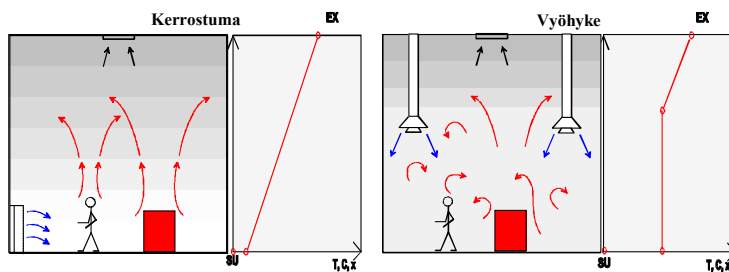


## 5 ILMAVIRTAUKSET

### 5.1 Tausta

#### Konvektiovirtaukset

Tilan ilmavirran mitoitus perustuu lämmönlähteiden konvektiovirtauksiin eli plumeihin tapauksissa, joissa lämpötilan kerrostumista käytetään hyväksi. Jos epäpuhtauslähteet ovat lämmönlähteiden yhteydessä, myös epäpuhtauksien kerrostumista voidaan käyttää hyväksi ilmavirran mitoitukseen. Tilailmastoinnin strategialuokittelun (Hagström 2000) mukaisissa vyöhykestrategiassa (zoning strategy) ja kerrostumastrategiassa (stratification strategy) tilan ilmavirran mitoitus perustuu lämmönlähteiden konvektiovirtauksiin (kuva 5.1). Konvektiovirtauksien tunteminen on oleellinen asia, jotta kyseiseen ilmiöön perustuva ilmavirran mitoitus voidaan hallita.



Kuva 5.1. Konvektiovirtaukset vyöhyke- ja kerrostumastrategiassa.

Mitä enemmän konvektiovirtaukset ovat tuloilmavirtaa suurempia, sitä enemmän syntyy paluuvirtausta tilan yläosasta alaosaan. Tästä on seurauksena lämmön ja epäpuhtauksien poistotehokkuuden pieneneminen. Siten myös rajakerros siirtyy alemmas kerrostumastrategiaa sovellettaessa.

Konvektiovirtauksien tunteminen on tärkeää myös kohdepoistojen suunnittelussa ja mitoituksessa.

#### CFD-mallinnus

Virtauslaskenta (Computational Fluid Dynamics, CFD) on mallinnustyökalu, jolla voidaan ennustaa huonetilan virtaukset ja lämpöolot rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Sen käyttö ilmastoinnin suunnittelun ja tuotekehityksen apuvälineenä on vähitellen yleistymässä. CFD-mallinnuksen soveltuvuus suunnittelun apuvälineeksi riippuu kuitenkin mallinnuksen vaatimasta työmäärästä ja mallinnustulosten luotettavuudesta.

CFD-mallinnuksessa tilasta laaditaan 3D-malli, johon määritellään virtausten kannalta oleelliset lähtötiedot ja komponentit, kuten tuloilmalaitteet, poistot, lämmönlähteet, epäpuhtauslähteet, pinta-ämpötilat jne. Suurin työmäärä CFD-mallinnuksessa liittyy yleensä tilan geometrian kuvaamiseen ja lähtötietojen keräämiseen. Mallinnusta varten joudutaan myös yleensä valitsemaan yksi tai useampia käyttötilanteita. Tilaan va-

pautuva lämpöteho riippuu mm. laitteiden käyttötilanteesta ja rakenteiden lämpövuodot vuodenaajasta ja säätilasta.

Monimutkaisten komponenttien kuten tuloilmalaitteiden geometria ja lähtötiedot joudutaan mallissa yleensä yksinkertaistamaan. Tällöin tulosten oikeellisuus riippuu siitä, ovatko yksinkertaistuksessa tehdyt oletukset komponenttien toiminnasta oikeita. Tämän vuoksi olisi tärkeää, että komponenteille olisi saatavilla mittauksin validoituja malleja.

Mallinnuksen kannalta ihanteellinen tilanne olisi seuraavanlainen:

- mallinnettavan tilan geometria saadaan mallinnusohjelmaan CAD-mallista
- tuloilmalaitteen valmistajalta saadaan laitteen yksinkertaistettu CFD-malli sisältäen
  - laitteen yksinkertaistetun geometrian
  - mallinnusmenetelmän
  - reunaehdot tuloilman puhallukselle sekä mahdolliselle induktioilman imulle ja jäähdytykselle/lämmitykselle
  - suositellun laskentaverkon tiheyden
- laite- ja kalustevalmistajilta saadaan tärkeimpien komponenttien geometriat
- lämmönlähteiden lämpötehot eri käyttötilanteissa, tehojen jakautumat laitteiden pinnoille ja säteilyn/konvektion tyypilliset osuudet saadaan laitevalmistajilta tai tietokannasta
- huonepintojen lämpötilat tai lämpövuodot eri säätilanteissa sekä ikkunasta tuleva auringon lämpökuorma saadaan energialaskennasta tai rakennussimulaatio-ohjelmasta.

Mallinnuksen tuloksena saadaan mm. ilman virtausnopeus, lämpötila ja epäpuhtauspitoisuudet koko tilassa. Tulosten arviointia varten niistä on hyödyllistä laskea lisäksi sisäympäristön laatua kuvaavia suureita. Näistä ehkä tärkein on vetoriski (Draught Rating, DR), joka kuvaa virtausnopeuden, lämpötilan ja turbulenssiasteen yhdessä aiheuttamaa vedon tunnetta. Tämä indeksi ilmoittaa niiden ihmisten prosentuaalisen osuuden, jotka mallin mukaan kokisivat vedon tunnetta kyseisessä tilanteessa. Vetoriski lasketaan kaavalla

$$DR = (34 - T_a)(V_o - 0.05)^{0.62} (37 \cdot I_o V_o + 3.14),$$

jossa  $T_a$  on ilman lämpötila,  $V_o$  on ilman keskinopeus ja  $I_o$  on virtauksen turbulenssiaste. Ilman keskinopeus ja turbulenssiaste ovat tässä ns. suuntariippumattomia arvoja. Niitä ei saada suoraan CFD-mallinnuksen tuloksena vaan ne on ensin laskettava muunnoskaavoilla.

## 5.2 Tavoitteet

Tässä osaprojektissa tavoitteena oli kehittää huonevirtausten ennustamisessa käytettäviä laskenta- ja mallinnusmenetelmiä.

Konvektiovirtausten osalta tavoitteena oli selvittää, miten lämmönlähteen pluumin ominaisuudet muuttuvat, jos

- lämpötehon jakautuminen lämmönlähteessä muutetaan tai
- häiriöt pääsevät vaikuttamaan pluumin muodostumiseen.

Lisäksi tutkittiin seuraavien todellisten laitteiden konvektiovirtauksia:

- keittiölaitteet
- piirtoheitin ja dataprojektori.

CFD-mallinnuksen osalta tavoitteena oli parantaa mallinnuksen käytettävyyttä suunnittelutyökaluna kehittämällä kahta ehkä tärkeintä ongelma-kohtaa:

- tuloilmalaitteiden mallinnusta ja
- lämmönlähteiden mallinnusta.

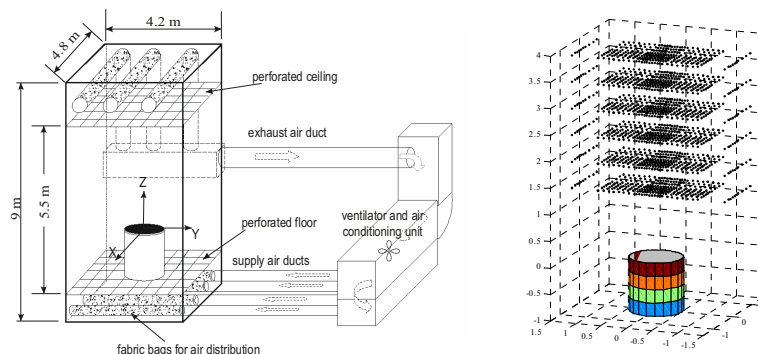
Virtual Space 4D -projektin päätavoitteeseen liittyen CFD-mallinnuksen tavoitteena oli myös

- testikohteiden CFD-mallinnus ja
- mallinnustulosten visualisointi.

### 5.3 Lämmönlähteen tehonjakauman vaikutus pluumiin

Tutkimusosio tehtiin yhteistyössä Ranskan työterveyslaitoksen INRS:n kanssa. Se käsitti mittaukset INRS:n laboratoriossa Nancy'ssa ja tulosten analysoinnin.

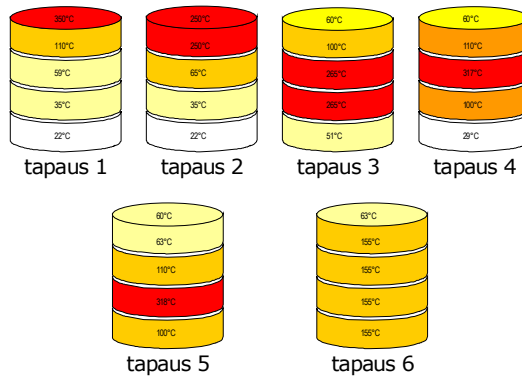
Lämmönlähteenä tässä tutkimuksessa oli sylinteri, jonka halkaisija oli 1000 mm, korkeus 1000 mm ja lämpöteho 4,5 – 5,2 kW, josta konvektiotehon osuus 3,1 – 3,8 kW. Sylinterin kehittämän pluumin ominaisuuksia mitattiin huoneessa, jossa tuloilma jaettiin tasaisesti alhaisella nopeudella lattiasta ja poistettiin katosta (kuva 5.2). Pluumi mitattiin termoelementtianturein siten, että saatiin yhtäaikainen mittaustulos koko mittaustasosta ja siten myös ajalliset lämpötilavaihtelut kussakin mittauspisteessä eli "kupliminen". Tämän perusteella voitiin tarkastella myös pluumin keskiakselin paikan vaihtelua eli "huojuntaa".



Kuva 5.2. Mittausjärjestelyt.

Sylinteri oli jaettu osiin siten, että sen pinnalla lämpötehon paikkaa voitiin varioida (kuva 5.3). Erilaisia tapauksia oli 6 kpl. Näin pluumin omi-

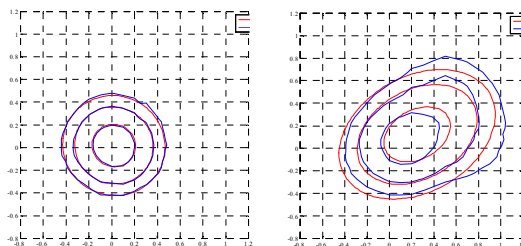
naisuuksia voitiin verrata eri tilanteissa pluumin kehitymispaikan perusteella.



Kuva 5.3. Lämmönlähteen lämpötilajakauma eri tapauksissa.

Pluumin lämpötilat mallinnettiin Gaussin jakaumaksi, jonka perusteella määritettiin pluumin leviäminen korkeuden funktiona ja virtuaaliorion paikka.

Tapauksissa 1 ja 2 malli oli ympyrän muotoinen ja muissa tapauksissa elliptinen (kuva 5.4). Elliptinen Gaussin jakauma otettiin käyttöön, koska pluumin poikkileikkaus oli muodoltaan soikea niissä tapauksissa, joissa pääosa lämmityksestä oli lämmönlähteen kyljessä. Pluumin aika-riippuvuutta mallinnettiin erilaisia mittausten aikakeskiarvoja käyttäen. Mittaustulosten perusteella virtuaaliorigo on 0,8 m tapauksessa 1 ja 1,2 m tapauksessa 2. Muissa tapauksissa se oli 2,4 - 2,6 m eli selvästi alempana.



Kuva 5.4. Pluumin muoto tapauksissa 1 ja 2 vasemmalla, muut tapaukset kuten oikealla.

Kaikissa mittauksissa pluumin leveyden muutos voitiin mallintaa lineaarisesti korkeuden funktiona olettamalla soviteissa pluumin aukenemisen kulmakertoimeksi 0,1. Mittaukset osoittivat, että yleisesti käytetyt pluumikaavat soveltuvat pluumin mallintamiseen, kunhan virtuaaliorion korkeusasema arvioidaan oikein. Virtuaaliorion arviointiin tarvittavat kaavat kaipaavat kuitenkin tarkentamista, etenkin laskettaessa pluumin ilmavirtaa lähellä lämmönlähdettä, sillä väärästä arvioinnista syntyvä virhe voi olla hyvinkin suuri.

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että määräävä tekijä korkeuteensa nähden leveän kolmiulotteisen lämmönlähteen virtuaaliorion sijainnille

on, kuinka suuri osuus lämpötehosta sijaitsee sen yläpinnassa. Tarkempien johtopäätösten tekeminen vaatii kuitenkin jatkotutkimuksia. Lisäksi voitiin todeta pluumin olevan herkkä häiriöille, joita joissakin tapauksissa esiintyi, vaikka virtausolosuhteet huoneessa oli järjestetty mahdollisimman tasaisiksi.

Tutkimuksia jatketaan muiden hankkeiden yhteydessä INRS:ssa siten, että myös virtausnopeudet mitataan. Myös suorakaiteen muotoisia lämmönlähteitä tullaan tutkimaan.

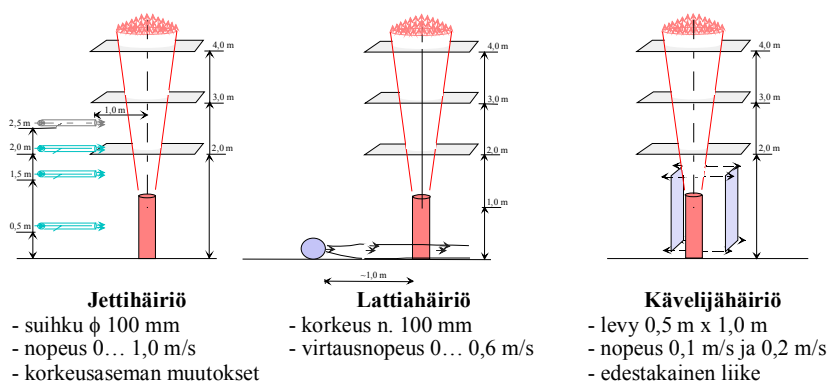
## 5.4 Häiriön vaikutus pluumiin

Tutkimusosiossa tavoitteena oli selvittää, miten erilaiset häiriöt vaikuttavat pluumin ominaisuuksiin. Lähinnä käytännön tarvetta palvelee ilmavirran muuttuminen häiriöiden vaikutuksesta. Mittaukset suoritettiin koehuoneessa Työterveyslaitoksessa Turussa.

Lämmönlähteenä oli mattamustaksi maalattu sylinteri, jonka korkeus oli 1250 mm ja halkaisija 315 mm. Sylinterin lämpötehoa vaihdeltiin 150 - 900 W, josta konvektion osuus oli n. 40 %. Pluumin ominaisuudet mitattiin kooltaan 2,1 m x 1,8 m tasoilta 2 m, 3 m ja 4 m korkeudelta lattiapinnasta sekä osittain lisäksi pystytasolta.

Häiriöinä pyrittiin käyttämään tapauksia, joita esiintyy jossakin muodossa käytännössäkin (kuva 5.5). Häiriön maksimi haettiin siten, että pluumi pysyi mitattavissa olevalla alueella.

1. Ilmasuihku (jettihäiriö), jota esiintyy tuloilmasuihkujen yhteydessä
2. Lattivirtaus (lattiahäiriö), jota esiintyy piennopeusilmanjaon ja oviaukoista tulevan ilmavuodon yhteydessä
3. Edestakaisin liikkuva tasolevy (kävelijähäiriö), jolla mallinnettiin ihmisen työskentelyä ja liikkumista lämmönlähteen yhteydessä.

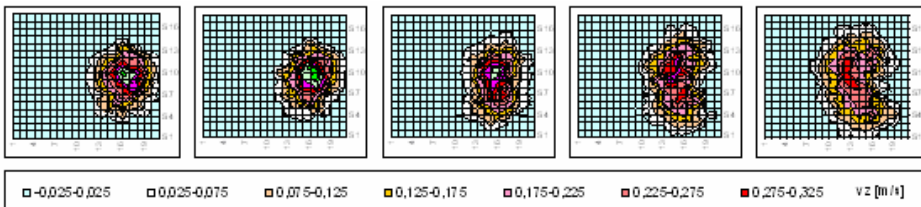


Kuva 5.5. Häiriötyypit ja niiden voimakkuus.

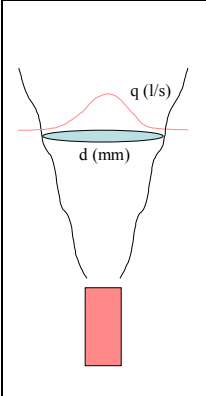
Lämmönlähteen kehittämä pluumi mitattiin ensin häiriöttömänä ja sen jälkeen häiriöiden vaikutuksen alaisena. Siitä mitattiin eri tasoilla 100 mm x 100 mm gridillä lämpötila ja nopeus, joiden avulla määritettiin ilmavirta, liikemäärävirta, halkaisija, virtuaaliorigo ja konvektioteho.

Säteilytehoa varten mitattiin lisäksi sylinterin ja muiden pintojen lämpötilat. Konvektiovirtauksen lämpötila ja nopeus vaakatasossa mallinnettiin Gauss-sovituksella. Virtuaaliorigo määritettiin häiriöttömässä tapauksessa ja pidettiin sen jälkeen vakiona. Ilmavirta ja liikemäärävirta mallinnettiin pistelähteen yhtälöillä, joiden etukertomille haettiin kussakin häiriötapauksessa arvot, jotka kuvaavat ilmavirran ja liikemäärävirran suuruutta.

Lopputuloksien perusteella pluumin ilmavirta on suurempi, kun siihen kohdistetaan häiriö. Tämä ilmavirran kasvu osoittautui muuttuvan suhteessa häiriön suuruuteen. Pluumin halkaisija kasvoi samassa suhteessa kuin ilmavirta, joten häiriön vaikutuksesta pluumi leviää. Kuvassa 5.6 on esitetty mittaustulos, jossa häiriön voimakkuuden kasvun vaikutus näkyy pluumin muodossa. Kuvassa 5.7 on esitetty yhteenvetotaulukko lopputuloksista eri häiriöillä.



Kuva 5.6. Jettihäiriön vaikutus pluumiin. Nopeus vaakatasolla 3 m korkeudella lämpöteholla 594 W. Häiriönopeudet vasemmalta 0 m/s, 0,25 m/s, 0,5 m/s, 0,75 m/s ja 1,0 m/s.

	<p><b>Jettihäiriö</b></p> <p>Ilmavirran ja halkaisijan kasvu</p> <p>0..60 %</p>	<p><b>Lattiahäiriö</b></p> <p>Ilmavirran ja halkaisijan kasvu</p> <p>0..15 %</p>	<p><b>Kävelijähäiriö</b></p> <p>Ilmavirran ja halkaisijan kasvu</p> <p>0..40 %</p>
---	---	--	--

Kuva 5.7. Häiriön vaikutus pluumin ominaisuuksiin.

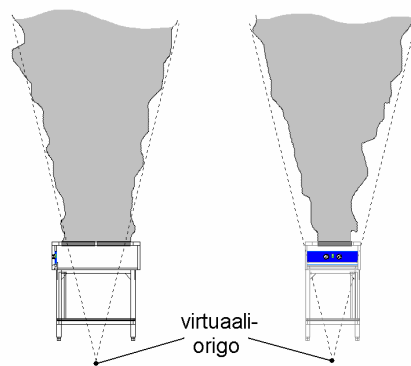
Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että käytännön suunnittelussa tavanomaisten pluumiyhtälöiden ilmavirtaan tulisi aina lisätä 10 - 50 %, koska todellisissa tilanteissa pluumit ovat aina häiriintyneitä. Häiriöttömän pluumin aikaansaamiseen tarvitaan jopa hyvät laboratorio-olosuhteet.

## 5.5 Laitteiden pluumit

### Keittiölaitteet

Jotta suurkeittiölaitteiden konvektioilmavirtojen mukana kulkeutuvat lämpö ja käryt pystyttäisiin keräämään ja poistamaan mahdollisimman tehokkaasti, on keittiöiden ilmanvaihtoa suunniteltaessa pystyttävä enustamaan laitteiden pluumien ilmavirrat eri korkeuksilla mahdollisimman tarkasti.

Osaprojektin päätarkoituksena olikin selvittää pluumien ilmavirtojen ja niiden kuljettamien konvektiotehojen käyttäytyminen. Tätä varten mitattiin kuuden eri keittiölaitteen pluumien nopeus- ja lämpötilajakaumia, ja mittaustulosten perusteella modifioitiin pistelähteen pluumikaavaa (siinä esiintyvää virtuaaliorigon paikkaa) siten, että se selitti havaitut ilmavirrat mahdollisimman hyvin (kuva 5.8).



Mallinnus pistelähteen pluumiyhtälöllä, johon on lisätty kerroin  $a$

$$q = 5.0 \times 10^{-3} P_c^{1/3} (z + aD_n)^{5/3}$$

Vakio  $a$  on laitekohtainen.

- Ei riipu laitteen kuormituksesta.
- Ei riipu tehosta.

Kuva 5.8. Keittiölaitteiden virtuaaliorigon mallintaminen pluumiyhtälöllä.







Kokeiden perusteella saatiin selville myös pluumien koot ja muodot. Mittattavat laitteet olivat:

- Futura RP2 -valurautaliesi
- Ardox S2 -yhtenäistasoliesi ("kromiliesi")
- Metos 40SCG3S -kaasuliesi nestekaasusuuttimin varustettuna
- Base-Line 5000D -induktioliesi
- Frita8-rasvakeitin
- Griddle-Line 3500 -induktioparila.

Virtuaaliorigon sijainti riippuu käytetystä keittiölaiteesta. Se määräytyy laitteen geometrian, ja erityisesti sen kuumien pintojen muodon perusteella. Pluumi ei ole täysin kehittynyt lähellä laitetta eikä vastaa muodoltaan pistelähteen synnyttämää. Mittaustulosten perusteella pluumin ilmavirtaa voidaan silti mallintaa pistelähteellä, kunhan virtuaaliorigon paikka valitaan huolellisesti.

Vaikka pluumien mukanaan kuljettama konvektioteho saataisiinkin poistettua pluumin mukana, laitteiden tuottama säteilylämpö jää huoneeseen kuormittamaan työntekijöitä ja se on poistettava perusilmanvaihdolla. Koesarjassa tutkittiinkin, miten laitteiden kuluttama sähkö-

teho jakautuu konvektion ja säteilyn, sekä kuormitustilanteessa myös hyötätehon kesken. Lisäksi mitattiin lämpötilan kerrostuminen koehuoneessa. Säteilyyvaikutusta tutkittiin myös mittaamalla operatiivinen lämpötila (säteilyn ja ilman lämpötilan yhteisvaikutus) oletetuissa työskentelypisteissä laitteiden edessä. Tulokset on esitetty kuvassa 5.9.

Laite / liitännä- teho [kW]	Kuorm- tilanne	Konv. teho [W]	Sät. teho [W]	Hyöty- teho [W]	Ilma- virta 1,6 m [l / s]	Oper. lämpöt 1,4 m [°C]
 Valurautaliesi 6,0	tyhjä käyttö	1640	3530	-	220	43
	veden keitto	790	1090	3570	200	28
 Yhtenäis- tasoliesi 7,0	tyhjä käyttö	1110	1390	-	230	24
	veden keitto	1060	1240	3970	280	25
 Kaasuliesi 5,5	veden keitto	1730	630	2270	220	27
 Induktioliesi 10,0	veden keitto teho 8	17	750	2920	150	22
 Rasva- keitin 6,9	tyhjä käyttö 180 °C	240	370	-	140	21
 Induktioparila 4,0	tyhjä käyttö 210 °C	250	610	-	150	24
	Kanan paisto 210 °C	240	< 1800	> 1200	150	25

Kuva 5.9. Keittiölaitteiden mittaustulokset

Lämpötilan kerrostuminen koehuoneessa oli karkeasti ottaen sitä voimakkaampaa, mitä suurempi oli laitteen säteilyteho.

Korkeimmat operatiiviset lämpötilat mitattiin valurautalieden vierestä, varsinkin tyhjäkäyttötilanteessa laitteen toimiessa kuormittamattomana. Myös kaasuliedellä mitattiin epämiellyttävän kuormituksen rajana kes-



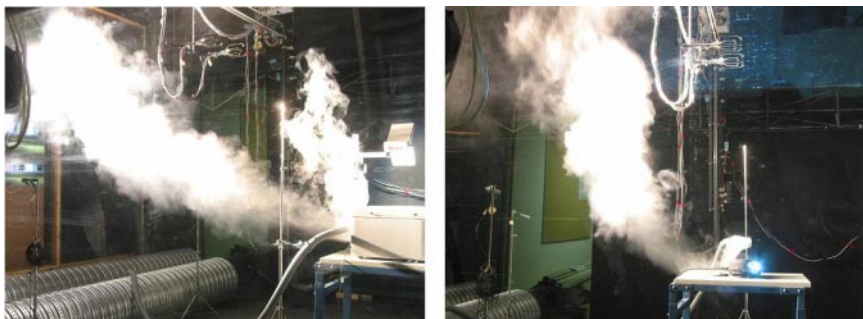
kiraskaassa työssä pidettävää 28 °C korkeampia arvoja. Yhteistä näille laitteille on, että niissä esiintyy hyvin kuumia, voimakkaasti säteileviä kohtia (mustat keittolevyt ja kaasuliekit). Myös yhtenäistasolieden työtasolta mitattiin hyvin korkeita pintalämpötiloja, mutta sen kiiltävä pinta vähensi säteilyä merkittävästi.

Liesien kuormituskokeet suoritettiin aina keittämällä liedellä vettä kahdessa suuressa kattilassa. Tällöin myös pluumi-ilman kosteusjakaumat mitattiin. Nämä jakaumat lähestyivät pistelähteen tuottamaa jakaumaa vielä hitaammin kuin nopeus- ja lämpötilajakaumat. Kuormituskokeissa laskettiin myös laitteiden hyötytehot veden höyrystymisnopeuden perusteella.

### Piirtoheitin ja dataprojektori

Piirtoheitin ja dataprojektori edustavat tavanomaisia lämmönlähteitä erilaisissa toimisto-, liike- ja opetustiloissa. Laitteiden kehittämät konvektiovirtaukset ovat pääasiassa pakotetun konvektion aikaansaamia. Niiden sisältämien lampujen jäähdyttämiseen tarvitaan laitepuhaltimia, jotka puhaltavat ilman ulos pieneltä poikkipinnalta, jolloin nopeudet ovat suhteellisen suuria.

Kuvan 5.10 savukoe osoittaa, että piirtoheittimen lämpö tulee osittain luonnollisena konvektiona, mutta pääosin pakotettuna ilmasuihkuna. Dataprojektorin synnyttämä konvektiovirtaus on pelkästään pakotettua konvektiota.



*Kuva 5.10. Piirtoheittimen ja dataprojektorin synnyttämät ilmapirtaukset savuvisualisointina.*

Mittaustulokset on koottu taulukkoon 5.3. Säteilyn osuus lämmönluovutuksesta on hyvin pieni ja konvektiovirtauksen ilmapirta suhteellisen suuri. Piirtoheittimellä vapaan konvektion osuus koko konvektiosta on vain 7 %. Samaa taulukkoon on vertailun vuoksi lisätty häirityn pluumin tutkimuksen yhteydessä käytetyn sylinterin  $\phi 315 \text{ mm} \times 1250 \text{ mm}$  vastaavat mallinnetut arvot.

*Taulukko 5.3. Piirtoheittimen ja dataprojektorin mittaustulokset, ilmavirta 2 m korkeudella lattiasta. Vertailuarvoina mallinnetut sylinterin arvot.*

Laite	Sähköteho [W]	Säteilyteho [W]	Konvektioteho [W]	Ilmavirta [l/s]
Piirtoheitin	315	30	280	230
Sylinteri	297	181	116	59
Dataprojektori	149	7	125	113
Sylinteri	148	98	50	45

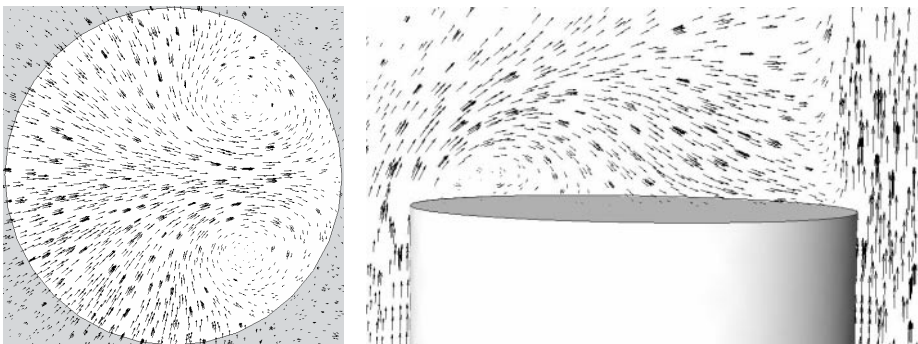
Tutkimus osoitti, että todellinen konvektioilmavirta on selvästi suurempi kuin vapaan konvektion kaavoilla laskettu. Toisaalta pakotetullakin konvektiolla syntynyt pluumi nousee huonetilan yläosaan, jolloin sen sekoittava vaikutus huonetilan virtauksiin on hyvin merkittävä.

## 5.7 Lämmönlähteiden CFD-mallinnus

Lämmönlähteiden aiheuttamien konvektiovirtausten mallinnuksen realistisuus on tärkeää huonevirtausten CFD-mallin oikeellisuuden kannalta. Konvektiovirtaukset vaikuttavat tilan virtauskenttään ja tilaan syntyvään lämpötilakerrostumaan. Osaprojektin tavoitteena oli verrata sylinterilähteen mallinnustuloksia mittauksiin häiriöttömässä ja häiriöllisessä tilanteessa sekä kehittää menetelmiä mallinnuksen parantamiseksi.

Mallinnettavaksi valittiin yksi mittaustapaus Häirityt pluumit -osaprojektista, josta saatiin mittaustulokset häiriöttömälle ja häiritylle pluumille. Tutkitussa tapauksessa sylinterin lämmitysteho oli 594 W. Mittauksista saatiin myös säteilyn osuus lämpötehosta, joka oli 60 %. Säteilytehon jakautuminen huonepinoille laskettiin sylinterin eri osien pintalämpötilojen ja huonepintojen näkyvyyskertoimien avulla. Lattialle määriteltiin tätä varten rengasmaiset alueet sylinterin ympärille. Laskennallinen säteilyteho annettiin CFD-mallissa näille pinoille konvektiotehoksi, jolloin vältyttiin säteilymallin käytöltä ja siihen mahdollisesti liittyviltä virheiltilä. Tuloilma tuotiin alhaisella nopeudella lattiapinnasta ja poistot oli sijoitettu katon läheisyyteen.

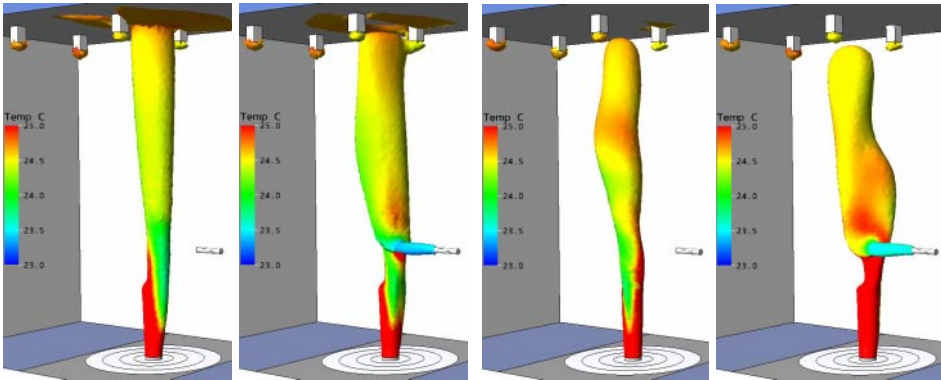
Mallinnustyökaluna käytettiin Ansys CFX 10.0 -ohjelmistoa. Laskentaverkon koko oli 120 000 kappaletta. Laskentaverkkoa tihennettiin pluumin alueella ja erityisesti sylinterin yläpinnan lähellä. Sylinterin ja huonepintojen läheisyyteen tehtiin prismakerrokset virtausprofiilin tarkkuuden parantamiseksi. Kuvassa 5.21 on havainnollistettu mallinnettu virtauskenttä sylinterin yläpinnan läheisyydessä. Alueelle muodostuu pyörteitä, jotka aiheuttavat pluumin epäsymmetrisyyden ja joiden vaihtelu on lähteenä pluumin epästabiilisuudelle.



Kuva 5.21. Mallinnettu virtauskuva sylinterin päällä. Vasemmalla vaakataso 5 cm sylinterin yläpuolella, oikealla pystytaso sylinterin keskilinjalla.

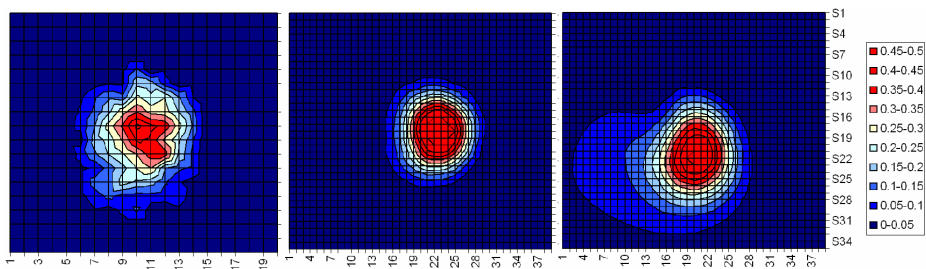
Pluumin mallinnus tehtiin ensin  $k-\epsilon$  mallilla, jolla testattiin laskentaverkon riittävä tiheys ja mallinnustuloksen suppeneminen. Sen jälkeen mallinnus toistettiin samalla laskentaverkolla käyttäen muita turbulenssimalleja, joita olivat SST-malli, RNG- $k-\epsilon$  -malli sekä SSG Reynolds Stress -malli. Vastaavat laskennat toistettiin tämän jälkeen häiriöllisessä tilanteessa. Siinä pluumiin kohdistui metrin etäisyydeltä 2 m korkeudelta putken päästä (halkaisija 10 cm) tuleva tuloilmasuihku, jonka lähtöno-

peus oli 0,75 m/s. Mallinnetut pluomit kahdella turbulenssimallilla laskettuina ( $k-\varepsilon$  ja SST) on esitetty kuvassa 5.22.

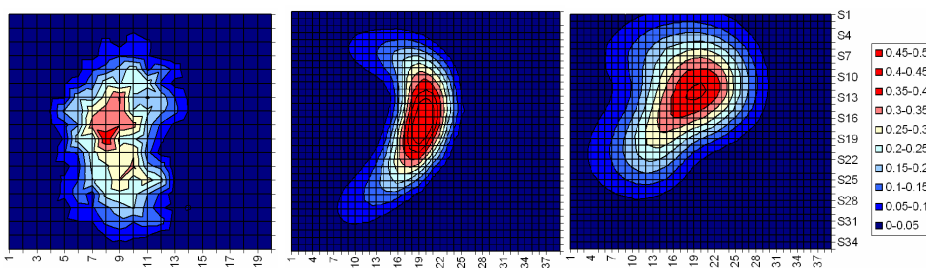


Kuva 5.22. Mallinnettu pluumi häiriöttömässä tilanteessa ja ilmasuihkun kanssa. Vasemmanpuoleiset kuvat laskettu  $k-\varepsilon$  ja oikeanpuoleiset SST-turbulenssimallilla.

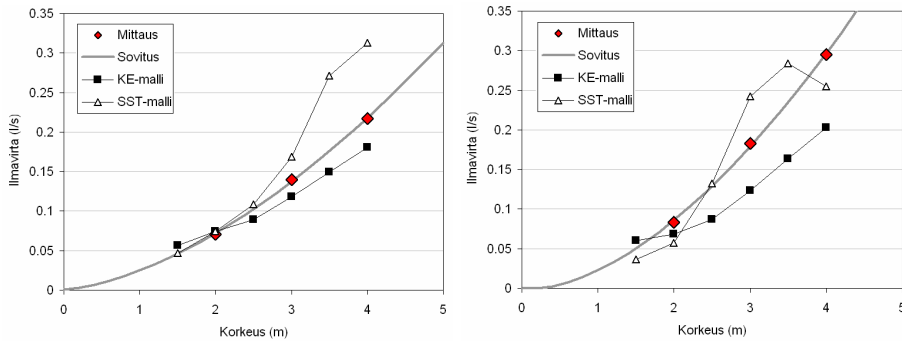
$k-\varepsilon$  -mallilla saatiin tulokseksi stabiili pluumi ja laskenta suppeni hyvin. Muilla turbulenssimalleilla sen sijaan suppeneminen oli huono ja pluumin muoto vaihteli laskennan kuluessa. Laskenta toistettiin myös aikariippuvana, jolloin nähtiin pluumin ajallinen käyttäytyminen eri malleilla. Kuvissa 5.23 ja 5.24 on esitetty pluumin virtausnopeuden jakauma 3 m korkeudella mittauksissa sekä  $k-\varepsilon$  ja SST-malleilla häiriöttömässä ja häirityssä tapauksessa. Kuvassa 5.25 on laskettu pluumin ilmapirran kehittyminen korkeuden funktiona.



Kuva 5.23. Häiriöttömän pluumin nopeusjakauma 3 m korkeudella. Vasemmalla mittaus-tulos, keskellä  $k-\varepsilon$  ja oikealla SST-turbulenssimallilla lasketut tulokset.



Kuva 5.24. Häirityn pluumin nopeusjakauma 3 m korkeudella. Vasemmalla mittaus-tulos, keskellä  $k-\varepsilon$  ja oikealla SST-turbulenssimallilla lasketut tulokset.



Kuva 5.25. Häiriöttömän (vas.) ja häirityn (oik.) pluumin ilmavirta korkeuden funktiona.

Mallinnustuloksista nähdään, että yleisimmin käytetyllä  $k-\varepsilon$  -mallilla saatiin häiriöttömässä tilanteessa kapea ja ilmavirraltaan jonkin verran liian pieni pluumi, jonka maksiminopeus oli liian korkea. Häiriöllisessä tilanteessa mallinnettu ilmavirta jäi jo huomattavasti liian pieneksi.  $k-\varepsilon$ -mallin tuloksia saatiin jonkin verran parannettua käyttämällä mallin nostetermiä, jolloin pluumin leveneminen ja ilmavirta hieman kasvoivat. SST-mallilla häiriöttömän pluumin ilmavirta taas saatiin liian suureksi. Häiriöllisessä tilanteessa SST-malli osui paremmin kohdalleen, mutta ratkaisun epästabiilisuudesta johtuen ilmavirta ei kasvanut tasaisesti korkeuden lisääntyessä. Pluumin leveys ja maksiminopeus osuivat SST-mallilla  $k-\varepsilon$  -mallia paremmin kohdalleen. Muilla testatuilla turbulenssimalleilla (RNG  $k-\varepsilon$  ja SSG Reynolds Stress) tulokset olivat lähempänä  $k-\varepsilon$  -mallia kuin SST-mallia, mutta eivät osuneet näitä paremmin yhteen mittaustulosten kanssa. Myöskään ajasta riippuvalla laskennalla tehdyillä kokeilla ei tuloksia saatu merkittävästi parannettua.

Yhteenvetona näistä kokeista voidaan todeta, että lämmönlähteiden aiheuttamat konvektiovirtaukset ovat varsin monimutkainen ajasta riippuva ilmiö, jonka mallinnuksen tarkkuuden parantamiseen on jatkossa kiinnitettävä enemmän huomiota.

## 5.10 Johtopäätökset

Projektin ilmajähtymis-olosuhteiden tärkeimmät johtopäätökset olivat seuraavat:

Konvektiovirtaukset:

- Lämpötehon jakautuminen lämmönlähteen eri osiin voi vaikuttaa olennaisesti konvektiovirtauksen ilmajähtymiseen.
- Laitteiden konvektiovirtaukset riippuvat niiden todellisesta konvektioolosuhteesta, muodosta ja muista laitekohtaisista tekijöistä.
- Keittiölaitteiden konvektiovirtaukset eivät noudata standardipluunkaavaa vielä normaalin huonekorkeuden puitteissa, vaan kaavaan tarvitaan laitekohtainen korjauskertoimen.
- Häiriövirtaukset kasvattavat lämmönlähteen konvektiovirtausta, mikä täytyy huomioida ilmastoinnin mitoituksessa.
- Projektissa tutkituilla häiriötyypeillä ja -voimakkuuksilla konvektiovirtauksen kasvu oli 15 - 60 %.