistolla.

Kattopoiston etäisyys seinällä olevaan sisäänottopisteeseen on yleensä suurempi kuin seinäpoistoista, jolloin etäisyyslaimenemista ehtii tapahtua. Lisäksi pahimmassa tapauksessa eli suojanpuoleisella seinällä virtaus on rakennuksen jättöpyörrettä, jossa sekoittuminen on voimakasta. Toisaalta on muistettava, että kattopoistosta tulee yleensä kaikki talon jäteilma, jolloin sieltä voi tulla seinällekin hetkellisesti suuria jäteilmapitoisuuksia.

Tuulitunnelikokeet osoittivat, että laimennus oli myös seinäpoiston yhteydessä niin voimakasta, että hajukynnys alitettiin vain muutamassa tapauksessa. 85 %:ssa tapauksista laimennussuhde oli > 500 .

Tampereen kohteen kokeet osoittivat, että poistamalla jäteilma rakennuksen seinässä olevaan syvennykseen voidaan estää jäteilman kulkeutuminen seinillä oleviin sisäänottoihin lähes kokonaan. Kuopion kohde taas paljasti, että seinäpoistoja käytettäessä niiden paikka on tarkoin harkittava, jotta parvekkeet tai muut arkkitehtoniset ratkaisut eivät aiheuta jäteilman joutumista takaisin rakennukseen.

5.3 TULOILMAN PUHTAUDEN PYSYVYYS

5.3.1 Tavoite

Pysyvyystarkastelun tavoitteena oli ennustaa, kuinka usein vuoden aikana asunnosta ulkoseinän läpi ulos puhallettavaa jäteilmaa mahdollisesti kulkeutuu ulkoilman sisäänottoaukkoihin ja kuinka paljon ilma on siihen mennessä laimentunut eli kuinka usein ulkoilman haju mahdollisesti ylittää tavoitetason.

5.3.2 Laskentaperiaate

Laskennassa oletetaan, että laimenemisen arviointiin voidaan soveltaa Wilsonin ja Chuin kaavaa (ks. luku 2.). Sillä voidaan laskea jäteilman teoreettinen minimilaimennus ulkoseinällä halutulla etäisyydellä ulospuhallusaukosta, kun tuulen nopeus, jäteilman ulospuhallusnopeus ja puhallusaukon pinta-ala tiedetään. Minimilaimennus vastaa jäteilman maksimipitoisuutta ulkoilmassa eli huonointa

tilannetta. Se esiintyy tuulen suunnasta ja nopeudesta riippuen yleensä melko pienellä alueella seinäpinnalla.

Tuulitunnelissa mitattiin merkkiaineella koekohteiden jäteilmän laimenumista eri tuulen suunnilla ja nopeuksilla. Merkkiainetta puhallettiin yhdestä pisteestä ja merkkiaineen pitoisuuksia mitattiin yhdeksästä pisteestä puhallusaukon ympäriltä vastaten 0,8 - 11,6 m etäisyyttä täysmittakaavassa. Näiden mittaustulosten perusteella laskettiin laimennuskertoimia, joilla teoreettisesta minimilaimennuksesta voitiin laskea paikallinen laimennus kyseisissä pisteissä. Kertoimien avulla tuulitunnelikokeiden tuloksia voitiin soveltaa myös muille tuulen nopeuksille ja puhallusnopeuksille kuin tuulitunnelikokeissa oli käytetty.

Paikkakunnan pitkäaikaisista tuulitilastoista /13/ saatiin eri tuuliolosuhteiden esiintymistiheydet vuoden aikana. Tuulitilastosta valittiin 1 000 kertaa tilastollisella esiintymistodennäköisyydellä satunnaisesti tuulen suunta-nopeusyhdistelmiä, joita vastaavat laimennukset laskettiin. Kun nämä 1 000 laimennusarvoa järjestettiin suuruusjärjestykseen, saatiin laimennuksen pysyvyyskäyrä. Siitä voitiin esimerkiksi määrittää, kuinka usein (% ajasta vuodessa) laimennus alittaa asetetun raja-arvon tarkastelupisteessä. Useamman jäteilmän ulospuhallusaukon vaikutuksia yhteen ulkoilma-aukkoon voidaan arvioida summaamalla esiintymisajat toisiinsa.

5.3.3 Laskennan lähtötiedot ja kaavat

Laimennuksen laskentaan tarvittiin lähtötietoina tuuli- ja puhallustiedot, tarkasteltavien pisteiden etäisyydet jäteilmänpuhallusaukosta ja tuulitunnelissa määritetyt laimennuskertoimet.

Laskennan lähtötiedot:

V_e	jäteilmän lähtönopeus ulospuhallusaukossa, m/s
A_e	jäteilma-aukon pinta-ala, m ²
S	jäteilma-aukon ja ulkoilma-aukon välinen etäisyys, m
U_H	tuulen nopeustiedot pitkäaikaisista tilastoista ko. paikkakunnilta, m/s
M	nopeussuhde, $M = V_e/U_H$
WD	tuulen suuntatiedot pitkäaikaisista tilastoista ko. paikkakunnilta, °
$DC_1(WD)$	M -arvoa M_1 vastaava jäteilmän laimennuserroin eri tuulensuunnilla (määritetty tuulitunnelissa tehtyjen merkkiainekokeiden perusteella), $DC = \log(D_{wt})/\log(D_{min,o})$ eli mitatun laimennuksen keskiarvon ja teoreettisen minimilaimennuksen ($D_{min,o}$ kaavassa 1) logaritmien suhde
$DC_2(WD)$	M -arvoa M_2 vastaavat jäteilmän laimennuskertoimet eri tuulensuunnilla

M_1	tuulitunnelissa käytetty nopeussuhde (suurempi suhde)
M_2	tuulitunnelissa käytetty nopeussuhde (pienempi suhde)
D_{wt}	keskimääräinen laimennus ko. tuuliolosuhteissa (tuulitunnelikokeissa mitattu).

Tarkastelussa oletetaan, että laimennuksen laskentaan voidaan käyttää Wilsonin ja Chuin kaavaa myös niissä pisteissä, joissa laimeneminen on minimilaimennusta suurempaa. Jos esimerkiksi tuulen nopeus pienenee niin, että tarkasteltavassa pisteessä teoreettinen minimilaimennus kasvaa kaksinkertaiseksi, niin myös laskennallinen laimennus kasvaa kaksinkertaiseksi. Laskennallinen laimennus voi siis olla minimilaimennuksen suuruinen (tai esimerkiksi) 1 000-kertainen pisteen sijainnin ja tuuliolosuhteiden mukaan.

Laimennus D lasketaan minimilaimennuksesta $D_{min,o}$ ja laimennuskertoimista $DC_1(WD)$ ja $DC_2(WD)$. Tuulitunnelikokeita vastaava mittausaika T_a oli 10 minuuttia. Jos laskennassa tuulennopeudesta riippuva M -arvo oli suurempi kuin tuulitunnelimittauksissa käytetty M_1 -arvo, laskennassa käytettiin M_1 -arvolla laskettua kerrointa. Jos laskennassa M -arvo oli pienempi kuin tuulitunnelimittauksissa käytetty M_2 -arvo, käytettiin M_2 -arvolla laskettua kerrointa. Jos M -arvo oli M_1 - ja M_2 -arvojen välissä, laskennassa käytettiin tältä väliltä lineaarisesti interpoloitua kerrointa. Jos laimennuskertoimia oli mitattu vain yhdellä M -arvolla, näitä kertoimia käytettiin kaikilla M -arvoilla.

$$\text{Jos } M > M_1, \text{ niin } \log(D) = \log(D_{min,o}) + DC_1(WD) \quad (8)$$

$$\text{Jos } M < M_2, \text{ niin } \log(D) = \log(D_{min,o}) + DC_2(WD) \quad (9)$$

Jos $M_2 < M < M_1$, niin

$$\log(D) = \log(D_{min,o}) + (M - M_2)(DC_1(WD) - DC_2(WD)) / (M_1 - M_2) + DC_2(WD) \quad (10)$$

$$D = 10^{\log(D)} \quad (11)$$

Taulukossa 12 on Tampereen ja taulukossa 13 Kuopion koekohteen laskennan lähtötietona käytetty tuulen nopeus- ja suuntajakauma /13/. Laskelmissa käytettiin tuulitilaston tapaa, jossa pääilmansuuntien välissä on kaksi väli-ilmansuuntaa eli tuulisektoreita oli yhteensä 12. Taulukoissa 14 ja 15 ovat kohteiden tuulitunnelissa mitatut laimennukset, joita käytettiin laskelmien lähtötietojen määrittämisessä. Taulukoissa 16 ja 17 ovat laskelmissa käytetyt puhallustiedot ja laimennuskertoimet eri tuulen suunnille. Laimennuskertoimen arvo 1 vastaa teoreettista minimilaimennusta. Jos laimennuskerroin on alle yhden, mitattu laimennus on ollut teoreettista minimilaimennusta pienempi. Jos laimennuskerroin on yli yhden, mitattu laimennus on ollut teoreettista minimilaimennusta suurempi

eli mittauspiste ei sijaitse laimenemisen kannalta huonoimmassa paikassa seinällä tai laimeneminen on ollut voimakkaampaa kuin teoria ennustaa.

Tampereen koekohteesta oli mitattu neljä ilmansuuntaa. Tuulisektoreille 1 ja 12 käytettiin tuulensuunnalla $337,5^\circ$ mitattuja arvoja, sektorille 2 tuulensuunnan $22,5^\circ$ arvoja, sektoreille 8 ja 9 tuulensuunnan $202,5^\circ$ arvoja ja sektoreille 10 ja 11 tuulensuunnan $292,5^\circ$ arvoja. Muille tuulensuunnille laimennus oletettiin savuhauintojen perusteella "äärettömäksi" ($D = 1\,500\,000$) kaikissa pisteissä.

Kuopion koekohteesta oli mitattu seitsemän ilmansuuntaa. Pääilmansuunnille (1, 4, 7 ja 10) käytettiin niillä mitatuista laimennuksista laskettuja kertoimia. Puuttuvien väli-ilmansuuntien laimennuskertoimet interpoloitiin mitatuista ilmansuunnista lasketuista kertoimista. Tuulisektorien 2 ja 3 (taulukko 16) kertoimet interpoloitiin lineaarisesti tuulensuuntien 0° ja 90° väliltä (jako kolmeen osaan). Tuulisektorille 5 käytettiin tuulensuunnan 135° kertoimia, sektorille 8 tuulensuunnan 225° kertoimia ja sektorille 11 tuulensuunnan 315° kertoimia. Tuulisektorille 6 käytettiin tuulensuuntien 135° ja 180° kertoimien keskiarvoa, sektorille 9 tuulensuuntien 225° ja 270° keskiarvoa ja sektorille 12 tuulensuuntien 315° ja 0° keskiarvoa.

5.3.4 Tulokset

Yhteenvedo Tampereen koekohteen tuloksista on taulukoissa 18 ja 19. Laimennukset laskettiin kahdessa tilanteessa. Toisessa jäteilmaa puhallettiin rakennuksessa olevaan syvennykseen ja toisessa kohtisuoraan rakennuksen seinästä ulospäin. Kun jäteilma puhallettiin syvennykseen, raja-arvona ollut laimennus 168 ei alittunut missään pisteessä. Ulospäin puhallettaessa raja-arvo alittui vain lähimpänä jäteilma-aukkoa sijaitsevassa pisteessä, joka oli kolmen metrin etäisyydellä aukosta.

Yhteenvedo Kuopion koekohteen tuloksista on taulukoissa 20 ja 21. Laimennukset laskettiin sekä parvekkeiden kanssa että ilman niitä. Parvekkeiden kanssa raja-arvona ollut laimennus 168 alittui neljässä pisteessä, jotka olivat alle kolmen metrin etäisyydellä jäteilma-aukosta. Ilman parvekkeita raja-arvo alittui vain yhdessä pisteessä, joka oli alle metrin etäisyydellä jäteilma-aukosta.

Kuvissa 65 ja 66 on havainnollistettu tuloksia. Niistä esitetään huonoimpien pisteiden sijainnit jäteilma-aukkoon nähden. Kuvissa 67 ja 68 on esimerkkejä pysyvyyskäyristä. Niistä voidaan määrittää, kuinka usein (% ajasta vuodessa) laimennus alittaa halutun raja-arvon kyseisissä pisteissä. Tampereen pysyvyyskäyrästä nähdään, että laimeneminen on suuresti riippuvainen tuulen suunnasta. Huonoin tilanne esiintyy pohjoisenpuoleisilla tuulilla, joita esiintyy runsas 10 % ajasta. Koska tuulen suuntaa käsiteltiin sektoreittain, myös pysyvyyskäyrästä tuli tässä tapauksessa portaittainen.

Laskelmat ja mittaukset tuulitunnelissa tehtiin puhaltamalla jäteilmaa yhdestä pisteestä ulos ja mittaamalla laimennukset useasta pisteestä. Symmetrian avulla tiettyjä pisteitä voidaan kuitenkin siirtää niin, että voidaan tarkastella usean

poiston vaikutuksia yhteen pisteeseen (ulkoilman sisäänottoaukkoon). Esimerkiksi Kuopion koekohteessa päällekkäin olevat pisteet K1, K2 ja K3 sekä K4, K5 ja K6 ovat sellaisia. Siirtämällä piste K1 pisteen K2 päälle ja piste K3 pisteen K2 päälle niin, että myös pisteitä K1 ja K3 vastaava jäteilma-aukko siirtyy, saadaan kuvaksi yksi ulkoilman sisäänottoaukko ja kolme jäteilma-aukkoa. Jos oletetaan, että vain yhdestä jäteilma-aukosta kerrallaan kulkeutuu jäteilmaa tarkasteltavaan ulkoilma-aukkoon, alle 168:n laimennuksien esiintymisaika on kaikkien kolmen pisteen vastaavien esiintymisaikojen summa. Lasketuissa tapauksissa samanaikaisuutta esiintyi niin, että todellinen esiintymisaika oli 15 - 25 % pienempi kuin laskettu summa.

Taulukko 12. Tampereen lentoaseman tuulitilastot vuosilta 1961 - 1978 /13/.

ASEMA : TAMPERE LENTOASEMA STATION AIRPORT		JAKSO : 1961- 1978 PERIOD											VUOSI YEAR		
		TUULEN NOPEUS (M/S)											WIND SPEED (M/S)		
		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	>20	SUMMA SUM	HAV. OBS.
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20				
T W	350 10	-	2.48	3.04	1.22	0.21	0.02	-	-	-	-	-	-	6.96	1831
U I	20 40	-	1.65	1.91	0.65	0.08	0.02	-	-	-	-	-	-	4.31	1133
U N	50 70	-	2.53	2.49	0.90	0.13	0.00	-	-	-	-	-	-	6.05	1590
L D	80 100	-	2.02	2.93	1.16	0.25	0.02	-	-	-	-	-	-	6.38	1677
E	110 130	-	1.65	3.03	1.46	0.37	0.02	-	-	-	-	-	-	6.52	1715
N D	140 160	-	1.18	3.09	1.73	0.34	0.02	0.01	-	-	-	-	-	6.37	1675
I	170 190	-	3.11	5.13	3.48	1.09	0.17	0.01	-	-	-	-	-	12.99	3417
S R	200 220	-	3.24	3.94	3.12	1.30	0.27	0.04	-	-	-	-	-	11.92	3135
U E	230 250	-	2.47	3.26	2.53	1.02	0.22	0.03	0.00	-	-	-	-	9.52	2503
U C	260 280	-	1.81	3.14	2.06	0.79	0.09	0.03	0.00	-	-	-	-	7.92	2083
N T	290 310	-	1.56	2.25	1.23	0.40	0.05	0.01	0.00	-	-	-	-	5.50	1447
T I	320 340	-	1.91	2.12	0.89	0.20	0.00	-	-	-	-	-	-	5.12	1347
A O	0 0	10.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.43	2743
SUMMA/SUM(%)		10.43	25.60	36.32	20.41	6.19	0.90	0.13	0.01	-	-	-	-	100.00	26296
HAV./OBS.		2743	6733	9551	5368	1627	237	34	3	-	-	-	-	26296	

Taulukko 13. Kuopion lentoaseman tuulitilastot vuosilta 1961 - 1980 /13/.

ASEMA : KUOPIO LENTOASEMA STATION AIRPORT		JAKSO : 1961- 1980 PERIOD											VUOSI YEAR		
		TUULEN NOPEUS (M/S)											WIND SPEED (M/S)		
		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	>20	SUMMA SUM	HAV. OBS.
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20				
T W	350 10	-	1.49	2.02	1.19	0.52	0.12	0.02	0.00	-	-	-	-	5.37	1568
U I	20 40	-	0.91	1.57	0.86	0.28	0.05	0.01	-	-	-	-	-	3.68	1074
U N	50 70	-	1.03	1.73	1.09	0.33	0.04	0.00	-	-	-	-	-	4.22	1234
L D	80 100	-	1.61	2.53	1.43	0.49	0.10	0.01	-	-	-	-	-	6.16	1801
E	110 130	-	3.15	3.91	2.34	0.88	0.28	0.03	-	-	-	-	-	10.59	3093
N D	140 160	-	2.30	3.17	2.32	1.07	0.36	0.05	0.01	0.01	-	-	-	9.10	2717
I	170 190	-	2.34	4.65	3.78	1.17	0.25	0.03	-	-	-	-	-	11.69	3417
S R	200 220	-	2.03	3.23	2.00	0.48	0.03	0.01	-	-	-	-	-	7.78	2273
U E	230 250	-	3.98	4.47	2.18	0.53	0.12	0.02	0.01	-	-	-	-	11.31	3305
U C	260 280	-	2.92	3.04	1.58	0.57	0.12	0.05	0.01	0.00	-	-	-	8.29	2423
N T	290 310	0.00	3.17	3.01	1.00	0.27	0.04	-	-	-	-	-	-	7.49	2189
T I	320 340	-	2.97	4.39	1.81	0.44	0.08	-	-	-	-	-	-	9.69	2832
A O	0 0	4.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.43	1294
SUMMA/SUM(%)		4.43	27.89	37.72	21.08	7.03	1.57	0.24	0.03	0.01	-	-	-	100.00	29220
HAV./OBS.		1295	8149	11021	6161	2055	458	69	9	3	-	-	-	29220	

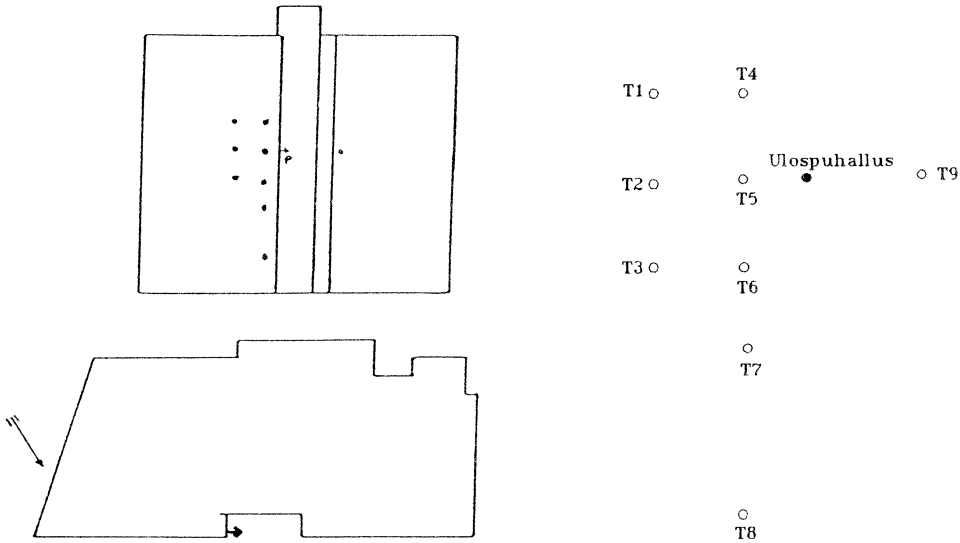
Taulukko 14. Tampereen koekohteen tuulitunnelissa mitatut laimennukset.

JÄTEILMA, TAMPERE							
Tuulitunnelikokeissa mitattu laimennus (D_w) puhallettaessa jäteilma syvennykseen ($M = 4,9$ ja 1,2) ja puhallettaessa ulospäin seinästä ($M = 1,0$).							
Piste	Etäisyys S, m	M	Wilsonin minimi- laimennus $D_{min,o}$	Tuulensuunta, °			
				22.5	202.5	292.5	337.5
T1	5.82	4.9	417			732	2374
	5.82	1.2	336	111431	5368	3775	28426
ulospäin	5.82	1.2	336	1500000	7833	1875	9980
T2	5.10	4.9	380			1246	1505
	5.10	1.2	271	25444	5192	4243	11670
ulospäin	5.10	1.2	271	50847	6224	611	803
T3	5.82	4.9	417			3060	1523
	5.82	1.2	336	6799	6212	11318	7443
ulospäin	5.82	1.2	336	7192	9535	3815	431
T4	4.10	4.9	332			659	1627
	4.10	1.2	193	50435	3135	2493	13636
ulospäin	4.10	1.0	193	1500000	4454	2062	21383
T5	3.00	4.9	283			878	1013
	3.00	1.2	122	5098	2616	2942	6498
ulospäin	3.00	1.0	122	5068	1289	611	158
T6	4.10	4.9	332			4335	2061
	4.10	1.2	193	3466	5571	13619	6577
ulospäin	4.10	1.0	193	2069	8035	6556	1240
T7	6.35	4.9	445			9098	1746
	6.35	1.2	388	2668	6249	52920	7022
ulospäin	6.35	1.0	388	2121	20443	108267	15298
T8	11.6	4.9	772			75162	2243
	11.6	1.2	1103	3688	13325	5800000	11259
ulospäin	11.6	1.0	1103	8359	173913	5800000	1500000
T9	8.00	4.9	538			7988	1500000
	8.00	1.2	573	69964	18690	65169	1500000
ulospäin	8.00	1.0	573	1500000	152866	141463	1500000

Taulukko 15. Kuopion koekohteen tuulitunnelissa mitatut laimennukset.

JÄTEILMA, KUOPIO										
Tuulitunnelikokeissa mitattu laimennus (D_w) parvekkeiden kanssa ($M = 9,1$ ja 2,3) ja ilman parvekkeita ($M = 2,3$)										
Piste	Etäisyys S, m	M	Wilsonin minimi- laimennus $D_{min,o}$	Tuulensuunta, °						
				0	90	135	180	225	270	315
K1	2,75	9,1	711	137	1563	519	5556	2174	1655	365
	2,75	2,3	127	535	2113	176	487	6265	995	1095
ei parv	2,75	2,3	127	774	7843	30038	183333	67863	411613	844
K2	0,84	9,1	619	1277	4545	230	1875	393	921	381
	0,84	2,3	60	7972	8333	302	343	607	526	898
ei parv	0,84	2,3	60	10473	28393	472	472	472	38503	472
K3	3,17	9,1	732	7003	8333	1024	560	761	1184	1743
	3,17	2,3	146	8705	50000	2336	549	472	678	3659
ei parv	3,17	2,3	146	13079	30541	5662	6617	532	24342	929
K4	2,97	9,1	722	496	248	858	10000	6818	1083	359
	2,97	2,3	137	472	2459	165	632	6347	707	1807
ei parv	2,97	2,3	137	14350	472	133753	134599	58546	79950	1076
K5	1,43	9,1	647	4416	1119	272	2459	1786	621	327
	1,43	2,3	78	6920	8824	347	460	1415	309	1648
ei parv	1,43	2,3	78	14920	3935	34505	144018	2631	15622	533
K6	3,37	9,1	743	9270	10714	1369	1364	1563	1480	3832
	3,37	2,3	155	10089	75000	4487	785	648	811	6818
ei parv	3,37	2,3	155	2184	21894	29146	38831	1324	24202	2497
K7	3,56	9,1	752	1386	215	449	7500	21429	1047	515
	3,56	2,3	164	771	4286	256	951	12849	503	2500
ei parv	3,56	2,3	164	15882	472	216271	199375	64065	38478	1035
K8	3,79	9,1	764	6086	2459	323	1351	4545	723	240000
	3,79	2,3	175	7469	37500	506	535	3270	349	2941
ei parv	3,79	2,3	175	15741	17801	127092	319000	3559	5602	1269
K9	5,72	9,1	867	49401	75000	9146	8824	18750	14194	240000
	5,72	2,3	283	36943	150000	21895	4389	131519	3184	150000
ei parv	5,72	2,3	283	42647	35229	27921	22680	34996	38972	24491

Taulukko 16. Tampereen koekohteen laskelmissa käytetyt lähtötiedot.

JÄTEILMA, TAMPERE		LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT	
Jäteilman lähtönopeus	- puhallussuunta syvennykseen	V_e	4,9 m/s
ulospuhallusaukossa	- puhallussuunta seinästä ulospäin		4,0 m/s
Jäteilma-aukon pinta-ala,		A_e	0,00785 m ²
<p>Jäteilman laimennuskertoimet (DC) eri tuulen suunnilla, $DC = \log(D_{wi})/\log(D_{min,o})$</p> 			
Piste	Etäisyys S, m	M	Tuulensuunta, °
			350 20 50 80 110 140 170 200 230 260 290 320
			10 40 70 100 130 160 190 220 250 280 310 340
			Tuulisektorin numero
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
T1	5,82	4,9	1,288 1,926 2,739 2,739 2,739 2,739 2,739 2,739 1,423 1,423 1,093 1,093 1,288
ulospäin	5,82	1,2	1,763 1,998 2,841 2,841 2,841 2,841 2,841 2,841 1,477 1,477 1,416 1,416 1,763
T2	5,10	4,9	1,231 1,707 2,781 2,781 2,781 2,781 2,781 2,781 1,440 1,440 1,200 1,200 1,231
ulospäin	5,10	1,2	1,672 1,811 2,949 2,949 2,949 2,949 2,949 2,949 1,527 1,527 1,491 1,491 1,672
T3	5,82	4,9	1,215 1,463 2,739 2,739 2,739 2,739 2,739 2,739 1,448 1,448 1,330 1,330 1,215
ulospäin	5,82	1,2	1,533 1,517 2,841 2,841 2,841 2,841 2,841 2,841 1,502 1,502 1,605 1,605 1,533
T4	4,10	4,9	1,274 1,865 2,846 2,846 2,846 2,846 2,846 2,846 1,387 1,387 1,118 1,118 1,274
ulospäin	4,10	1,0	1,809 2,058 3,140 3,140 3,140 3,140 3,140 3,140 1,530 1,530 1,486 1,486 1,809
T5	3,00	4,9	1,226 1,512 2,927 2,927 2,927 2,927 2,927 2,927 1,394 1,394 1,200 1,200 1,226
ulospäin	3,00	1,0	1,827 1,776 3,438 3,438 3,438 3,438 3,438 3,438 1,637 1,637 1,662 1,662 1,827
T6	4,10	4,9	1,314 1,404 2,846 2,846 2,846 2,846 2,846 2,846 1,486 1,486 1,442 1,442 1,314
ulospäin	4,10	1,0	1,671 1,549 3,140 3,140 3,140 3,140 3,140 3,140 1,639 1,639 1,809 1,809 1,671
T7	6,35	4,9	1,224 1,294 2,710 2,710 2,710 2,710 2,710 2,710 1,433 1,433 1,495 1,495 1,224
ulospäin	6,35	1,0	1,486 1,324 2,773 2,773 2,773 2,773 2,773 2,773 1,467 1,467 1,825 1,825 1,486
T8	11,6	4,9	1,160 1,235 2,485 2,485 2,485 2,485 2,485 2,485 1,428 1,428 1,689 1,689 1,160
ulospäin	11,6	1,0	1,332 1,172 2,359 2,359 2,359 2,359 2,359 2,359 1,356 1,356 2,223 2,223 1,332
T9	8,00	4,9	2,261 1,774 2,628 2,628 2,628 2,628 2,628 2,628 1,564 1,564 1,429 1,429 2,261
ulospäin	8,00	1,0	2,239 1,757 2,602 2,602 2,602 2,602 2,602 2,602 1,549 1,549 1,745 1,745 2,239

Taulukko 17. Kuopion koekohteen laskelmissa käytetyt lähtötiedot.

JÄTEILMA, KUOPIO		LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT												
Jäteilman lähtönopeus ulospuhallusaukossa,		V_e	9,1 m/s											
Jäteilma-aukon pinta-ala,		A_e	0,00785 m ²											
Jäteilman laimennuskertoimet (DC) eri tuulen suunnilla, $DC = \log(D_{wt})/\log(D_{min,o})$														
Piste	Etäisyys S, m	M	Tuulensuunta, °											
			350	20	50	80	110	140	170	200	230	260	290	320
			10	40	70	100	130	160	190	220	250	280	310	340
			Tuulisektorin numero											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K1	2,75	9,1	0,749	0,873	0,996	1,120	0,952	1,133	1,313	1,170	1,149	1,129	0,898	0,824
	2,75	2,3	1,296	1,391	1,485	1,580	1,067	1,172	1,277	1,804	1,614	1,424	1,444	1,370
ei parv	2,75	2,3	1,372	1,532	1,691	1,850	2,127	2,314	2,500	2,295	2,481	2,667	1,390	1,381
K2	0,84	9,1	1,113	1,178	1,244	1,310	0,846	1,009	1,172	0,929	0,996	1,062	0,924	1,019
	0,84	2,3	2,196	2,200	2,204	2,207	1,396	1,412	1,427	1,567	1,549	1,532	1,663	1,930
ei parv	0,84	2,3	2,263	2,344	2,426	2,507	1,505	1,505	1,505	1,505	2,043	2,581	1,505	1,884
K3	3,17	9,1	1,342	1,351	1,360	1,369	1,051	1,005	0,959	1,006	1,039	1,073	1,131	1,237
	3,17	2,3	1,821	1,938	2,055	2,172	1,557	1,412	1,267	1,236	1,273	1,309	1,647	1,734
ei parv	3,17	2,3	1,903	1,960	2,017	2,073	1,735	1,751	1,766	1,260	1,644	2,028	1,372	1,638
K4	2,97	9,1	0,943	0,908	0,873	0,838	1,026	1,213	1,399	1,341	1,201	1,062	0,894	0,918
	2,97	2,3	1,252	1,364	1,476	1,588	1,038	1,175	1,311	1,780	1,557	1,334	1,525	1,388
ei parv	2,97	2,3	1,946	1,715	1,483	1,252	2,400	2,401	2,401	2,232	2,264	2,296	1,420	1,683
K5	1,43	9,1	1,297	1,226	1,155	1,085	0,866	1,036	1,206	1,157	1,075	0,994	0,895	1,096
	1,43	2,3	2,030	2,049	2,067	2,086	1,343	1,375	1,408	1,666	1,491	1,316	1,701	1,865
ei parv	1,43	2,3	2,206	2,104	2,002	1,900	2,399	2,563	2,727	1,808	2,012	2,217	1,441	1,824
K6	3,37	9,1	1,382	1,389	1,397	1,404	1,093	1,092	1,092	1,113	1,108	1,104	1,248	1,315
	3,37	2,3	1,829	1,961	2,094	2,227	1,668	1,495	1,322	1,284	1,306	1,329	1,751	1,790
ei parv	3,37	2,3	1,525	1,678	1,830	1,982	2,039	2,068	2,096	1,426	1,714	2,002	1,552	1,538
K7	3,56	9,1	1,092	0,998	0,905	0,811	0,922	1,135	1,347	1,506	1,278	1,050	0,943	1,018
	3,56	2,3	1,304	1,416	1,528	1,641	1,088	1,217	1,345	1,856	1,538	1,220	1,535	1,420
ei parv	3,56	2,3	1,898	1,668	1,438	1,208	2,410	2,402	2,394	2,171	2,121	2,071	1,362	1,630
K8	3,79	9,1	1,313	1,267	1,222	1,176	0,870	0,978	1,086	1,269	1,130	0,992	1,866	1,589
	3,79	2,3	1,727	1,831	1,936	2,040	1,206	1,211	1,217	1,567	1,351	1,134	1,547	1,637
ei parv	3,79	2,3	1,872	1,880	1,888	1,896	2,276	2,365	2,454	1,584	1,628	1,672	1,384	1,628
K9	5,72	9,1	1,598	1,618	1,639	1,659	1,348	1,346	1,343	1,454	1,434	1,413	1,831	1,714
	5,72	2,3	1,863	1,946	2,029	2,112	1,771	1,628	1,486	2,088	1,759	1,429	2,112	1,988
ei parv	5,72	2,3	1,889	1,878	1,866	1,855	1,814	1,795	1,777	1,854	1,863	1,873	1,791	1,840

Taulukko 18. Tampereen koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Jäteilman puhallus syvennykseen.

JÄTEILMA, TAMPERE		Laimennus, D (puhallus syvennykseen)				Esiintymisaika, %	
Piste	Etäisyys, m	minimi	5 % ajasta	10 % ajasta	20 % ajasta	D < 168 aika	D < 200 aika
T1	5.82	757	2 554	3 815	4 659	0,0	0,0
T2	5.10	1 278	2 626	3 863	4 675	0,0	0,0
T3	5.82	1 543	4 017	4 778	6 239	0,0	0,0
T4	4,10	682	1 751	2 463	2 879	0,0	0,0
T5	3,00	912	1 980	2 303	2 784	0,0	0,0
T6	4,10	2 077	3 424	4 377	5 679	0,0	0,0
T7	6,35	1 759	2 881	4 522	6 322	0,0	0,0
T8	11,6	2 254	3 960	7 823	12 112	0,0	0,0
T9	8,00	8 286	13 911	18 482	32 119	0,0	0,0

Taulukko 19. Tampereen koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Jäteilman puhallus syvennyksestä ulospäin.

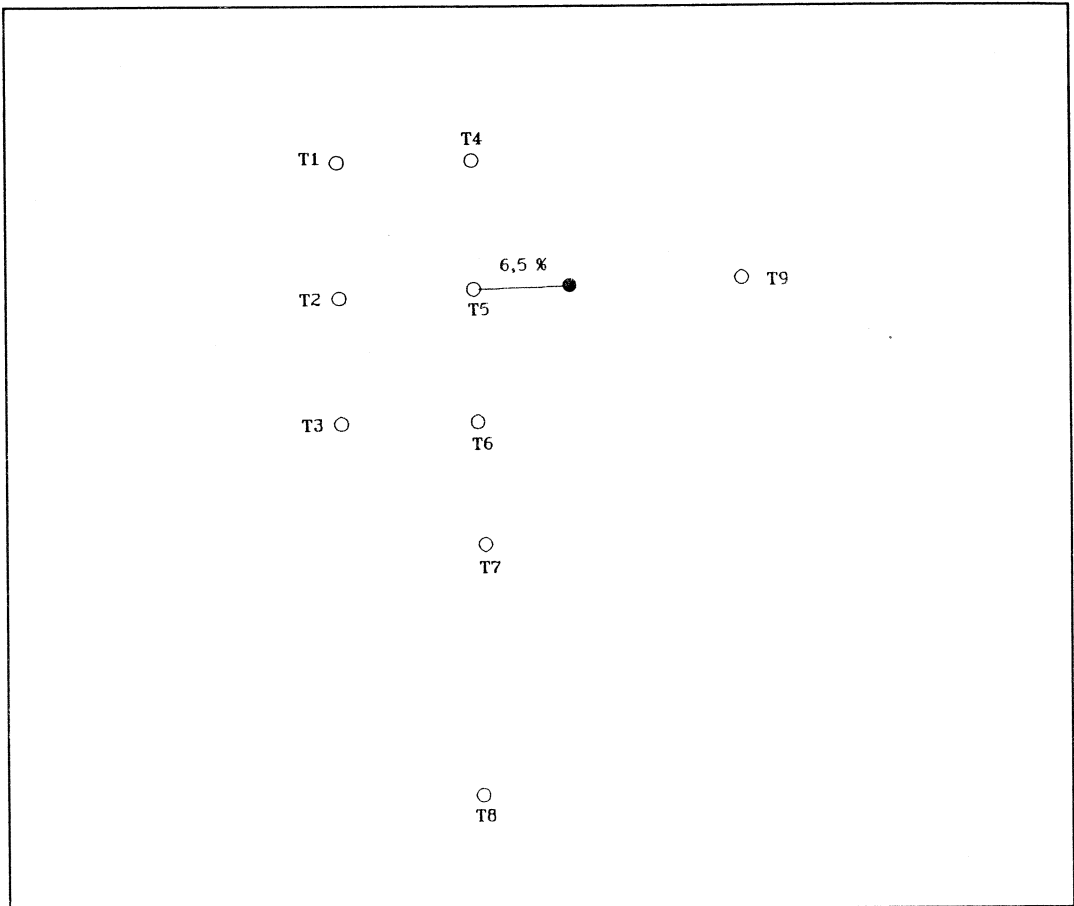
JÄTEILMA, TAMPERE		Laimennus, D (puhallus ulospäin)				Esiintymisaika, %	
Piste	Etäisyys, m	minimi	5 % ajasta	10 % ajasta	20 % ajasta	D < 168 aika	D < 200 aika
T1	5.82	1 178	1 761	2 104	6 705	0.0	0.0
T2	5.10	395	592	678	812	0.0	0.0
T3	5.82	368	406	548	3 886	0.0	0.0
T4	4,10	1 118	2 019	2 335	4 397	0.0	0.0
T5	3,00	<u>156</u>	<u>162</u>	213	647	<u>6.5</u>	<u>9.5</u>
T6	4,10	1 146	1 231	1 761	6 180	0.0	0.0
T7	6,35	1 678	11 446	14 277	18 778	0.0	0.0
T8	11,6	4 806	83 176	119 016	314 899	0.0	0.0
T9	8,00	78 210	98 553	117 894	166 532	0.0	0.0

Taulukko 20. Kuopion koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Parvekkeet ovat mukana.

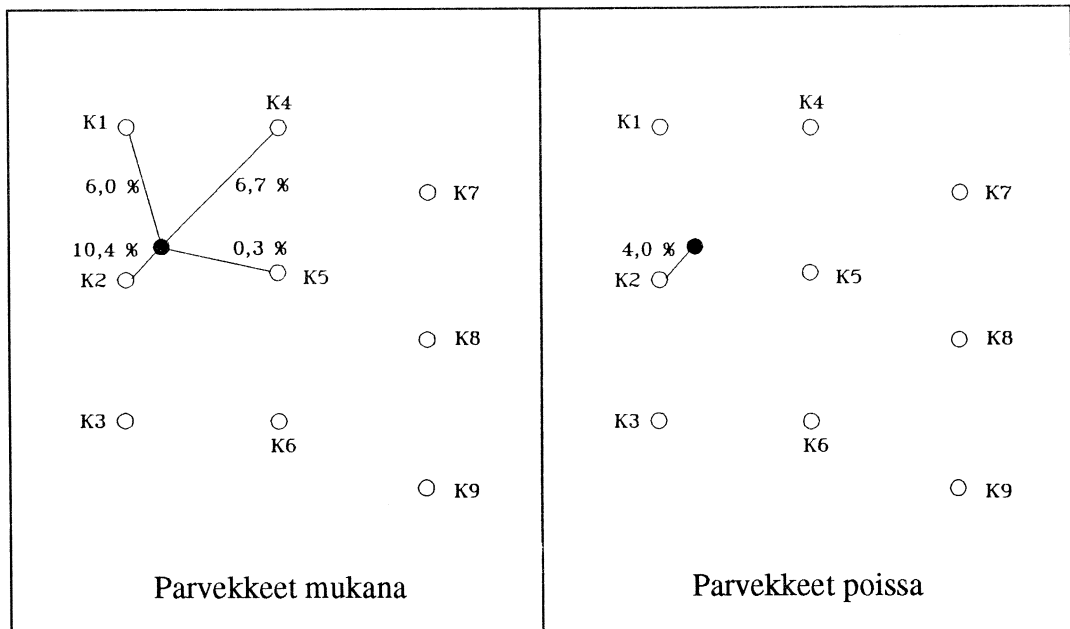
JÄTEILMA, KUOPIO		Laimennus, D (parvekkeet mukana)				Esiintymisaika, %	
Piste	Etäisyys, m	minimi	5 % ajas- ta	10 % ajasta	20 % ajasta	D < 168 aika	D < 200 aika
K1	2,75	<u>148</u>	<u>160</u>	243	395	<u>6,0</u>	<u>7,5</u>
K2	0,84	<u>91</u>	<u>137</u>	<u>167</u>	249	<u>10,4</u>	<u>13,6</u>
K3	3,17	409	476	492	584	0,0	0,0
K4	2,97	<u>143</u>	<u>152</u>	276	417	<u>6,7</u>	<u>7,8</u>
K5	1,43	<u>158</u>	204	237	314	<u>0,3</u>	<u>4,0</u>
K6	3,37	573	643	693	758	0,0	0,0
K7	3,56	235	247	351	490	0,0	0,0
K8	3,79	325	351	470	499	0,0	0,0
K9	5,72	3 167	3 474	4 381	9 193	0,0	0,0

Taulukko 21. Kuopion koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Ilman parvekkeita.

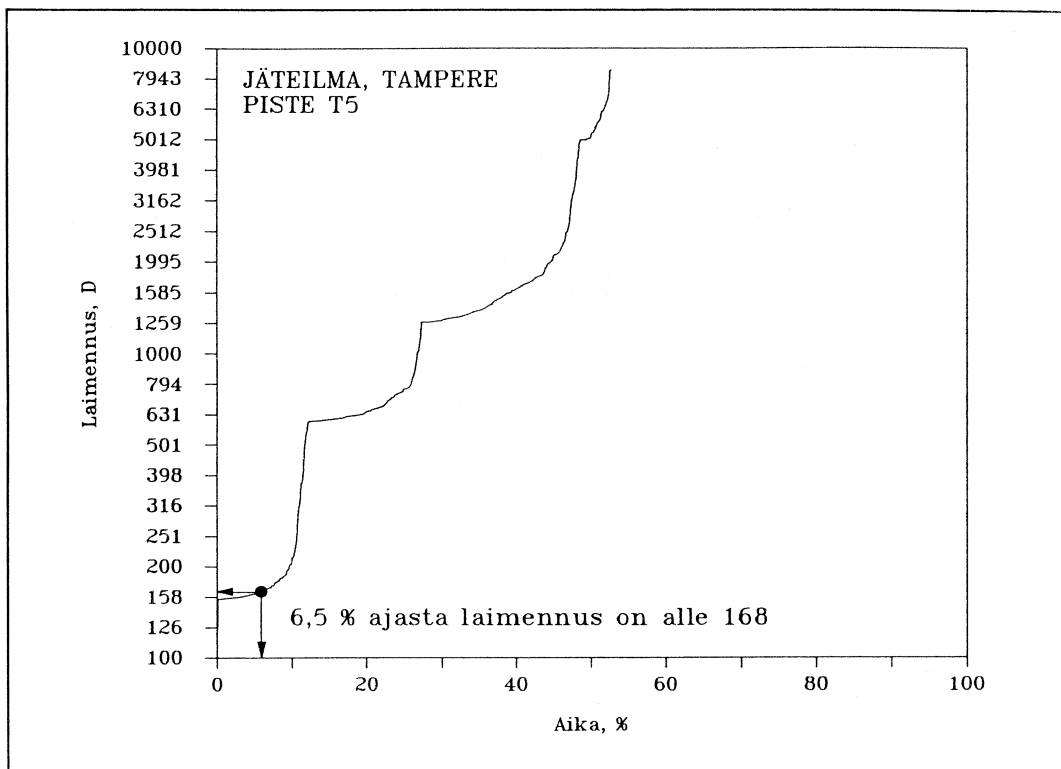
JÄTEILMA, KUOPIO		Laimennus, D (ilman parvekkeita)				Esiintymisaika, %	
Piste	Etäisyys, m	minimi	5 % ajasta	10 % ajasta	20 % ajasta	D < 168 aika	D < 200 aika
K1	2,75	616	697	800	1 556	0,0	0,0
K2	0,84	<u>125</u>	<u>178</u>	211	335	<u>4,0</u>	<u>8,1</u>
K3	3,17	460	646	922	3 187	0,0	0,0
K4	2,97	398	505	1 015	3 463	0,0	0,0
K5	1,43	255	755	1 610	3 019	0,0	0,0
K6	3,37	1 156	1 628	2 119	2 724	0,0	0,0
K7	3,56	429	497	1 001	3 727	0,0	0,0
K8	3,79	1 162	1 524	3 484	4 436	0,0	0,0
K9	5,72	22 547	24 404	25 316	28 131	0,0	0,0



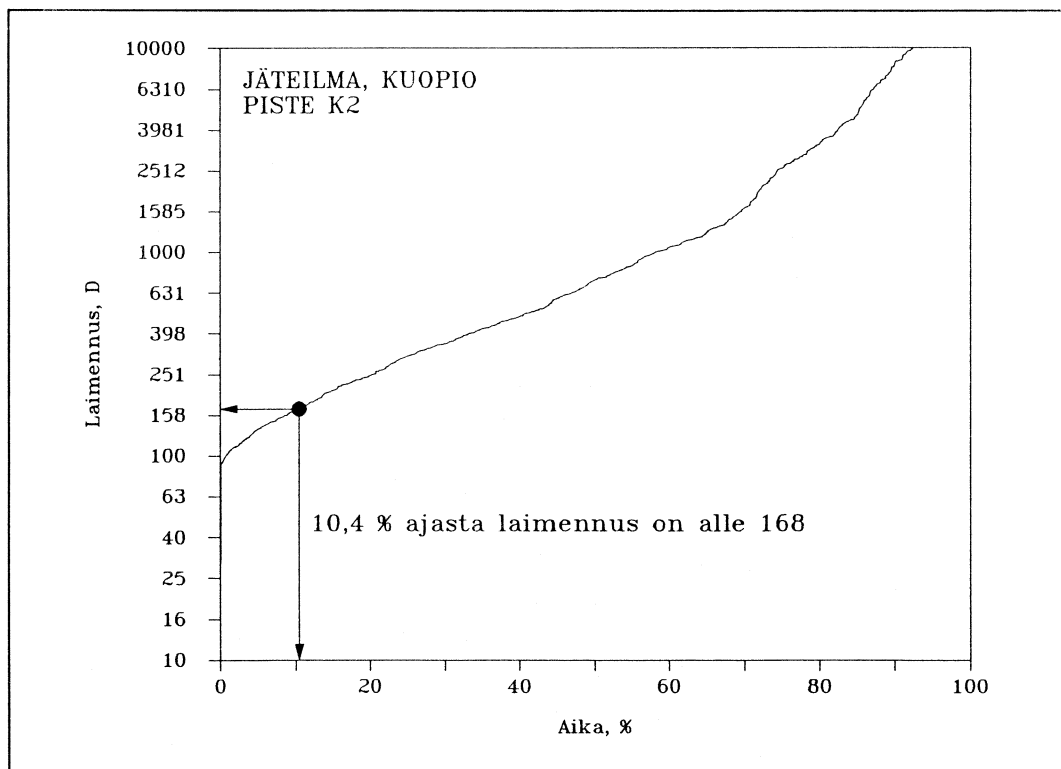
Kuva 65. Tampereen koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu aika, jolloin jäteilman laimennus alittaa arvon 168. Puhallus ulospäin.



Kuva 66. Kuopion koekohteen tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu aika, jolloin jäteilman laimennus alittaa arvon 168.



Kuva 67. Tampereen koekohteen pisteen T5 tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Puhallus ulospäin.



Kuva 68. Kuopion koekohteen pisteen K1 tilastollisilla tuulitiedoilla laskettu laimennuksen vuosipysyvyys. Parvekkeet mukana.

6 YHTEENVETO

6.1 JÄTEILMAN LAIMENEMINEN

Ulos puhallettu jäteilma leviää ulkoilmaan kartiomaisena viuhkana, joka voi tuulen mukana painua takaisin talon seinustalle. Wilson ja Chui ovat esittäneet sekoittumisteoriaan ja tuulitunnelikokeisiin perustuvat kaavat, joilla voidaan laskea kattopoistosta peräisin olevan jäteilman minimilaimennus (tai maksimipitoisuus) laatikkomaisen talon ulkopinnoilla. Lähtötietoina tarvitaan poistoaukon koko, jäteilman lähtönopeus, tuulen nopeus kattotasolla ja tarkastelukohdan etäisyys poistoaukosta.

Tässä tutkimuksessa testattiin samojen kaavojen pätevyyttä jäteilman seinäpuhalluksessa. Kolmen rakennuskohteen merkkiainemittaukset kentällä ja tuulitunnelissa osoittavat, että seinäpoiston lähialueella (etäisyys ≤ 100 x aukon läpimitta) kentällä mitattu laimennus on yleensä suurempi kuin tuulitunnelissa saatu laimennus eli tuulitunnelikokeet antavat varmalla puolella olevia tuloksia. Tuulitunnelissa mitattu laimennus on puolestaan suurempi kuin Wilsonin ja Chuin kaavoista laskettu laimennus, kun jäteilman lähtönopeuden ja tuulen nopeuden suhde on pieni. Syynä on alempana mainittu seinustavirtausten epävakaisuus, joka hajottaa seinältä tulevan jäteilmakuormituksen laajemmalle alueelle kuin kattopuhalluksessa. Kauempana poistoaukosta lasketun ja mitatun tuloksen ero pienenee. Täten kattopuhalluksen laskentakaavoja voitaneen turvallisesti käyttää tuloilman puhtauden arviointiin seinällä olevan poistoaukon ympäristössä.

Kenttähavaintojen mukaan seinällä olevasta aukosta lähtevä jäteilmakartio pyörii lähes sattumanvaraisesti kaikkiin suuntiin ja osuu vain hetkittäin kunkin tarkastelupisteen kohdalle. Niinpä paikallinen laimennussuhde vaihtelee satunnaisesti tiettyjen ääriarvojen välillä. Ajalliset laimennussuhteen keskiarvot ovat aina lyhytaikaisia minimejä suurempia ja riippuvat mittausjakson pituudesta. Esim. tässä tutkimuksessa käytetty 10 minuutin keskiarvo voi olla 2 - 5 kertaa suurempi kuin samalta aikajaksolta mitattu pienin 2 minuutin keskiarvo. Sen sijaan tuulitunnelissa virtausolot ovat vakaammat kuin luonnossa eikä keskiarvotulos riipu merkittävästi mittausjakson pituudesta.

Eri laimennussuhteiden esiintymistodennäköisyyksille on kehitetty laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida ilman puhtauden pysyvyys vuositasolla, laimenemisteorian ja paikallisten tuulitilastojen mukaan. Koekohteille tehdyissä pysyvyyslaskemissa on käytetty tuulitunnelikokein tarkistettua laimenemiskaavaa, jolla on laskettu kunkin ilmanottopisteen laimennukset 10 minuutin jaksoilla eri tuulioloissa. Tarkastelut koskevat yhden poistokohdan vaikutusta tiettyyn ilmanottopisteeseen kerrallaan. Useamman poiston yhteisvaikutusta samaan pisteeseen voidaan arvioida yhdistämällä eri poistojen aiheuttamat kuormitusajat. Käytännössä vain lähimpänä olevat jäteilman poistoaukot tarvitsee ottaa huomioon. Sen sijaan kahdesta tai useammasta poistosta peräisin olevien jäteilmavarojen osuminen samanaikaisesti tiettyyn pisteeseen on ilmeisesti hyvin harvinaista, eikä se liene mitoitettava tekijä, ellei poistoja ole keskitetty hyvin suppealle alueelle.

6.2 HYVÄKSYMISKRITEERIT

Asuntojen jäteilmän haitallisuus tuloilmassa ilmenee ensisijassa hajuna. Mittaus-
ten mukaan keittiön poistoilmaa (ilmavirta 20 l/s) on laimennettava vähintään
168-kertaisesti eli pitoisuuteen 0,6 %, jotta pahimmassa tapauksessa eli silakan
paistossa hajukynnys ei ylittyisi. Käytännössä keittiön poistoilma laimenee jo
ennen ulospuhallusta sekoittuessaan asunnon muuhun poistoilmaan. Tällöin
hyväksyttäväksi pitoisuusrajaksi voitaisiin asettaa esim. 1 % jäteilmaa tuloilmassa
eli vaadittaisiin 100-kertainen laimennus ulkoilma-aukon kohdalla. Tuloilma
puolestaan sekoittuu huoneen entiseen ilmassaan, joka siis vaimentaa tuloil-
man lyhytaikaisia laadun vaihteluita sisällä olevan havaitsijan kannalta. Sen
vuoksi riittänee, että mainittu laimennusvaatimus kohdistuu ilmanottokohdassa
esim. 10 minuutin keskiarvoon eikä hetkellisarvoihin.

Koska paikallinen laimennussuhde vaihtelee satunnaisesti sääolojen mukaan,
vaatimusrajaksi ei kannata asettaa absoluuttista minimilaimennusta, jonka
toteaminen olisi käytännössä lähes mahdotonta. Suositeltavampaa on esittää
tuloilman puhtaudelle pysyvyysvaatimus esim. muodossa "Tuloilman kes-
kimääräinen jäteilmapitoisuus 10 minuutin jaksoilla saa olla yli 1 % (laimennus-
suhde alle 100) enintään 5 % ajasta, normaalivuoden säätiedoilla lasketun
pysyvyyden mukaan". Laatutasoa ja varmuutta voidaan asettaa muuttamalla
sallittua pitoisuusrajaa ja sen pysyvyyttä. Rajoja asetettaessa tulisi ottaa huo-
mioon, että asuntokohtainen jäteilma sisältää vain satunnaisesti pahimmin
haisevia aineita. Esim. silakanpaiston tai vastaavan toiminnan esiintymistiheys
asuntoa kohti tuskin on enempää kuin 2 kertaa viikossa ja kesto aika enintään 0,5 h
kerrallaan, eli n. 4 % ajasta. Vain murto-osan tästä ajasta ko. asunnon jäte-
ilma kuormitus voi osua johonkin ilmanottopisteeseen.

6.3 JÄTEILMAN SEINÄPUHALLUKSEN TOIMIVUUS KOEKOHTEISSA

Tampereelle ja Kuopioon rakennetuissa asuinkerrostaloissa on tutkittu kahta
varsin erilaista jäteilmän seinäpuhallusratkaisua. Näissä on mitattu jäteilmän
laimenemista puhallusaukkojen ja ilmanottopisteiden välillä kentällä todellisissa
käyttöoloissa ja tuulitunnelissa pienoismalleilla sekä laskettu tuulitilastojen nojalla
vastaavia laimennussuhteiden pysyvyyksiä vuositasolla. Tulosten mukaan Tam-
pereen ratkaisu, jossa jäteilma puhalletaan suhteellisen pienellä nopeudella seinä-
syvennykseen ja ilmanottoaukot on sijoitettu siitä vähintään neljän metrin päähän
tai jopa eri seinustalle, osoittautui tuloilman puhtauden kannalta turvallisiksi.
Seinäsyvennys näyttää tehokkaasti laimentavan jäteilmaa ennen kuin se leviää
talon seinustoille.

Kuopion talon lounaisella julkisivulla jäteilma-aukot ja ilmanottopisteet ovat
paikoin hyvin lähellä toisiaan ja seinustalla on tuulta rajoittavia parvekeseiniä ja
-tasoja. Jäteilmalla on kuitenkin suurehko lähtönopeus 6 - 9 m/s, joka heittää
jäteilmasuihkun parveketason ulkopuolelle, ellei tuulen nopeus ole suuri. Ilman-
ottopisteistä kentällä mitatut laimennussuhteet olivatkin yleensä hyväksyttävällä
tasolla. Tuulitunnelimittauksissa havaittiin joissakin tuulitilanteissa hajukynnystä

vastaavan laimenemisrajan alituksia, mutta niiden kestoaika vuositasolla jää pysyvyystarkastelun mukaan vähäiseksi. Tuulitunnelikokeiden mukaan laimeneminen paranee olennaisesti, jos parvekkeet poistetaan julkisivulta, jolloin jäteilma pääsee vapaammin poistumaan seinustalta tuulen mukana.

Kuopion koekohteen luoteispäädystä jäteilma-aukot ja ilmanottopisteet sijaitsevat ilmeisen epädullisesti saman sisäkulmauksen vierekkäisillä sivuilla. Kenttämittauksissa saatiinkin tässä paikassa ajoittain pieniä laimennuksia, jotka voivat vaarantaa tuloilman laadun.

Kummassakaan koekohteessa ei ole esiintynyt hajuvalituksia tai muita seinäpuhallukseen kohdistuvia moitteita. Tämä tieto saatiin isännöitsijöiltä n. 8 kk talojen käyttöön oton jälkeen. Tampereen kohteessa ei myöskään ole havaittu kondenssia tai likaantumista puhallusaukoissa. Sen sijaan Kuopion kohteessa vuoden 1993 lopussa tehdyssä tarkastuksessa havaittiin vähän jäätä ja pieniä valumajälkiä joidenkin puhallusaukkojen alapuolella. Kosteus oli valunut aukon kauluspellin alta, jonne se oli tiivistynyt ilmeisesti seinän sisältä tulevasta ilmasta, joten valumisen syynä ei varsinaisesti ole jäteilman ulospuhallus. Myös ulko-oven suojakatoksen kannattimiin oli kertynyt huurretta katoksen alle suunnatusta jäteilmasuihkusta.

6.4 SUOSITUKSET JÄTEILMAN SEINÄPUHALLUKSEN KÄYTÖLLE

Mitoituskriteeriksi ehdotetaan, että keskimääräinen jäteilmapitoisuus ilmanotokohdassa 10 minuutin jaksoilla saa olla yli 1 % (laimennussuhde < 100) enintään 5 % ajasta normaalivuoden tuulitiedoilla laskettuna. Laskelmien ja koetulosten mukaan arvioiden tämä vaatimus voidaan täyttää puhaltamalla jäteilma ulos riittävän suurella nopeudella ja/tai sijoittamalla ilmanottopisteet riittävän etäälle jäteilma-aukoista.

Avoimella seinustalla, kun jäteilmasuihkut on suunnattu suoraan ulos päin suurehkoilla lähtönopeudella ≈ 8 m/s, ulkoilma-aukkojen sijainti on vapaa. Jos lähtönopeus on tätä pienempi, ulkoilma-aukon etäisyyden jäteilma-aukosta tulee olla vähintään $40 \times \sqrt{A}$, jossa A = jäteilma-aukon ala.

Jos seinustalla on tuuliesteitä, esim. parvekeseiniä tai sisänurkkauksia, jotka muodostavat soppitiloja, jäteilma- ja ulkoilma-aukkoja ei pidä sijoittaa samaan soppitilaan. Samaten aukkojen sijoittamista lähekkäin talon ulkonurkkien lähelle tulisi välttää.

Jäteilma-aukot yksinään kannattaa sijoittaa seinäsyvennykseen, kun ulospuhalluksessa käytetään pientä lähtönopeutta. Tällöin syvennys toimii puoliavoimen hormin tapaan ja laimentaa jäteilmaa tehokkaasti, ennen sen leviämistä talon ulkopinnoille.

Suunnittelussa voidaan tarvittaessa käyttää esitettyjä laskentamenetelmiä jäteilman laimenemisen ja tuloilman puhtauden pysyvyyden arvioimiseen. Erikoistapauksissa toimivuus on syytä varmistaa pienoismallikokein tuulitunnelissa.

6.5 JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

Käsitykset jäteilman seinäpuhalluksen toiminnasta ja käyttömahdollisuuksista asuinkerrostaloissa ovat toistaiseksi arviointeja, ja ne perustuvat melko suppeaan mittausaineistoon yksittäisissä koetapauksissa sekä kattopuhalluksen laimenemisteoriaan, jolla tuloksia on pyritty yleistämään. Esitettyjen käyttösuositusten tarkentaminen ja niiden sovellusalueen laajentaminen vaatisivat lisätutkimuksia. Kiinnostavia aiheita olisivat mm.

- laimenemisteorian korjaaminen seinäpuhallukselle sopivaksi
- tuloilman puhtauden pysyvyysennusteiden varmistaminen kokeellisesti
- usean jäteilma-aukon aiheuttaman summakuormituksen mittaaminen
- hajukokeiden täydentäminen ja
- käyttökokemusten kerääminen koerakennuskohteista.

Nämä tutkimukset auttaisivat osaltaan ilmanvaihtomääräysten ja suunnitteluohjeiden kehittämistä.

Eräät tässä tutkimuksessa tehdyt tuulitunnelikokeet ja laimenemisteoria viittaavat siihen, että nykyiset ilmanvaihtoaukkoja, etenkin talon katolle sijoitettuja aukkoja, koskevat ohjeet olisi syytä tarkistaa. Myös katolta ulos johdetun jäteilman vaikutus tuloilman laatuun tulisi tutkia samaan tapaan ja samoin perustein kuin nyt seinäpuhallusta tutkittaessa.

LÄHDELUETTELO

1. ASHRAE Fundamentals Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1989.
2. Andreopoulos, J. Rodi, W. Experimental investigation of jets in a crossflow. *J. Fluid Mech.*, 1984. Vol. 138, s. 93 - 127.
3. Grititlin, M. Zuluftverteilung in Räumen. *Luft- und Kältetechnik* 1970/5, s. 247 - 257.
4. Wilson, D. J. Contamination of air intakes from roof exhaust vents. *ASHRAE Transactions* 1976. Vol. 82, Part 1, s. 1024 - 1038.
5. Wilson, D. J. Dilution of exhaust gases from building exhaust vents. *ASHRAE Transactions* 1977. Vol. 83, Part 1, s. 168 - 176.
6. Wilson, D. J. 1991. Henkilökohtainen keskustelu.
7. Wilson, D. J. Ventilation Intake Air Contamination By Nearby Exhausts. *Proc. Air Pollution Control Assoc. Conf. on Indoor Air Quality in Cold Climates*, Ottawa, April 28 - May 1, 1985.
8. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa D2. 1987 Ympäristöministeriö.
9. Residential Mechanical Ventilation Requirements CEN ENV 308: Heat exchangers. Canadian Standards Association. 1991.
10. Poistoilmasta tuloilmaan lämpöä siirtävien LTO-laitteiden tyyppihyväksyntä- ja testausohje. Sisäasiainministeriön kirje Dno 1765/545/81.
11. Levin, P. Air leakage between apartment. 9th AIVC Conference. Gent, 12. - 15.9.1988.
12. Savolainen, T., Reponen, T., Kokotti, H., Raunemaa, T., Nevalainen, A., Kalliokoski, P. Neulamäen koetalot: Ilmanvaihto ja sisäilmasto. *Kuopion yliopiston ympäristöhygienian laitosten monistesarja*, 4/1988, 168 s. + liitteitä 17 s.
13. Raino, H. & Hellsten, E. Tilastoja Suomen ilmastosta 1961 - 1980. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan. Helsinki 1983. Ilmatieteen laitos. Nide 80 osa 1a - 1980. 560 s.

Tekijä(t) Siitonen, Veijo, Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Luoma, Marianna, Saari, Mikko & Broas, Pertti	Projektin nimi Jäteilman puhaltaminen seinästä ulos	
Nimeke <h2 style="text-align: center;">Jäteilman seinäpuhallus asuinkerrostaloissa</h2>	Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (TEKES), Suomen Ilmateknillinen Toimialayhdistys ry (SITY), ABB Fläkt Oy, Vallox Oy	
Tiivistelmä <p>Asuinkerrostaloista jäteilma on yleensä johdettu ulos katon yläpuolelta. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, voitaisiinko kunkin asunnon jäteilma poistaa suoraan ulkoseinältä aiheuttamatta rakennuksessa hajua tai muuta haittaa. Tämä helpottaisi asuntokohtaisten ilmanvaihtokoneiden käyttöä kerrostaloissa, kun erillinen kanavointi katolle jäisi pois.</p> <p>Jäteilman seinäpuhalluksen toimintaa tutkittiin kolmessa kerrostalossa täysmittakaavakokein ja talojen pienoismalleilla tuulitunnelissa. Jäteilman kulkua talojen ulkopuolella kuvattiin videolla merkkisavua käyttäen ja laimenemista mitattiin merkkiainemenetelmällä.</p> <p>Etenkin kenttäkokeissa seinäaukosta lähtevä jäteilmavana kieppui tuulen pyörteilyn vuoksi jatkuvasti eri suuntiin ja osui vain hetkittäin kuhunkin tarkastelupisteeseen. Paikallinen laimennussuhde vaihteli vastaavasti tuuliolojen mukaan. Avoimelta seinustalta jäteilma-aukkojen lähialueilla mitattu laimennus oli yleensä suurempi kuin katto-poistojen laimennusteorian mukaan laskettu minimilaimennus. Täten teorian ennustetta voidaan pitää turvallisena avoimelle seinälle sijoitettavien ilma-aukkojen mitoituksen kannalta. Seinän syvennyksissä ja soppitiloissa teoria ei toimi luotettavasti.</p> <p>Jäteilman laimennustarpeen arviointia ja koetulosten arvostelua varten mitattiin keittiön poistoilman (20 dm²/s) hajukynnysarvot eräiden ruokien valmistuksen sekä tupakoinnin aikana. Voimakkain haju muodostui silakoiden paistosta, jolloin poistoilmaa oli laimennettava 168-kertaisesti eli pitoisuuteen 0,6 %. Koerakennusten ilmanotto-kohdista mitattu laimennus oli yleensä tätä raja-arvoa suurempi lukuun ottamatta tapauksia, joissa sekä jäteilmattä ulkoilma-aukot oli sijoitettu epäedullisesti seinän sisänurkkaukseen tai parvekkeiden väliin. Näissäkään tapauksissa asukkailla ei ole tullut hajun valituksia.</p> <p>Suunnittelun apuvälineeksi kehitettiin laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida ilmanottoapaikan ilman puhtauden pysyvyys vuositasona. Koetulosten ja laskelmien perusteella laadittiin suunnitteluohjeet, joilla voidaan saavuttaa hyväksyttävä tuloilman laatu jäteilman seinäpuhallusta käytettäessä.</p>		
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Sisäilmasto- ja laitetekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT		
ISSN ja avainnimeke 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4710-1	Kieli suomi, engl. tiiv.	
Luokitus (UDK) 697.94:628.86:692.23	Avainsanat exhaust systems, mechanical ventilation, vents, ducts, exhaust air, exhaust emissions, residential buildings, apartment buildings, multistorey buildings, extraction, indoor air, walls, models, air quality, odors, measurement, air flow	
Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (90) 456 4404 Telekopio (90) 456 4374	Sivuja 106 s.	Hintaryhmä C



Author(s) Siitonen, Veijo, Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Luoma, Marianna, Saari, Mikko & Broas, Pertti	Name of project Jäteilman puhaltaminen seinästä ulos	
	Commissioned by Technology Development Centre (TEKES), Suomen Ilmateknillinen Toimialayhdistys ry (SITY), ABB Fläkt Oy, Vallox Oy	
Title <h2 style="text-align: center;">Extracting of waste air in multistorey residential buildings</h2>		
Abstract <p>The usual way of extracting the waste air in a multistorey residential building is to conduct the air above the roof. The purpose of this study was to examine whether exhaust air from each apartment could be discharged outdoors via exhaust vents mounted on the outer wall in such a way that no odours or other harmful effects are caused. This would facilitate the use of an apartment-specific mechanical ventilation system in multistorey buildings as the duct-work to the roof could be left out.</p> <p>The functioning of the wall exhaust system was examined in three multistorey buildings by full-scale experiments and by models in a wind tunnel. The motion of the waste air was recorded by a video camera and smoke tracer, and the dilution was measured by a tracer gas method.</p> <p>Particularly during the full-scale experiments, the waste air wake fluctuated continuously in various directions because of the eddies, and only occasionally hit each measuring point. Correspondingly, the local dilution fluctuated according to the wind conditions. Near exhaust vents by the open wall, the dilution measured was usually higher than that predicted by the minimum dilution theory for roof exhaust. Thus, the theory could be useful when dimensioning exhaust vents on an open wall. In niches and corners, the theory does not function reliably.</p> <p>In order to estimate the demands of waste air dilution and to evaluate the test results, the odour threshold values of exhaust air from a kitchen (20 dm³/s) during cooking or smoking were determined. The strongest odour came when frying herring. In that case the exhaust air had to be diluted 168 times, that is, to a concentration of 0.6 %. The dilution values obtained for the intake air of the test buildings were usually higher than the odour threshold value of 168, except when both exhaust and intake vents were adversely located on an inner corner of the walls or between balconies. Even in these cases, the inhabitants have not complained about odours.</p> <p>A computational method as a design tool has been developed by which the yearly permanence of air purity at the intake vent can be estimated. On the grounds of the test results and computations, design criteria for a wall exhaust system have been presented by which an acceptable supply air quality can be obtained.</p>		
Activity unit VTT Building Technology, Indoor Environment and Systems, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland		
ISSN and series title 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4710-1	Language Finnish, Engl. abstr.	
Class (UDC) 697.94:628.86:692.23	Keywords exhaust systems, mechanical ventilation, vents, ducts, exhaust air, exhaust emissions, residential buildings, apartment buildings, multistorey buildings, extraction, indoor air, walls, models, air quality, odors, measurement, air flow	
Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. + 358 0 456 4404 Fax + 358 0 456 4374	Pages 106 p.	Price group C

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUSTEKNIikka – VTT BYGGNADSTEKNIK –
VTT BUILDING TECHNOLOGY

- 1536 Gowda, Shankare. Curved and cambered glulam beams. Part 3. Constant amplitude fatigue tests. 1994. 43 p.
- 1539 Baroudi, Djebar, Jumppanen, Ulla-Maija & Ala-Outinen, Tiina. Menetelmän NT FIRE 021 soveltaminen palosuojatun teräsrakenteen mitoituksessa. 1994. 106 s. + liitt. 24 s.
- 1549 Sipilä, Kari, Pihala, Hannu, Nyman, Mikko, Lassila, Kenneth & Ritola, Jouko. VTT – Sähköotalo 2. Rakennuksen energiajärjestelmäratkaisut. Esitutkimus. 1994. 44 s. + liitt. 7 s.
- 1543 Sarvaranta, Leena & Kaasinen, Harri. Recent trends in gypsum research. 1994. 27 p.
- 1551 Laukkanen, Kyösti & Haimala, Taru. The approval test methods of surface structure materials for bridge decks. 1994. 61 p.
- 1553 Laurikka, Petri. Tuotemallin käyttö sisävalmistustöiden aikataulusuunnittelussa. 1994. 90 s. + liitt. 11 s.
- 1554 Juntunen, Kari. Omatoimisuuden lisääminen asuinkiinteistöjen ylläpidossa. 1994. 48 s. + liitt. 18 s.
- 1558 Ratvio, Juha & Kullaa, Jyrki. Betonielementtirakennusten jäykistys. Toimistorakennukset ja monikerroksiset asuinrakennukset. 1994. 112 s. + liitt. 10 s.
- 1562 Kosonen, Risto & Aho, Ilari. Energiansäästötoiminnan systematisointi Helsingin kaupungin omistamissa rakennuksissa. 1994. 85 s. + liitt. 37 s.
- 1567 Järventie, Jan-Erik, Lehtinen, Erkki & Skogberg, Marja. K- ja S-1-luokan teräsbetonisten väestönsuojien kustannustaso. 1994. 53 s. + liitt. 31 s.
- 1568 Karhu, Vesa, Hannus, Matti & Pellosniemi, Jukka. Elementtirakennuksen tuotemallipohjainen arkkitehtisuunnittelu. 1994. 97 s. + liitt. 86 s.
- 1570 Hakola, Ilkka & Tirkkonen, Timo. Terässiltojen käyttöikä. 1994. 203 s.
- 1576 Huovinen, Seppo. Liimattujen teräsvahennuslevyjen laboratoriotutkimus. 1994. 13 s. + liitt. 18 s.
- 1577 Laine, Mauri. Europa-Huis-projekti. Hollannin, Saksan ja Suomen asuinrakentaminen yhdentyvässä Euroopassa. 1994. 57 s. + liitt. 48 s.
- 1580 Nykänen, Esa. Nuoren betonin ominaisuudet. Kokeellinen osa. 1994. 41 s. + liitt. 3 s.
- 1585 Korttesmaa, Markku. Puutalon rakenteet. Ala- ja välipohjat sekä seinärakenteet. 42 s. + liitt. 96 s.
- 1587 Pajari, Matti & Yang, Lin. Shear capacity of hollow core slabs on flexible supports. 1994. 111 p. + app. 26 p.
- 1588 Sippola, Merja & Ratvio, Juha. Rakennusmateriaalien uudelleenkäyttö Suomessa ja muissa maissa. 1994. 45 s. + liitt. 4 s.
- 1589 Nieminen, Jyri, Kouhia, Ilpo, Haakana, Maarit & Pulakka, Sakari. Matalaenergiapientalon energiankulutus ja säästötoimenpiteiden kannattavuus. 1994. 19 s. + liitt. 9 s.
- 1590 Häkkinen, Tarja. Environmental impact of building materials. 1994. 38 p.
- 1591 Häkkinen, Tarja & Kronlöf, Anna. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointi. 1994. 61 s. + liitt. 25 s.
- 1595 Siitonen, Veijo, Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Luoma, Marianna, Saari, Mikko & Broas, Pertti. Jäteilman seinäpuhallus asuinkerrostaloissa. 106 s.

