

MUISTIO No CFD/TERMO-33-2000 pvm 10. maaliskuuta, 2000

OTSIKKO

Activent-tuloilmalaitteen CFD-mallinnus
Yksinkertaistetut tuloilmalaitemallit

LAATIJA(T)

Juhaveikko Ala-Juusela

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena on löytää keinoja Activent-suutinkanavan mallintamiseksi huonetilavirtausten numeerisessa laskennassa. Tarkoitusta varten kehitettiin kaksi tuloilmalaitteen perusmallia ja laskettiin näillä useilla erilaisilla modifikaatioilla. Tuloksia on verrattu vastaaviin mittaustuloksiin.

PÄÄKOHDAT

Molemmilla malleilla saatiin tyydyttäviä tuloksia koehuoneen virtauskentästä. Lupaavimmalta vaikutti geometrialtaan yksinkertaisempi malli, vaikkakin virtauskenttä oleskeluvyöhykkeellä oli monimutkaisemmassa mallissa hieman parempi.

SIVUJA

29

AVAINSANAT

Activent, FINFLO, suihku, $k - \epsilon$ -turbulenssimalli

TARKASTANUT

Timo Siikonen 10. maaliskuuta, 2000

Sisältö

1	Johdanto	2
2	Laskenta-alueet ja laskentahilat	2
2.1	Suuttimet irti putken pinnasta	4
2.2	Suuttimet kiinni putken pinnassa	5
3	Reunaehdot	6
3.1	Tuloilmalaitteet	6
3.1.1	Putken pinnasta irti olevat suuttimet	6
3.1.2	Putken pinnassa olevat suuttimet	7
3.2	Lämpöreunaehdot	8
4	Tulokset	8
4.1	Laskenta	8
4.2	Suuttimet irti putken pinnasta	8
4.3	Suuttimet putken pinnassa, putken päällä symmetriataso	16
4.4	Suuttimet putken pinnassa, putken sivuissa virtauksen irroittavat rivat	22
5	Yhteenveto	28

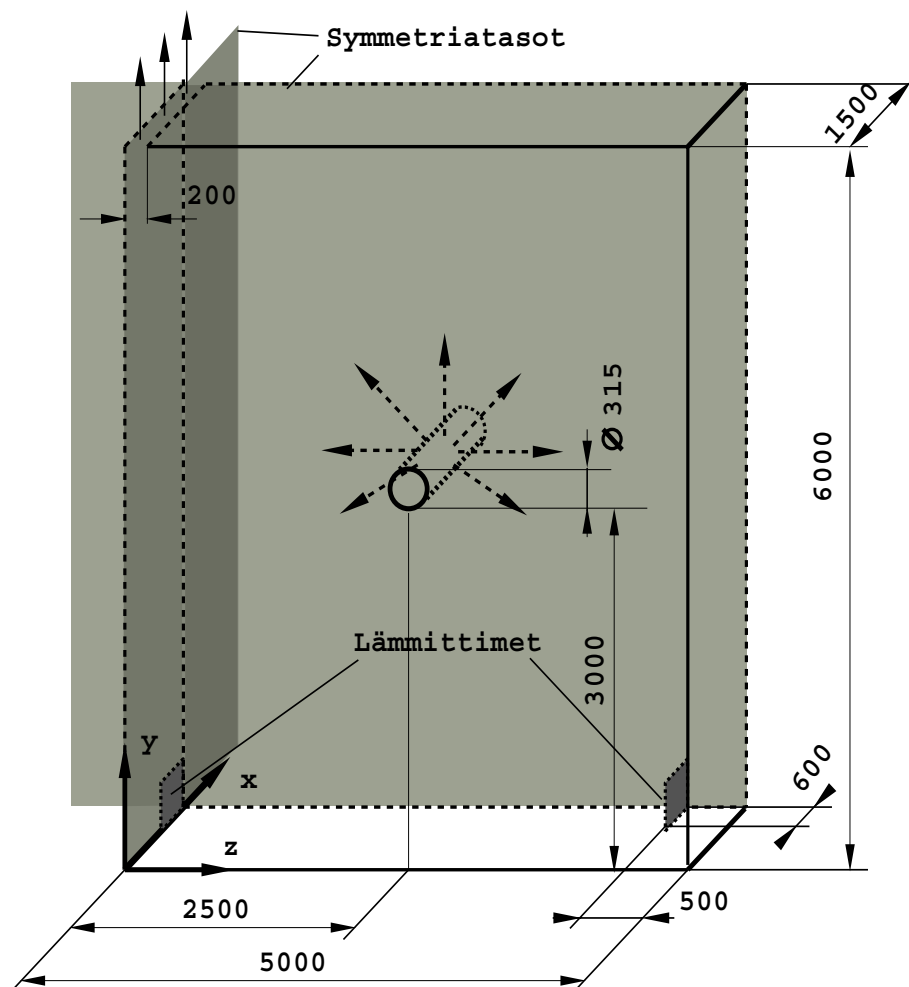
1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on löytää keinoja Activent-suutinkanavan mallintamiseksi huonetilavirtausten numeerisessa laskennassa. Aikaisemmassa muistiossa [1] on esitetty yhden suutinrivin laskenta jokainen suutin erikseen mallintuen. Tässä muistiossa on laskettu symmetriatasoilla neljäsosaan jaettua mitaushuonetta ja kokeiltu tähän tapaukseen reunaehtojen antotapoja siten, että koppimäärä pysyisi kohtuullisena. Koska reaali maailmaa vastaavaa geometriaa ei voinut käyttää laskentahilan koon rajoitusten vuoksi, turvaututtiin erilaisiin monimutkaisia tuloilmalaitteita kuvaaviin ratkaisuihin. Työn edetessä kokeiltiin useita erilaisia tapoja tuloilmalaitteen mallintamiseksi. Yhden suutinrivin laskennan ja savukokeiden perusteella näyttää selvältä, että putken pintaa ylös kiipeävällä sekundäärivirtauksella on suuri merkitys virtauskentän muodostumiselle tuloilmalaitteen ympärille. Toisaalta hilan laskentatilavuusmäärä jää huomattavasti pienemmäksi jos on mahdollista käyttää geometriaa joka mahdollistaa koppien koon muuttumisen huoneen keskustaa kohti. Tästä syystä ensimmäisessä kokeilussa suutinkanava yritettiin mallintaa pitkällä suuttimilla, jotka olivat irti kanavan pinnasta. Eri suutinmäärillä laskettaessa parhaaksi suutinmääräksi havaittiin kaksi. Suuttimien siirtämisen alemmas ja kiinni putken pinnalle arveltiin tuottavan varsin samanlaisen virtauskentän. Virtaus huoneessa muuttui kuitenkin epästabiiliksi, jolloin kokeiltiin kahta stabiloivaa rakennetta, symmetriatasoa kanavan päällä ja virtauksen putken pinnasta irroittavia tasoja.

2 Laskenta-alueet ja laskentahilat

Koko mittaushuone voidaan jakaa symmetriatasoilla neljään osaan. Tällöin laskenta-alueen koko on $6 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$. Kaaviokuva laskenta-alueesta on kuvassa 1. Ongelmallista laskennan laajentamisessa käsittämään tuloilmalaitteen puolikasta on tarkassa mallintamisessa tarvittava laskentakoppien suuri määrä. Jos suutinrivit olisi mallinettu yhden suutinrivin laskentaa [1] vastaavalla tavalla, olisi neljännehuoneen laskentaan tarvittu lähes 9 miljoonaa koppia. Suutinkanavan laskennan keskeisenä ongelmana on saada syötettyä laskentatilaan oikea määrä oikean lämpöistä ilmaa siten, että sisään virtaava ilma leviäisi ja sekoittuisi todellisuutta vastaavalla tavalla.

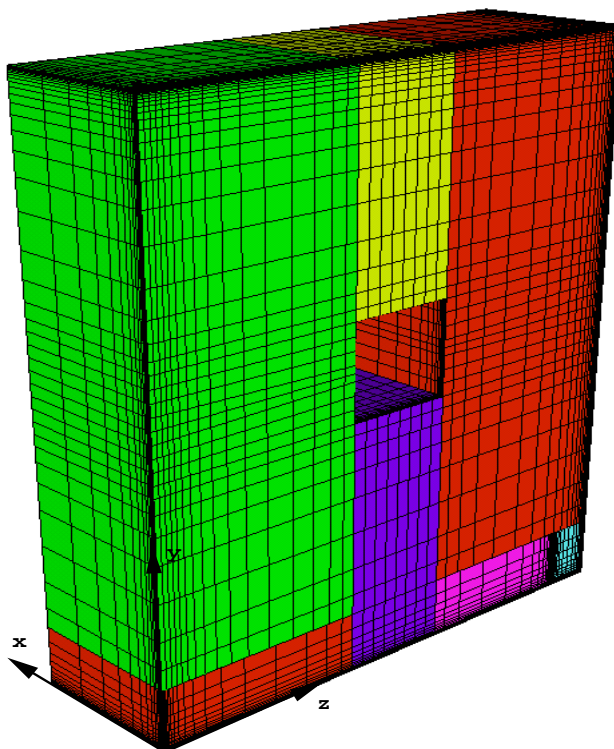
Laskentaa voitaisiin yksinkertaistaa antamalla tuloilmalaitteen reunaehdot riittävän etäällä kanavan pinnasta. Tällöin on kuitenkin tiedettävä virtausnopeus tällä pinnalla, paljonko suihkuihin sekoittuu jo huoneessa olevaa sekundääri-ilmaa ja otettava huomioon sekundääri-ilman tuloilmasta poikkeava lämpötila. Tuloilmalaitteen mallissa on otettu lähtökohdaksi, että edellä mainittuja tietoja ei tarvita. Samalla on huomioitu savukokeissa ja yhden suutinrivin laskennassa näkyvä sekundääri-ilman nousu pintaa pitkin suuttimien välissä putken yläosaan. Tuloilmalaitte on mallinnettu putkipinnalla sekä koko putken pituisilla suuttimilla. Tällöin laskentakopit voivat laajentua seinältä



Kuva 1: Laskenta-alueen mitat

kohti huoneen keskustaa, jolloin niitä tarvitaan huomattavasti vähemmän.

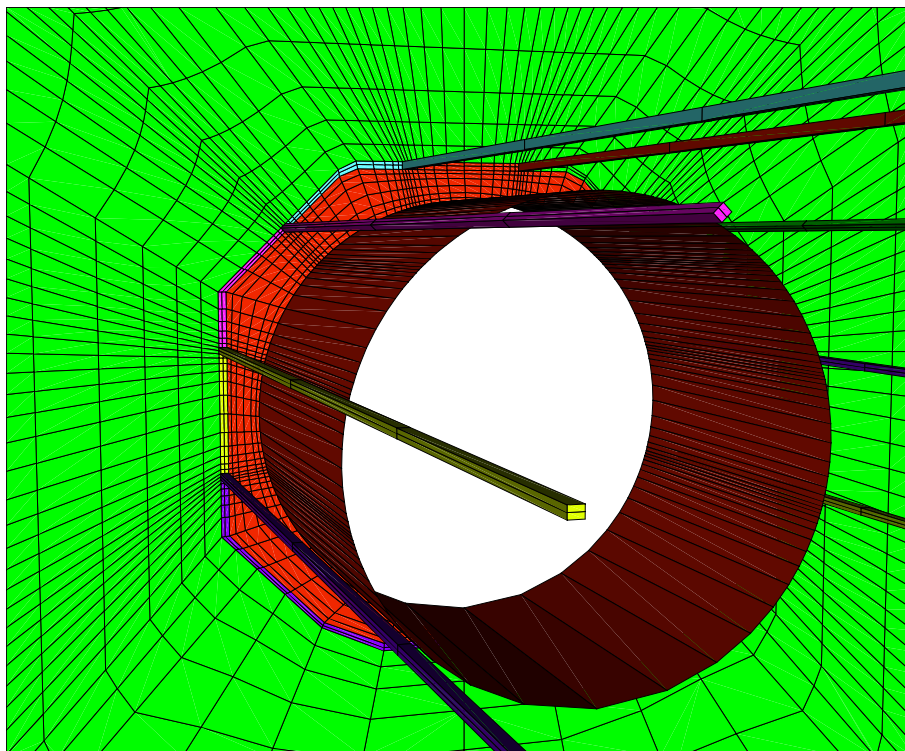
Tässä työssä käytetyissä laskentahiloissa on seitsemän yhteistä lohkoa, jotka ympäröivät tuloilmalaitteen sisältävää $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ lohkopakettia. Tämä paketti on liitetty kummassakin mallissa ympäröiviin seitsemään lohkoon ns. non-matching reunaehtoa käyttäen, jolloin hilaviivojen ei tarvitse olla lohkorajan yli jatkuvia. Tällöin laskentahila voi olla paikallisesti tiheämpi. Laskenta-alueen alareunassa on olevat lämmityslaitteiden korkuiset kolme lohkoa on liitetty yläpuolella oleviin lohkoihin myös käyttäen non-matching reunaehtoa, jotta lämmittimien kiinteiden pintojen vaatimat tihentymät eivät nosta koppimäärää koko laskentahilassa. Kaavio seitsemästä yhteisestä lohkosta on kuvassa 2.



Kuva 2: Kaikissa simuloinneissa käytetyt laskentalohkot. Kuvassa on piirrettynä joka toinen hilaviiva.

2.1 Suuttimet irti putken pinnasta

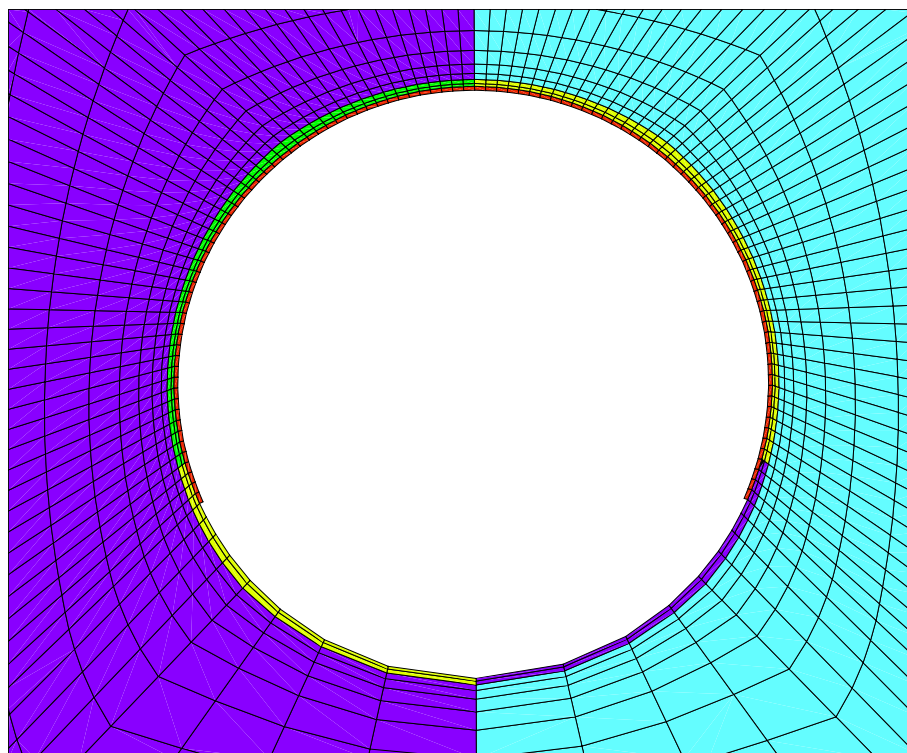
Samaa laskentahilaa käytettiin kaikissa tuloilmalaitemalleissa, joissa tuloilmalaitteen mallina on putken pinnasta irti olevat pitkät suuttimet. Putki on ympäröity O-tyyppisellä, ulkopuolelta kahdeksankulmaisella lohkokolla. Siihen kiinnittyvät pienet välilohkot, joiden tarkoituksena on sekä liittää putkea ympäröivä lohko ulommaiseen tuloilmalaitetta ympäröivään lohkoon että jättää tilaa suuttimien inlet-lohkoille. Suuttimia kuvaavia Inlet-lohkoja on putken ympärillä kahdeksan kappaletta. Näistä neljä osoittaa suoraan sivulle, kaksi 45° asteen kulmassa ylöspäin ja kaksi suoraan ylöspäin. Rakenteesta tulee melko monimutkainen, laskentalohkoja on kaikille malleille yhteisten lohkojen lisäksi 19, kun inlet-lohkot lasketaan mukaan. Laskentakoppeja on yhteensä 624 896. Kuvassa 3 on tuloilmalaitetta kuvaavat ja ympäröivät lohkot siten, että laskentalohkoista on kuvassa vain symmetriatasojen ja putken pinta kun taas inlet-lohkot on kuvattu ulkopinnalta. Putken pinta ja inlet-lohkot on katkaistu kuvan selkeyttämiseksi.



Kuva 3: Tuloilmalaitetta kuvaavat ja ympäröivät laskentalohkot. Kuvassa joka toinen hilaviiva.

2.2 Suuttimet kiinni putken pinnassa

Tässä tapauksessa inlet-lohko on yksi yhtenäinen lohko, johon annetaan eri osiin erilainen nopeusjakauma. Putken pinnasta ulospäin on neljään osaan jaettu 4 kopperiviä paksu lohko, jonka tarkoituksena on mahdollistaa erilaisten mallien kokeileminen. Näiden ja kaikille malleille yhteisten lohkojen välissä on samasta syystä kahteen osaan jaettu lohko. Kuvassa 4 on yksi pinta putken ympärillä olevista lohkoista. Lohkot jatkuvat samanlaisina läpi laskettilavuuden. Laskentakoppeja on koko hilassa yhteensä 577 536.



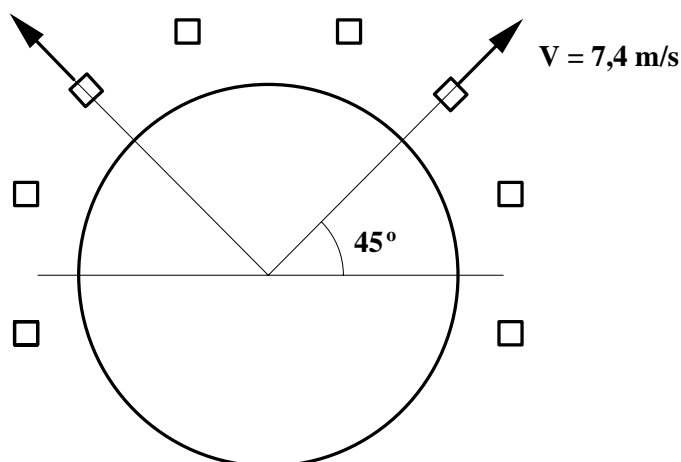
Kuva 4: Tuloilmalaitetta kuvaavat ja ympäröivät laskentalohkot. Inlet-lohko on kuvassa punaisella. Kuvassa on joka toinen hilaviiva.

3 Reunaehdot

3.1 Tuloilmalaitteet

3.1.1 Putken pinnasta irti olevat suuttimet

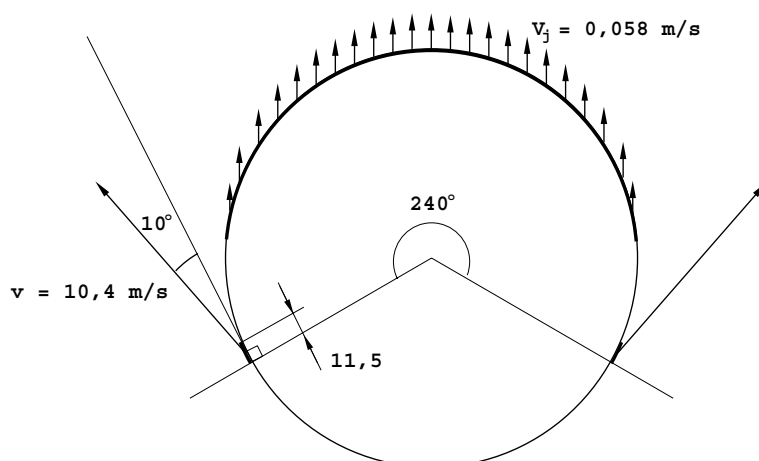
Lasketakoppien kokonaismäärä rajoitti pitkien suutinten leveyden tietylle tasolle. Tällöin kahdeksaa suutinta käytettäessä liikemäärävirta oli liian alhainen verrattuna todelliseen tilanteeseen. Tämän vuoksi kokeiltiin erilaisia suutinmääriä. Paras tulos saavutettiin kahdella suuttimella, jolloin suuttimista saatiin riittävä liikemäärä ja toisaalta massavirta. Suuttimista ulostulevan ilman nopeus on koko suuttimen pituudella sama. Turbulenssin intensiteettinä on käytetty 30 % ja turbulentin ja laminaarin viskositeetin suhteena 1000. Nämä arvot ovat melko suuria. Niiden avulla on pyritty saamaan suihkuun vastaavaa hidastuvuutta ja leviämistä kuin pinta-alaltaan moninkertaisen suutinkanavan tapauksessa. Kaavio tuloilmalaitteen reunaehdoista esitetään kuvassa 5. Vastaavia virtausarvoja on käytetty myös neljän suuttimen laskennassa. Tällöin ilma ei virtaa suuttimen leveysuunnassa reunimmaisten koppien kautta. Tämä tapa ei välttämättä toimi alemmilla hilatasoilla, joten laskentaa jatkettiin suoraan kahden suuttimen laskennan tuloksesta.



Kuva 5: Tuloilmalaitteen reunaehdot, kun suuttimet ovat irti putken pinnasta.

3.1.2 Putken pinnassa olevat suuttimet

Mittauksissa ja savukokeissa suutinkanavan suuttimista tulevat suihkut vaihenivat nopeasti muuttuen pyörteilyksi. Pyörteiden väliin muodostuu imu joka aiheuttaa putken ohi nousevan sekundäärivirtauksen. Jotta imu saataisiin mallinnettua, siirrettiin sisään tulovirtaus putken pinnalle. Suutinsektorin alareunan neljästä ensimmäisestä kopperivistä virtaus suunnattiin poikkeamaan putken tangentin suunnasta 10° . Näihin kohtiin annettiin virtaukselle nopeus, jolla suutinkanavan liikemäärävirta tulee kokonaisuudessaan alareunasta. Turbulenssiasteeksi annettiin 30 % ja turbulentsin ja molekylaarisen viskositeetin suhteeksi 1000, jotta suihkusta tuleva virtaus ottaisi mukaansa mahdollisimman paljon ilmaa ympäristöstään. Putken pinnan yläosaan puolestävällistä ylöspäin annettiin loput tilavuusvirrasta, n. 27 l/s, y -suuntaisena nopeutena 0,058 m/s. Kaavio tuloilmalaitteen reunaehdoista esitetään kuvassa 6.



Kuva 6: Tuloilmalaitteen reunaehdot, kun suuttimet ovat kiinni putken pinnassa.

3.2 Lämpöreunaehdot

Lämpövirta tuotiin mittaushuoneeseen $0,4 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ lämmityskalvojen avulla. Nämä mallinnettiin kiinteillä pinnoilla symmetriatasoa hyväksikäyttäen, jolloin pintojen kooksi tuli $0,4 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$. Lämmittimet sijaitsivat huoneessa keskellä ja $0,5 \text{ m}$ kummastakin päätyseinästä. Lämmittimien sijainti on nähtävissä kuvasta 1.

4 Tulokset

Laskentahilalla, jossa suuttimet ovat irti putken pinnasta laskettiin erilaisilla suutinvaihtoehdoilla, käyttäen suuttimia kahdesta kahdeksaan. Näistä ainoastaan kahta suutinta käyttämällä saatiin tyydyttäviä tuloksia. Laskentahilalla, jossa suuttimet olivat putken pinnassa, suuttimista tuleva virtaus kiinnittyi putken pintaan ja yhdistyi putken päällä yhdeksi suihkuksi. Koska lämmittimien aiheuttamat nostevirtaukset törmäävät katossa ja laskeutuvat juuri tuloilmalaitteen kohdalla, tuli virtauksesta epästabiili. Koska suutinkanavan erisuuntiin puhaltavat suihkut stabiloivat virtausta kanavan lähellä, tarvittiin malliin vastaavia rakenteita. Eri vaihtoehtoina laskettiin mallit, jossa toisessa on putken päällä suoraan ylöspäin nouseva kitkaton taso ja toisessa putken pinnassa vähän suuttimen yläpuolella n. 5 mm korkea taso, joka irrottaa virtauksen putken pinnasta.

4.1 Laskenta

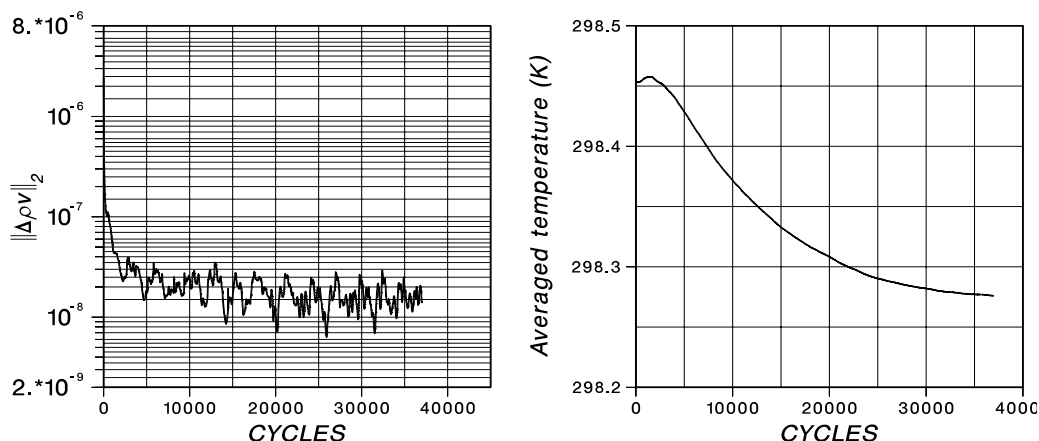
Laskentaan käytettiin Teknillisessä korkeakoulussa kehitettyä FINFLO-virtausratkaisijaa [2]. Turbulenssi mallinnettiin Chienin pienten Reynoldsin lukujen turbulenssimallilla, jossa nosteen vaikutusta ei huomioida turbulenssi-suureita laskennassa. Karkeammalla 2. hilatasolla laskettiin virtauskentästä alkuarvaus tiheimmällä 1. tasolla suoritettavaa laskentaan varten.

CFL-luvut, jotka kuvaavat laskentakopin paikallista aika-askelta, olivat kaikissa tapauksissa toisella hilatasolla 1 ja ensimmäisellä tasolla $0,5$. Monihilatasot nopeuttavat laskennan konvergenssia tasoittamalla virtauskentästä suurimpia eroja. Toisella hilatasolla käytettiin yhtä ja ensimmäisellä tasolla kahta monihilatasoa.

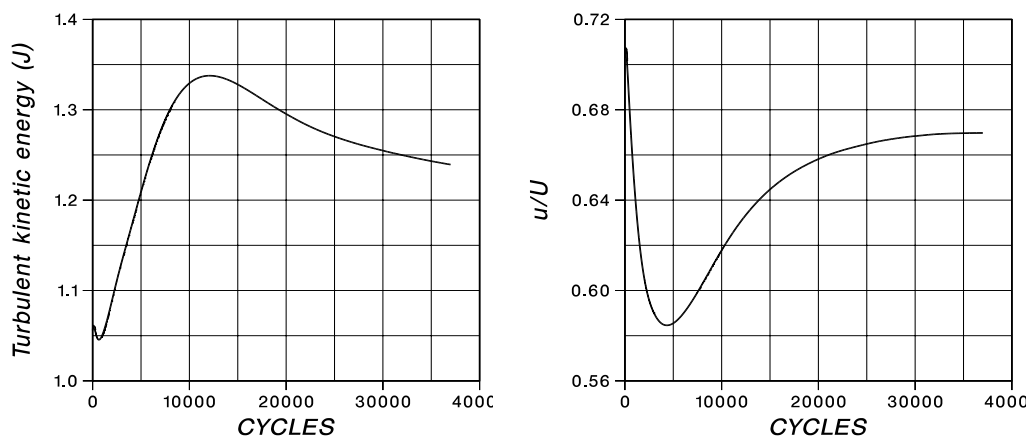
4.2 Suuttimet irti putken pinnasta

Jotta riittävä liikemäärä saataisiin aikaiseksi, ilma virtaa vain kahdesta suuttimesta, jotka suuntaavat suihkun 45° kulmassa ylöspäin. Tällöin ajatuksena on, että liikemäärä 'heittää' suihkun riittävän kauas, jolloin lämpötilaero saa ilman laskeutumaan alas. Iteroinnin konvergenssi oli hidasta, kuten yhden suutinrivin laskennassakin. Lämmittimien aiheuttamat virtaukset vaativat kehittyäkseen yli $50\,000$ kierroksen laskemisen karkeammalla 2. hilatasolla. Tiheimmällä hilatasolla piti laskea vielä yli $30\,000$ kierrosta. Kuvassa7 on

y -suuntaisen liikemäärän residuaalin L_2 -normi ja keskimääräinen lämpötila. Liikemäärä ei muuttunut ensimmäisen 10 000 kierroksen jälkeen, mutta jäi värähtelemään. Lämpötila muuttui vielä laskennan lopussakin, mutta hyvästä alkuarvauksesta johtuen muutos oli jo melko vähäistä. Kuvassa 8 on turbulentsin kineettisen energian konvergenssikäyrä ja turbulentsien heilahtelujen suhde keskimääräiseen nopeuteen. Turbulenssin kineettinen muuttui vielä vähän, mutta vakaantuminen saattaisi viedä vielä kymmeniä tuhansia kierroksia. Turbulentsien heilahteluiden suhde nopeuteen on melko suuri.



Kuva 7: Vasemmalla y -suuntaisen liikemäärän residuaalin L_2 -normi ja oikealla keskimääräinen lämpötila.



Kuva 8: Vasemmalla turbulentsin kineettisen energian konvergenssi ja oikealla turbulentsien heilahtelujen suhde keskimääräiseen nopeuteen.

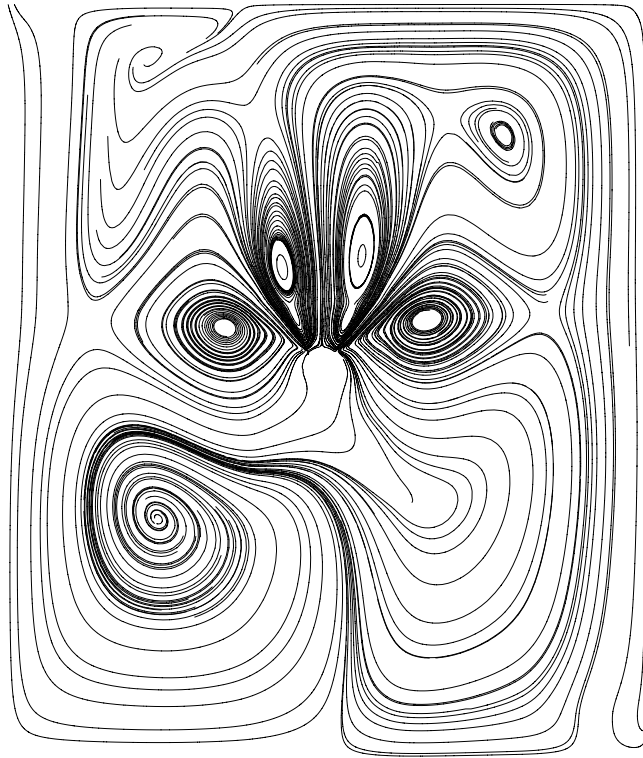
Laskettu jakauma on lähellä mittauksissa esiintynyttä virtaustilannetta. Activentin sivuille muodostuvat pyörteet ovat hieman alempana kuin mittauksissa ja koska putken päällä ei tässä laskussa ole suuttimia, muodostuu sinne voimakas alaspäin suuntautunut virtaus joka jakaantuu suuttimille. Nopeusvektorit lähellä huoneen keskitasoa esitetään kuvassa 9 ja virtaviivat kuvassa

10. Lähellä huoneen etuseinää virtauskenttä on erilainen, koska lämmittimien aiheuttamat nostevirtaukset eivät ulotu koko huoneen leveydelle. Nopeusvektorit 0,3 m huoneen etuseinästä esitetään kuvassa 11. Nostevirtausten voi-

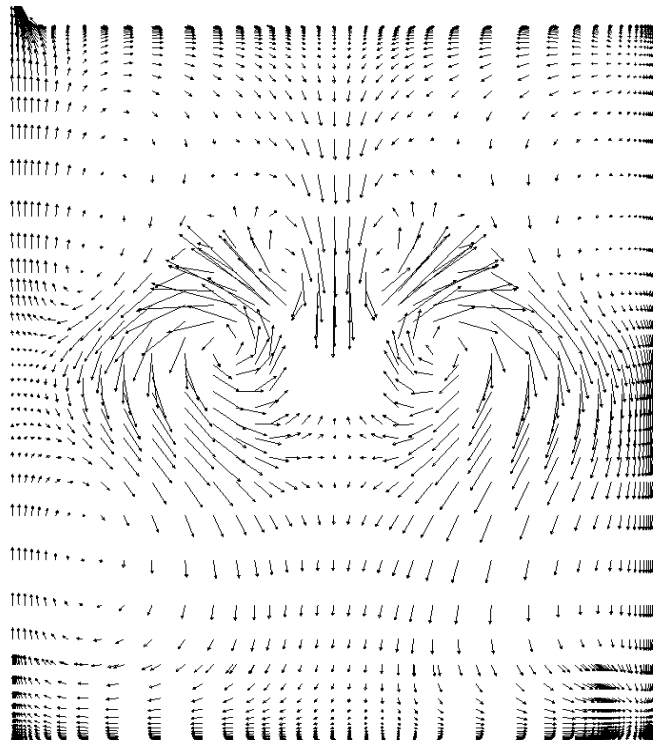


Kuva 9: Nopeusvektorit tasolla 1,2 m etuseinästä. Kuvassa punaisella mittaustulokset.

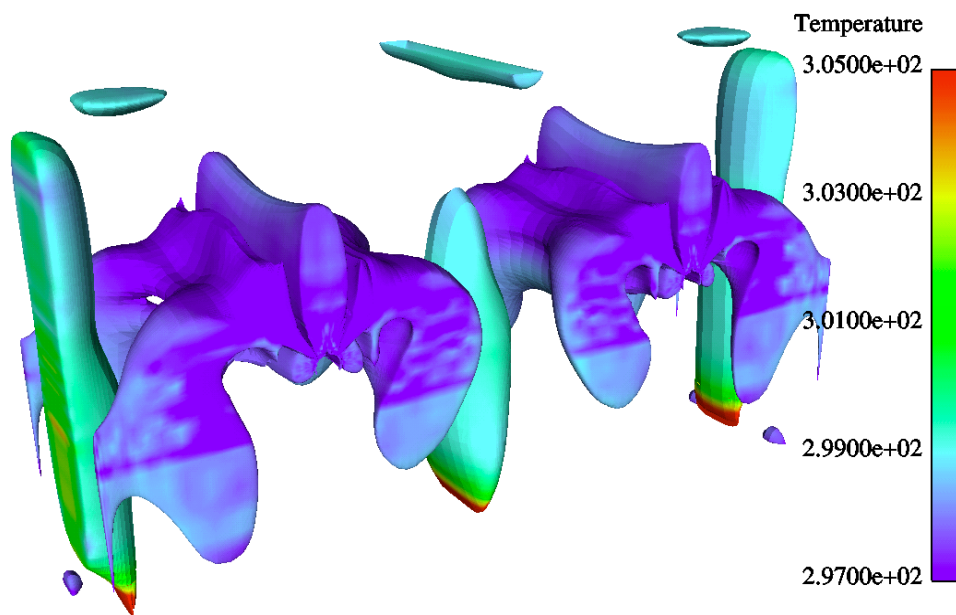
makkuus ja suuttimista tulevan alilämpöisen ilman erilainen laskeutuminen eri kohdissa huonetta näkyy hyvin kuvassa 12, jossa on nopeuden tasa-arvopinta $V = 0,2$ m/s ja lämpötilajakauma tasa-arvopinnalla.



Kuva 10: Virtaviivat tasolla 1,2 m etuseinästä.

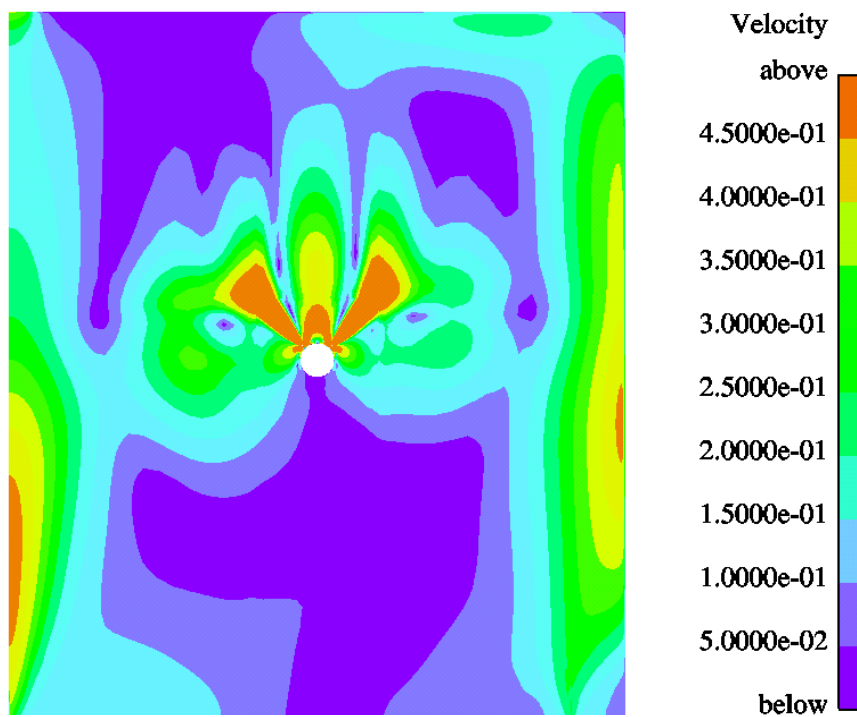


Kuva 11: Nopeusvektorit tasolla 0,3 m etuseinästä.

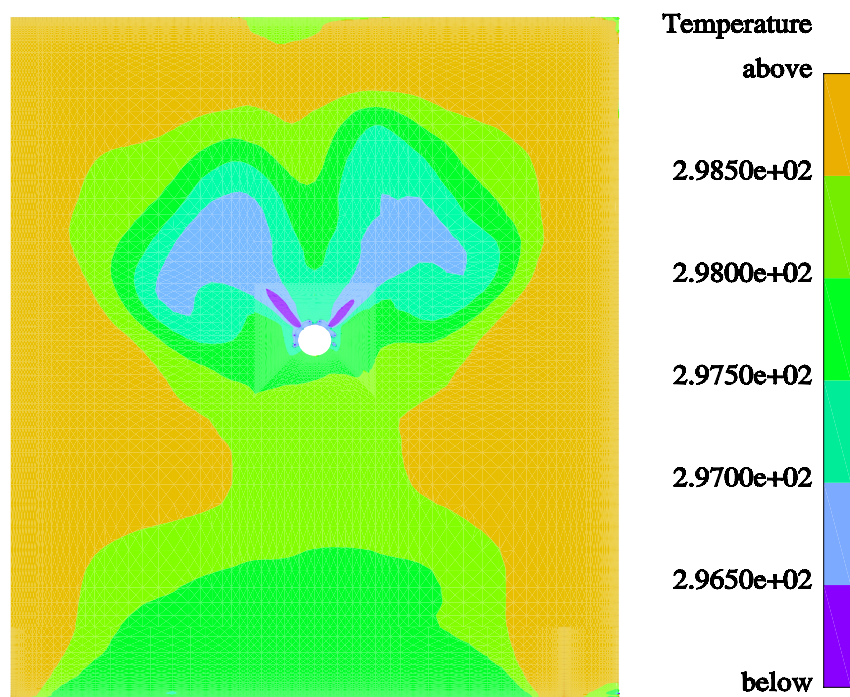


Kuva 12: Nopeuden tasa-arvopinta $V = 0,2$ m/s ja lämpötilajakauma tasa-arvopinnalla.

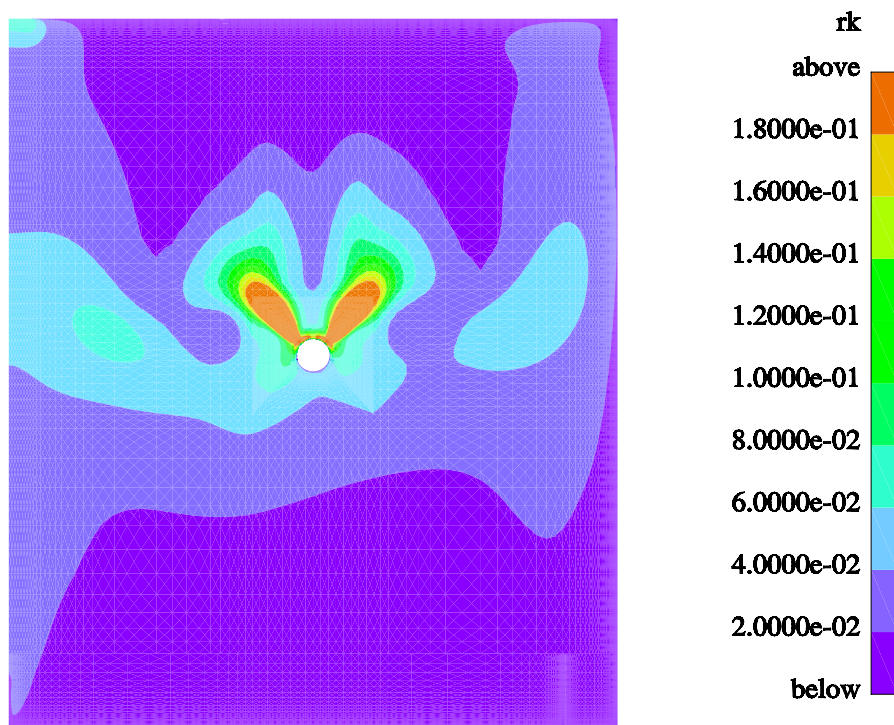
Nopeusjakauma huoneen keskilinjalla esitetään kuvassa 13. Suuttimista lähtevät suihkut kantavat lämmönlähteistä lähteville nousuvirtauksille, 'pluumeille', asti ja osittain hidastavat niitä. Tuloilmaan sekoittuu tässä vaiheessa lämmintä ilmaa pluumeista. Tämä näkyy lämpötilan nousuna kummallakin puolella tuloilmalaitteen alla kuvassa 14. Turbulenssin kineettisen energian jakauma esitetään kuvassa 15 ja turbulentin ja molekylaarisen viskositeetin suhde kuvassa 16. Turbulenssin kineettinen energia on suurimmillaan suihkuissa, jossa nopeuskin on huomattavasti ympäristöä suurempi. Viskositeettien suhde kasvoi suureksi alueilla, jossa eri suuntaan liikkuvat virtaukset törmäävät toisiinsa ja nostevirtauksissa. Nopeusjakaumat tasoilla 0,1 m, 1,1 m, 1,8 m ja 3,0 m esitetään kuvissa 17 .. 20, joissa on myös ultraäänianemometrillä mitatut [3] vastaavat jakaumat. Laskentatulokset vastaavat hyvin mittaustuloksia. Pluumien nopeudet ovat hieman liian suuria ja tasolla 3,0 m on suutinkanavan sivulle muodostuvien pyörteiden erilaisesta sijainnista johtuvia eroja.



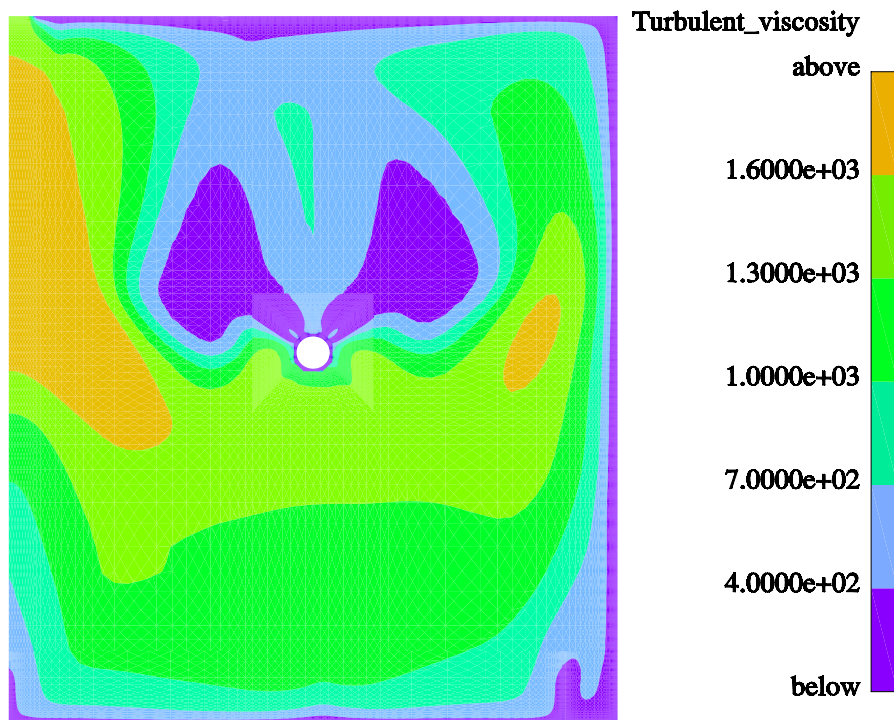
Kuva 13: Nopeusjakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



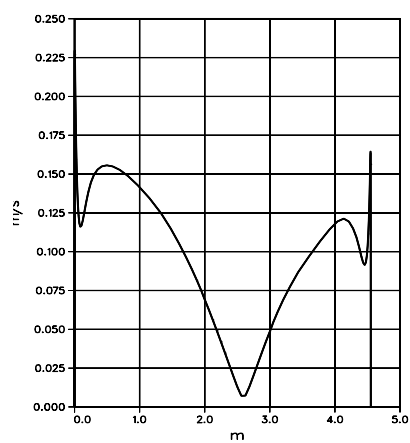
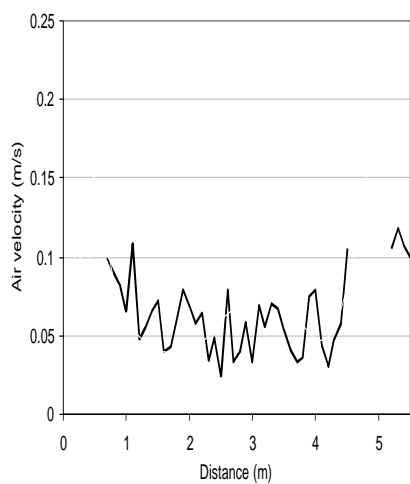
Kuva 14: Lämpötilajakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



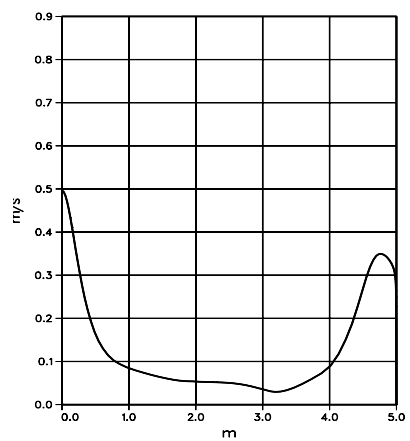
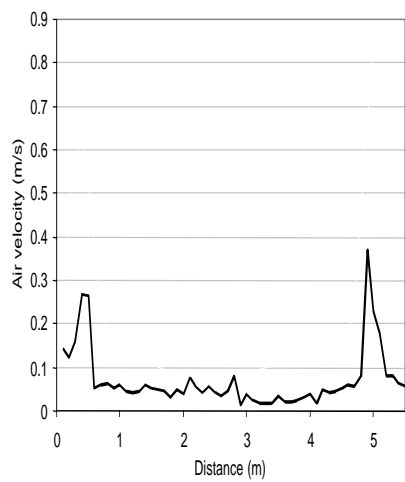
Kuva 15: Turbulenssin kineettisen energian jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



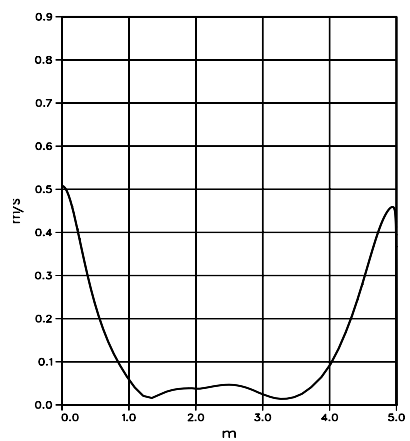
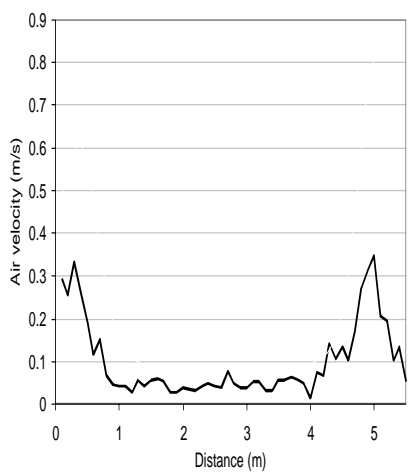
Kuva 16: Turbulenttin ja molekylaarisen viskositeetin suhteen jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



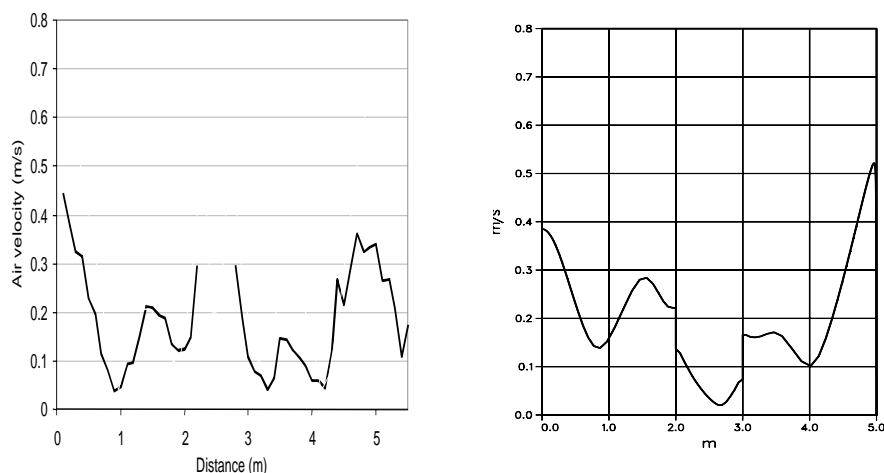
Kuva 17: Nopeusjakaumat tasolla 0,1 m. Vasemmalla mitattu jakauma [3].



Kuva 18: Nopeusjakaumat tasolla 1,1 m. Vasemmalla mitattu jakauma [3].



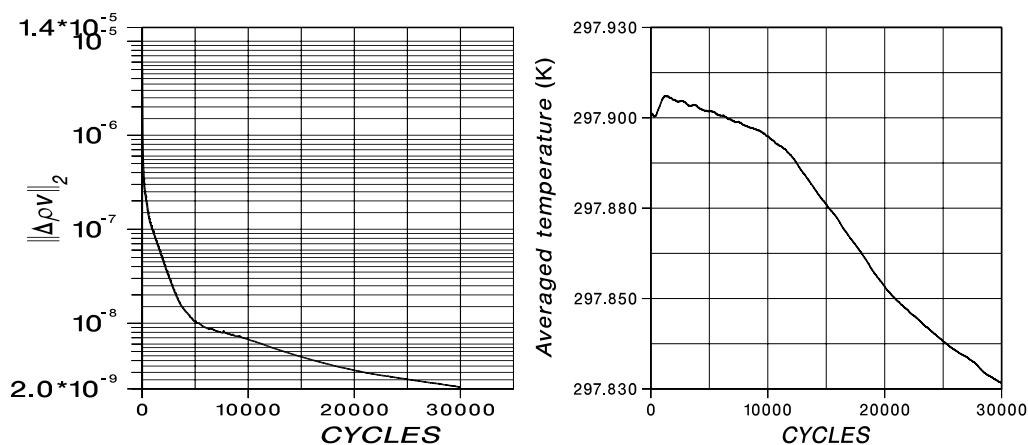
Kuva 19: Nopeusjakaumat tasolla 1,8 m. Vasemmalla mitattu jakauma [3].



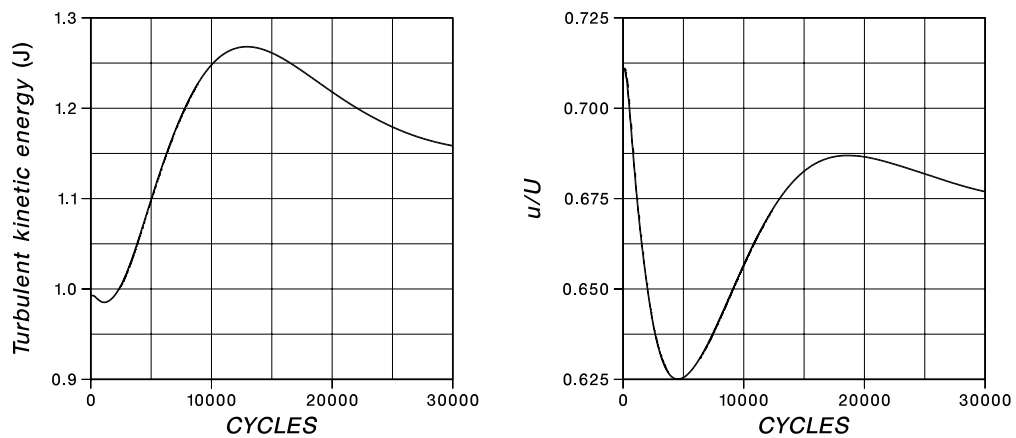
Kuva 20: Nopeusjakaumat tasolla 3,0 m. Vasemmalla mitattu jakauma [3].

4.3 Suuttimet putken pinnassa, putken päällä symmetriataso

Aivan kuten edelliselläkin tuloilmalaitemallilla, tarvittiin runsaasti laskentakierroksia karkeammalla hilatasona, jotta lämmittimien aiheuttamat virtaukset kehittivät. Kuvassa 21 on y -suuntaisen liikemäärän residuaalin L_2 -normi ja keskimääräinen lämpötila. Liikemäärä on konvergoinut hyvin, vaikkakin käyrä on vielä laskusuunnassa. Lämpötila muuttui vielä laskennan lopussakin, mutta vähemmän kuin edellisellä tuloilmalaitemallilla. Kuvassa 22 on turbulenttisen kineettisen energian konvergenssikäyrä ja turbulenttisten heilahtelujen suhde keskimääräiseen nopeuteen. Turbulenssin kineettinen muuttui vielä vähän, mutta vakaantuminen saattaisi tässäkin tapauksessa viedä vielä kymmeniä tuhansia kierroksia. Turbulenttisten heilahteluiden suhde nopeuteen on samaa luokkaa edellisen tapauksen kanssa. Symmetriataso muuttaa virtauksen koh-

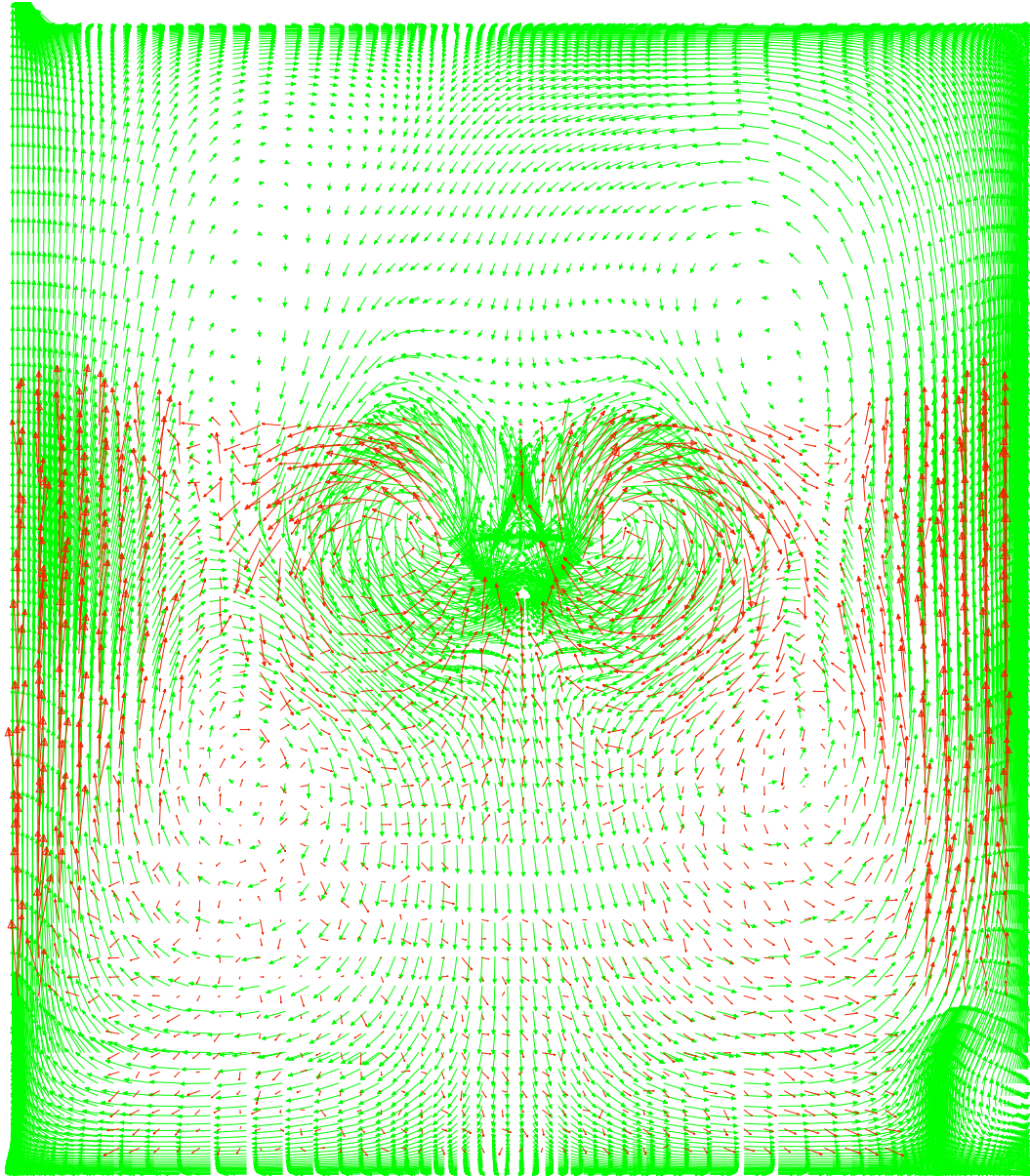


Kuva 21: Vasemmalla y -suuntaisen liikemäärän residuaalin L_2 -normi ja oikealla keskimääräinen lämpötila.

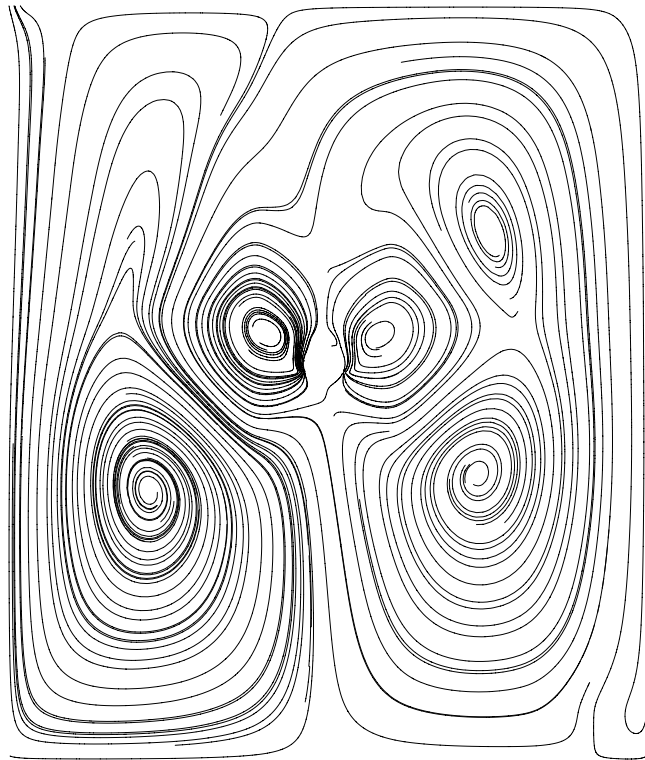


Kuva 22: Vasemmalla turbulentsin kineettisen energian konvergenssi ja oikealla turbulentsien heilahtelujen suhde keskimääräiseen nopeuteen.

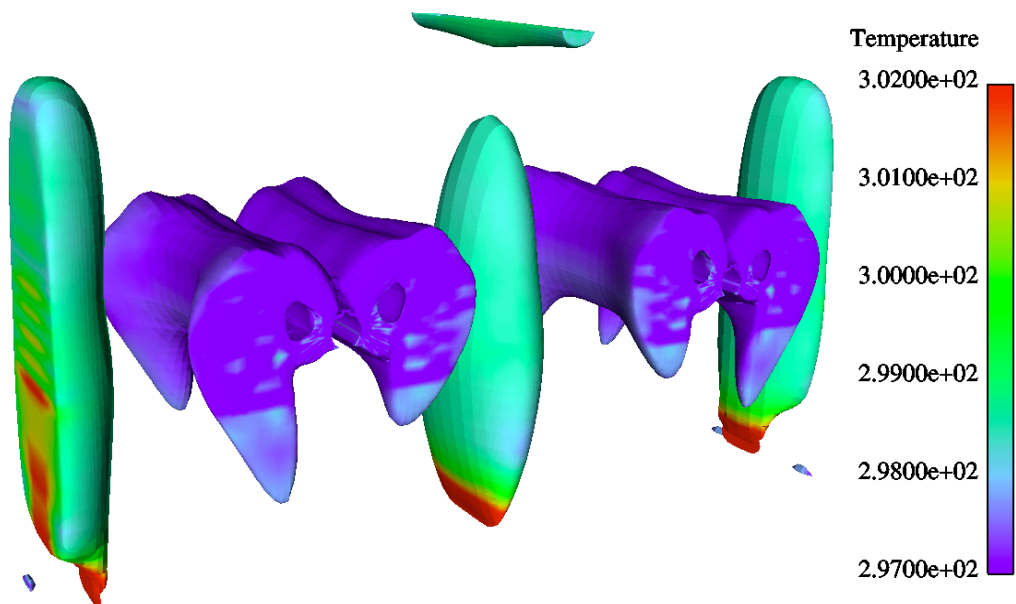
talaisen vakaaksi. Nopeusvektorit lähellä huoneen keskitasoa esitetään kuvassa 23, jossa on myös mitatut nopeusvektorit. Kuvassa 24 on virtaviivat samassa tasossa. Pluumeista lähtevästä virtauksesta suuri osa kiertää alastullessaan tuloilmalaitteen huoneen keskustan puolelta. Tällöin myös suutinkanavan pluumin paluuvirtausta hidastava vaikutus pienenee. Kanavan sivuille muodostuvat pyörteet ovat ylempänä kuin mittauksissa. Kuvassa 25 on nopeuden tasa-arvopinta $V = 0,2 \text{ m/s}$ ja lämpötilajakauma tasa-arvopinnalla. Pluumin törmäyksen jälkeinen alaspäin suuntautuva virtaus hidastuu, toisin kuin kahden pinnasta irti olevan suuttimen mallissa. Lähellä etuseinää laskeutuva ilma ei laskeudu yhtä voimakkaasti kuin pinnasta irti olevan suuttimen tapauksessa. Kuvissa 26 ja 27 ovat nopeus ja lämpötilajakauma lähellä huoneen keskitasoa. Koska lämmittimien aiheuttama virtaus ohittaa alastullessaan tuloilmalaitteen vain toiselta puolelta, se ei tuloilmalaitteen jälkeen hidastu kuten edellisessä tapauksessa. Tämän vuoksi nopeudet oleskeluvyöhykkeellä ovat suurempia kuin muissa tapauksissa. Kylmä ilma nousee muista tapauksista poikkeavasti tuloilmalaitteen päälle. Lämpötila huoneen alaosassa on alhaisempi kuin suuttimien ollessa irti putken pinnasta. Turbulenssin kineettisen energian jakauma esitetään kuvassa 28 ja turbulentin ja molekylaarisen viskositeetin suhde kuvassa 29. Turbulenssin kineettinen energia on suurimmillaan suihkujen ympäristössä, kuitenkin huomattavasti pienemmällä alueella kuin irti olevilla suuttimilla. Viskositeettien suhde kasvoi suureksi nostevirtausten reunoilla ja poistoaukon läheisyydessä. Kuvissa 37 .. 40 on nopeusjakaumat tasoilla 0,1 m, 1,1 m, 1,8 m ja 3,0 m. Nopeusjakaumat ovat periaatteessa vastaavia kuin irrallaan olevilla suuttimilla, mutta pluumin vaikutusalueen ulkopuolella nopeudet ovat suurempia.



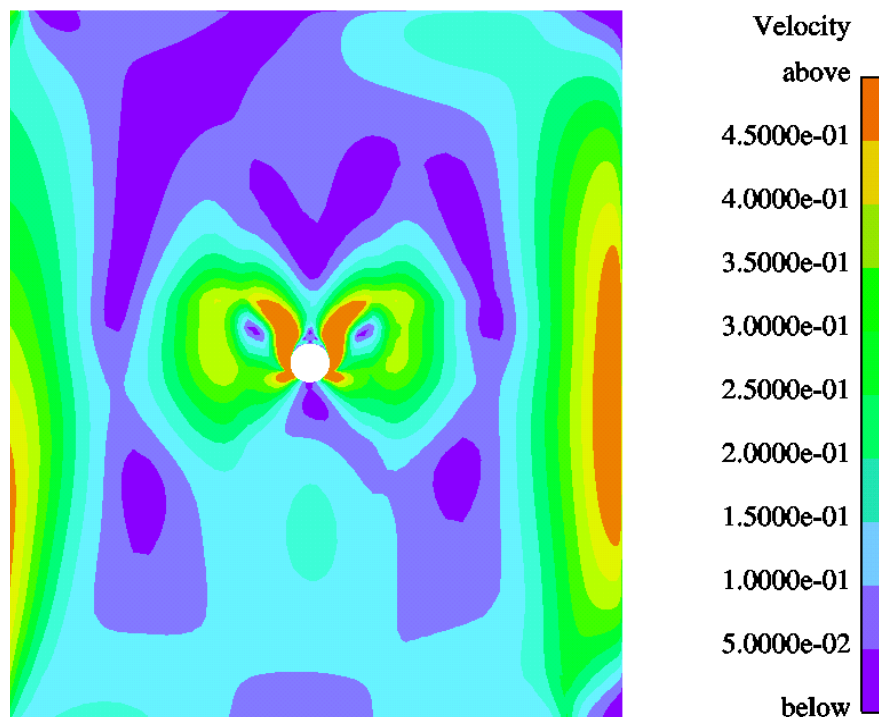
Kuva 23: Nopeusvektorit tasolla 1,4 m etuseinästä. Kuvassa punaisella mittaustulokset.



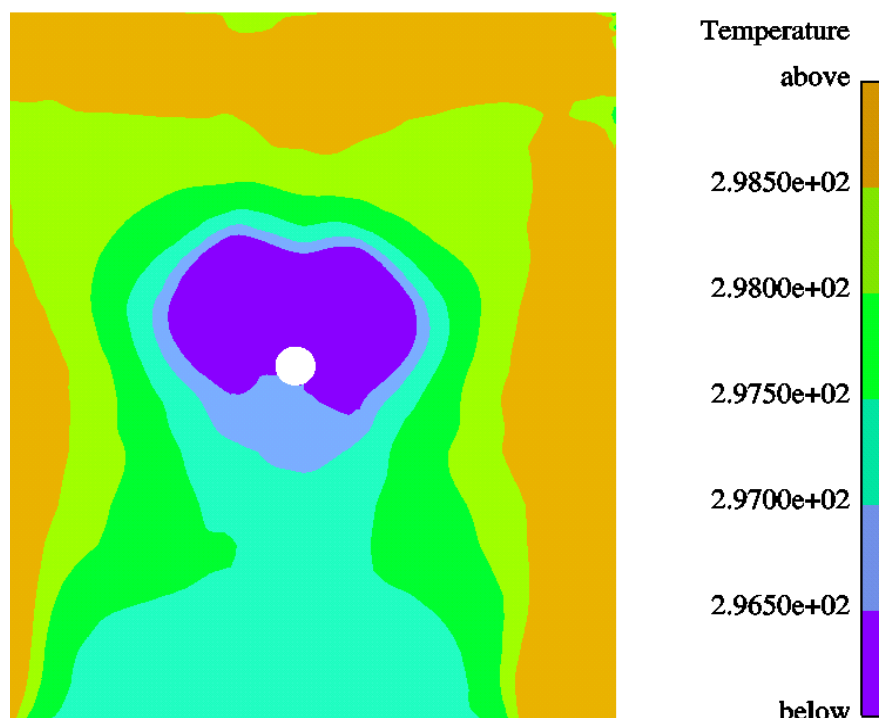
Kuva 24: Virtaviivat tasolla 1,4 m etuseinästä.



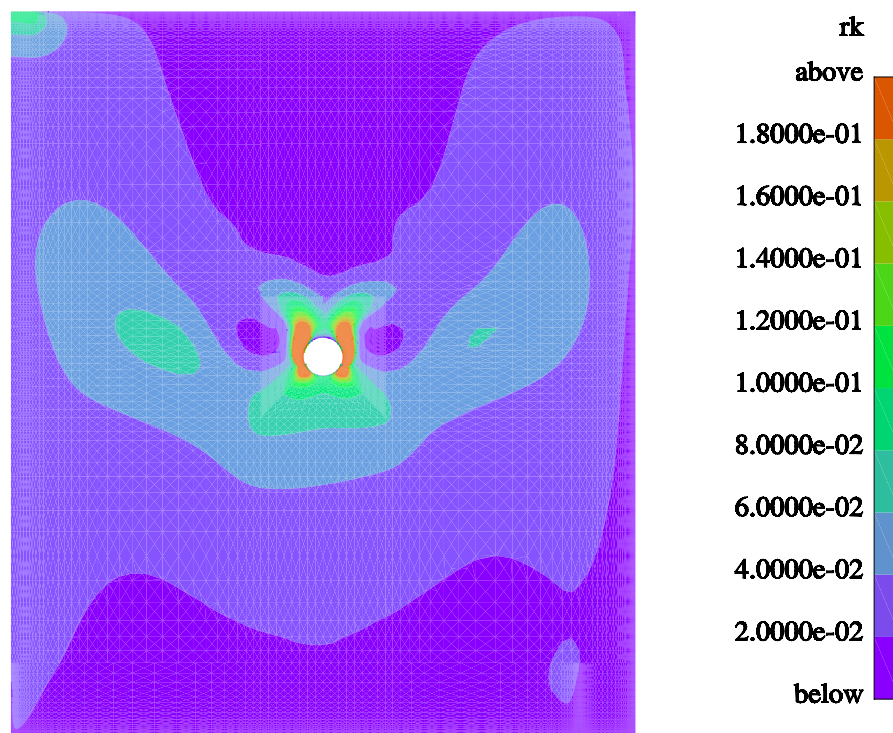
Kuva 25: Nopeuden tasa-arvopinta $V = 0,2$ m/s ja lämpötilajakauma tasa-arvopinnalla.



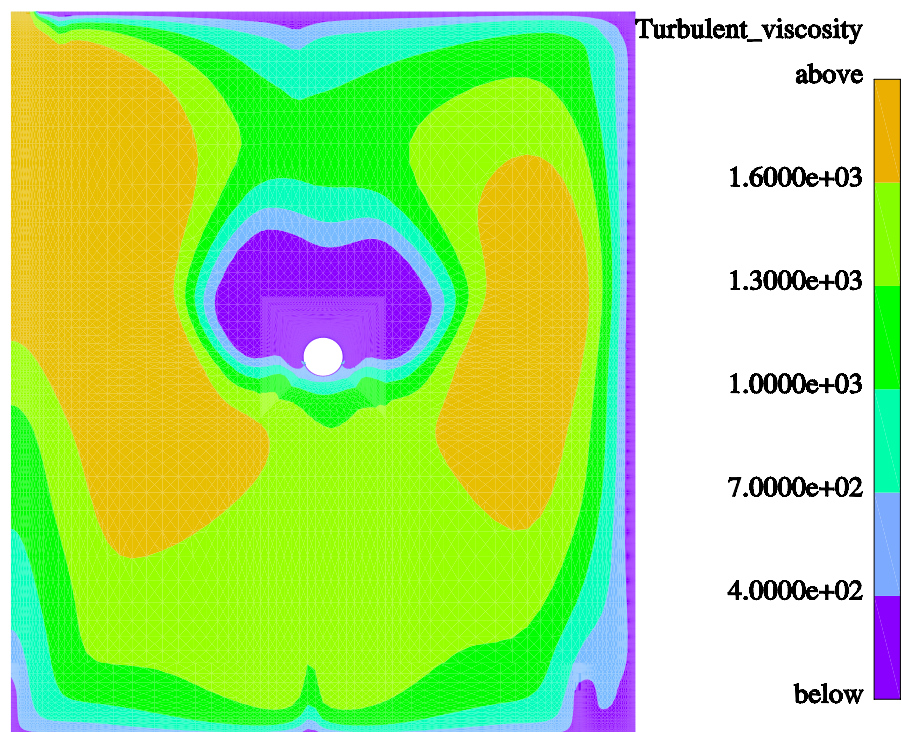
Kuva 26: Nopeusjakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



Kuva 27: Lämpötilajakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



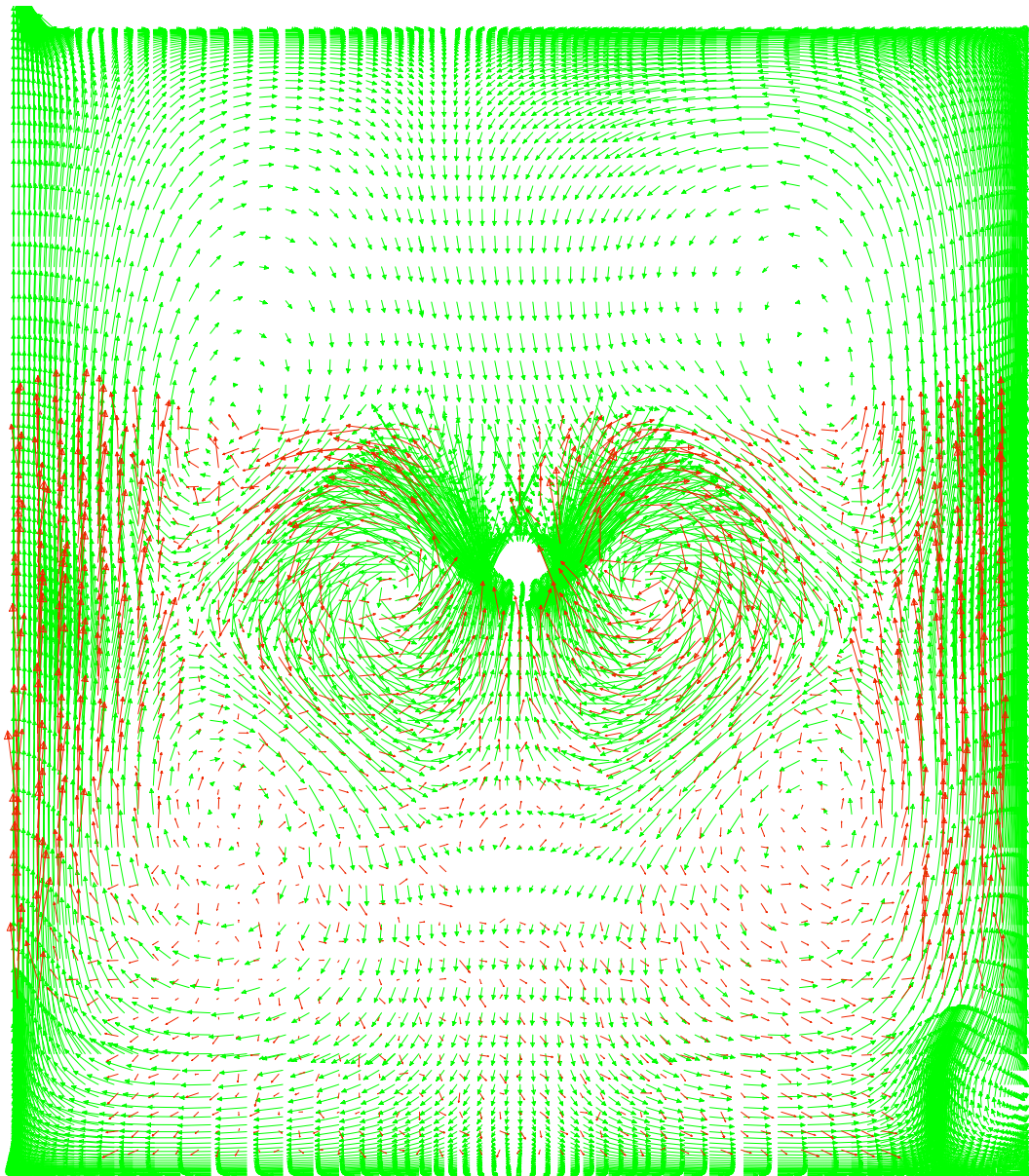
Kuva 28: Turbulenssin kineettisen energian jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



Kuva 29: Turbulenttin ja molekylaarisen viskositeetin suhteen jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.

4.4 Suuttimet putken pinnassa, putken sivuissa virtauksen irroittavat rivat

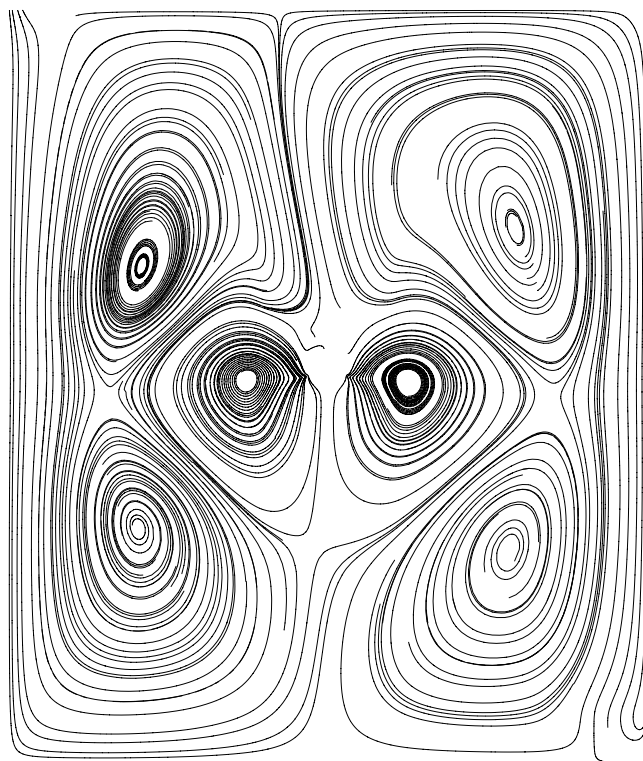
Tässä tapauksessa putken kyljissä oli pienet rivat lähellä suutinta. Rivin taakse muodostui pyörre, joka irroitti virtauksen putken pinnasta. Tällöin katosta kääntynyt pluumien paluuvirtaus pääsee tunkeutumaan suuttimista lähtevien virtausten väliin ja virtauskenttä tuloilmalaitteen lähellä stabiloituu. Kuvassa 30 on sekä mitatut että lasketut nopeusvektorit lähellä huoneen keskitasoa. Tuloilmalaitteen sivuille muodostuvat pyörteet ovat hieman liian alhaalla. Ripoja nostamalla pyörteiden paikkoja voisi luultavasti muuttaa.



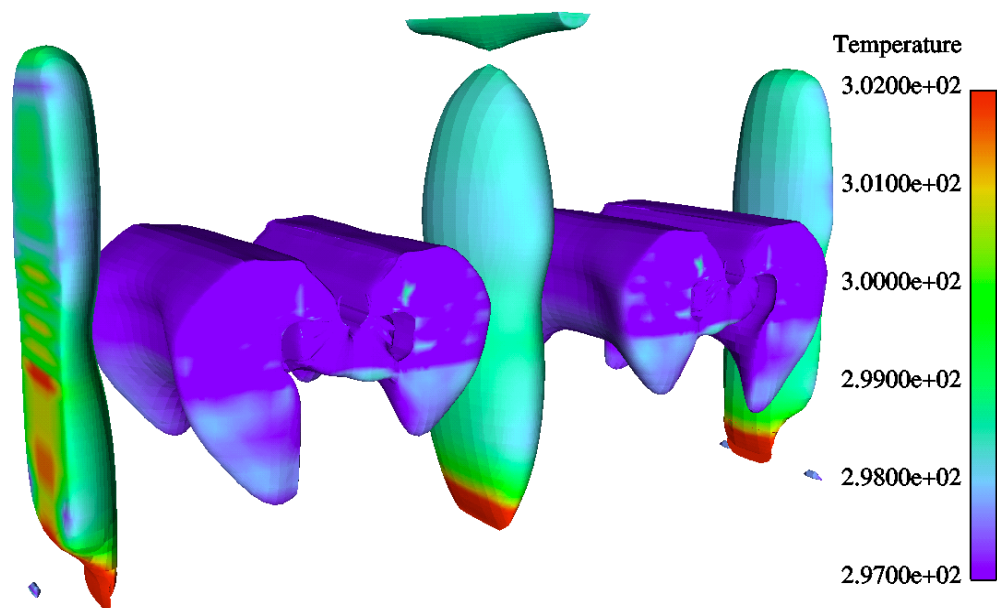
Kuva 30: Nopeusvektorit tasolla 1,4 m etuseinästä. Kuvassa punaisella mittaustulokset.

Kuvassa 31 on virtaviivat huoneen keskitasossa. Kanavan sivussa olevat pyörteet ovat selvästi suuremmat verrattuna symmetriatasolla varustettuun tapaukseen (kuva 24). Myös huoneen alaosaan muodostuvat pyörteet ovat alempana eikä katosta kääntynyt virtaus ohita tuloilmalaitetta, vaan pysähtyy sen yläosaan. Tuloilmalaitteen aiheuttama virtaus törmää kummallakin puolella pluumeihin selvästi enemmän (kuva 32) kuin symmetriatasolla varustetussa mallissa. Nopeudet oleskeluvyöhykkeellä (kuva 33) ovat selvästi alhaisempia kuin symmetriatasolla varustetussa mallissa (kuva 26). Vaikka lämpötilajakauma (kuva 34) on tuloilmalaitteen lähistöllä selvästi erilainen kuin symmetriatasolla varustetussa mallissa (kuva 27) on jakauma kuitenkin varsin samanlainen huoneen alaosassa. Turbulenssin kineettisen energian jakauma esitetään kuvassa 35 ja turbulentin ja molekylaarisen viskositeetin suhde kuvassa 36. Turbulenssin kineettinen energia on suurimmillaan suihkujen ympäristössä. Lisäksi tuloilmalaitteen aiheuttaman virtauksen törmäyskohdassa se on melko suuri verrattuna ympäristöön. Viskositeettien suhde kasvoi suureksi nostevirtausten reunoilla ja poistoaukon läheisyydessä. Myös tuloilmalaitteen alapuolella viskositeettien suhde on melko suuri.

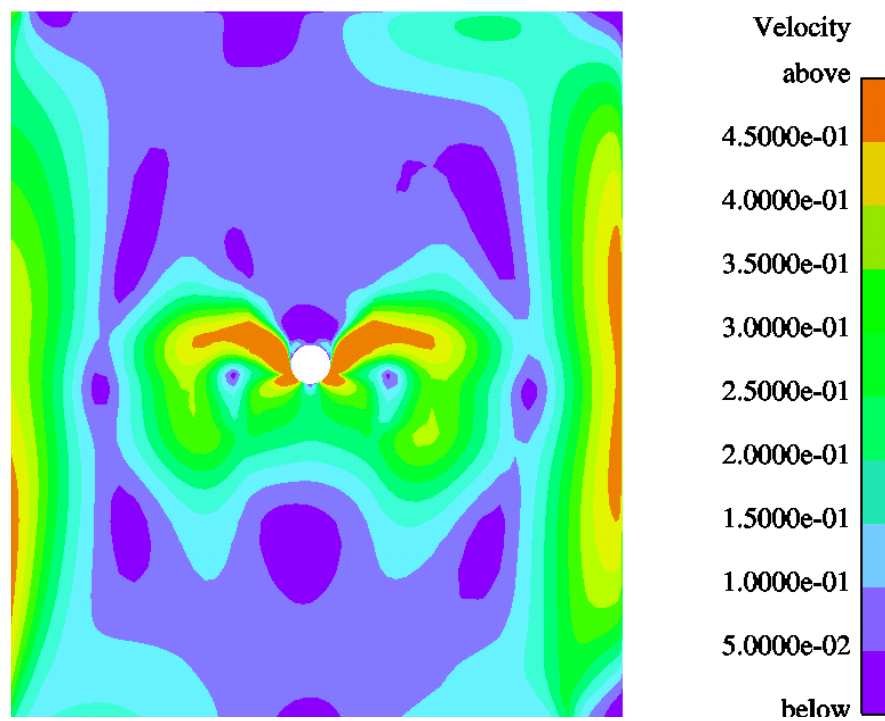
Kuvissa 37 .. 40 on nopeusjakaumat tasoilla 0,1 m, 1,1 m, 1,8 m ja 3,0 m. Nopeusjakaumat ovat pluumien vaikutusalueen ulkopuolella pienempiä kuin symmetriatasoa käyttävässä mallissa, mutta suurempia kuin irrallaan olevien suuttimien mallissa, joka on siis lähimpänä mittaustuloksia.



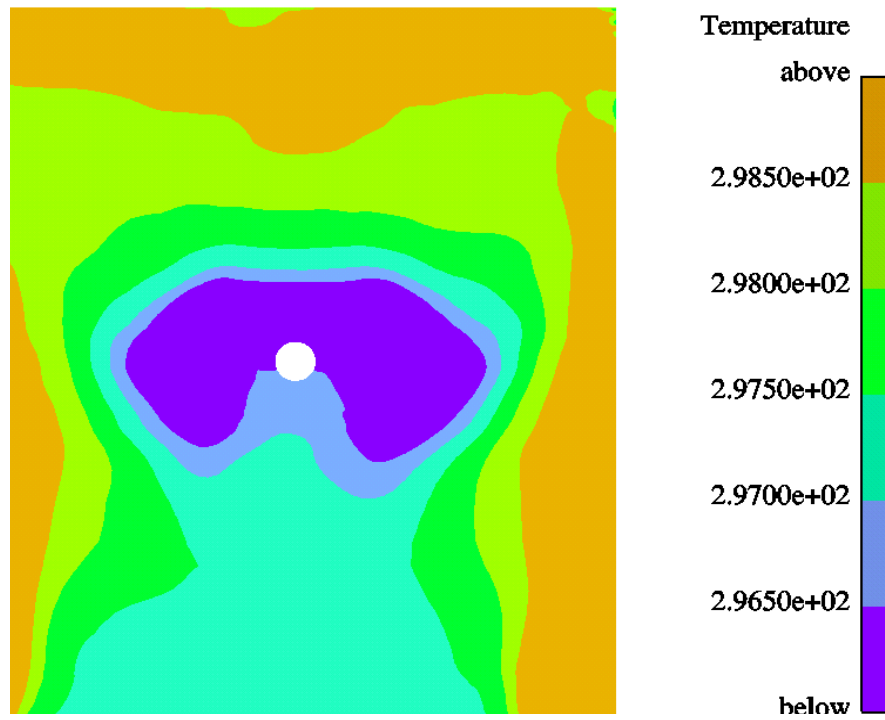
Kuva 31: Virtaviivat tasolla 1,4 m etuseinästä.



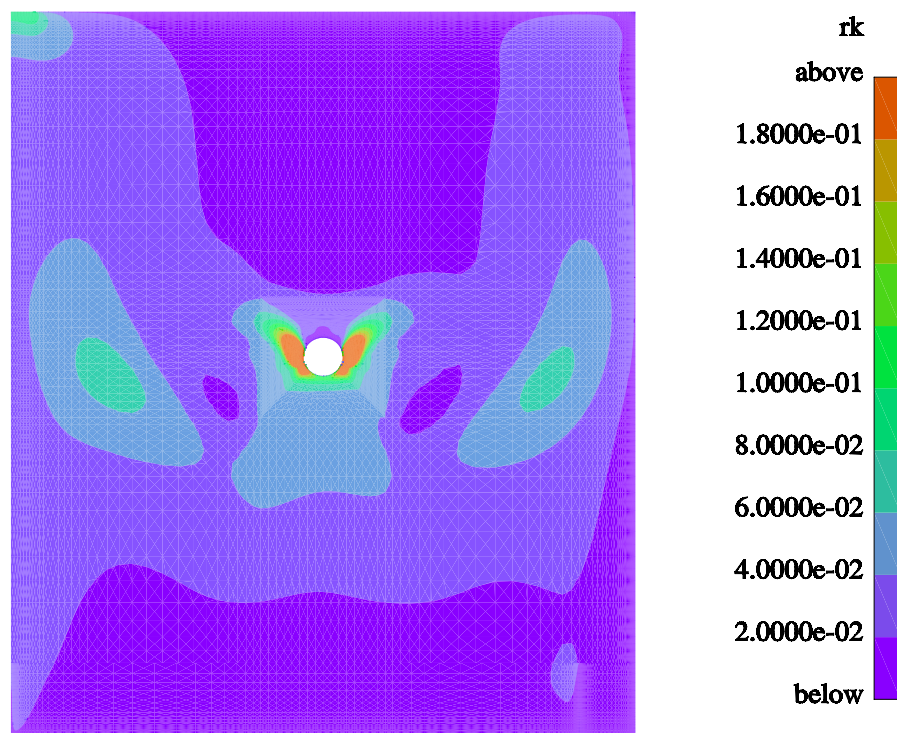
Kuva 32: Nopeuden tasa-arvopinta $V = 0,2$ m/s ja lämpötilajakauma tasa-arvopinnalla.



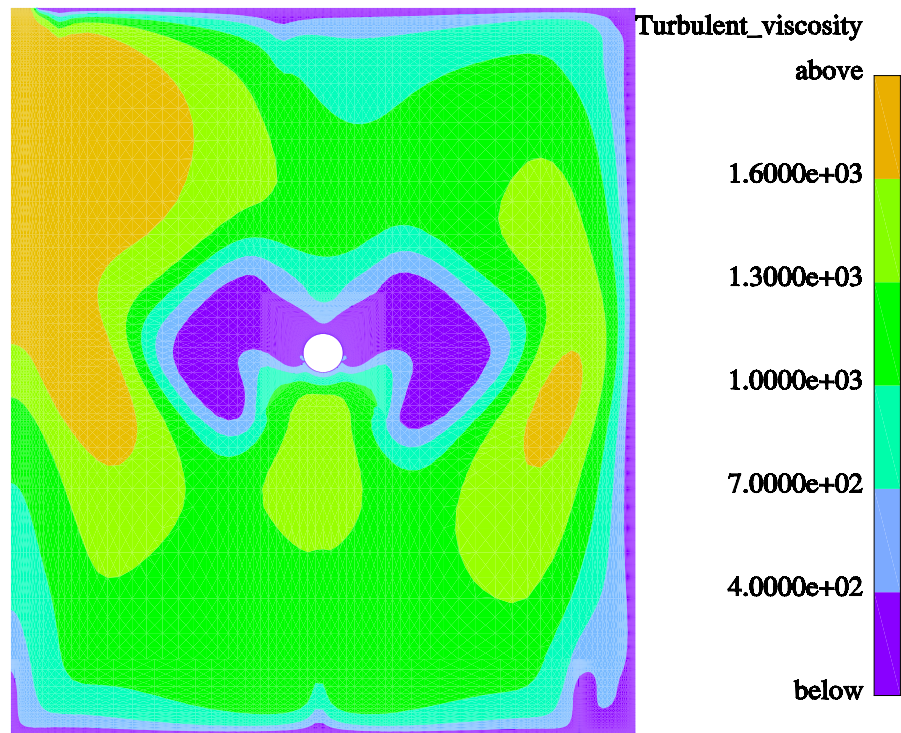
Kuva 33: Nopeusjakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



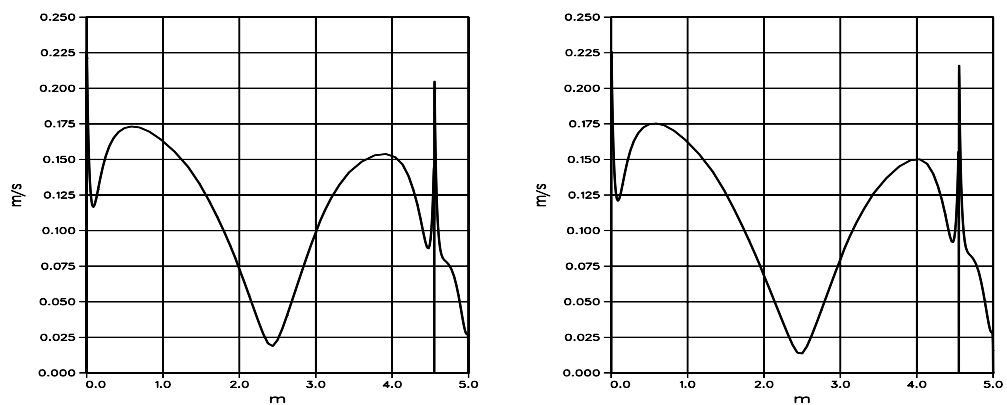
Kuva 34: Lämpötilajakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



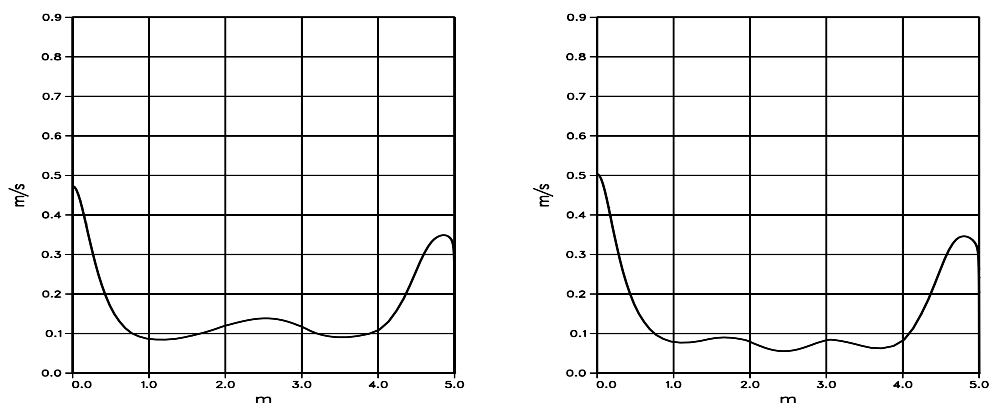
Kuva 35: Turbulenssin kineettisen energian jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



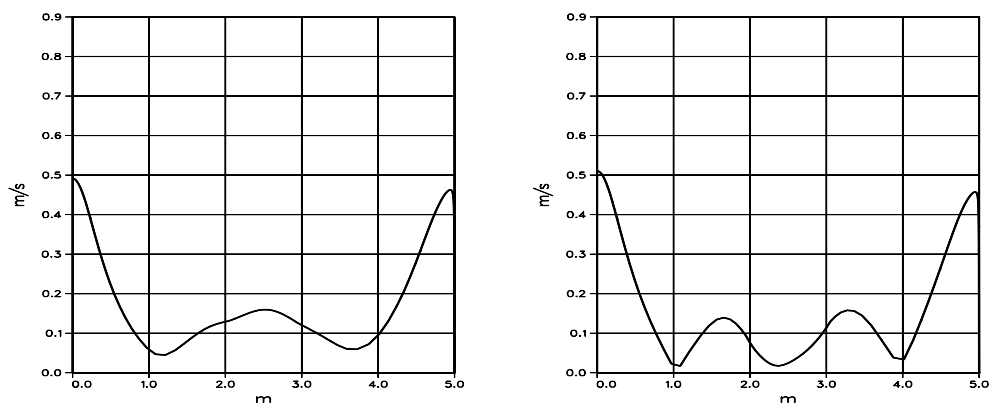
Kuva 36: Turbulenttin ja molekylaarisen viskositeetin suhteen jakauma tasolla 1,4 m etuseinästä.



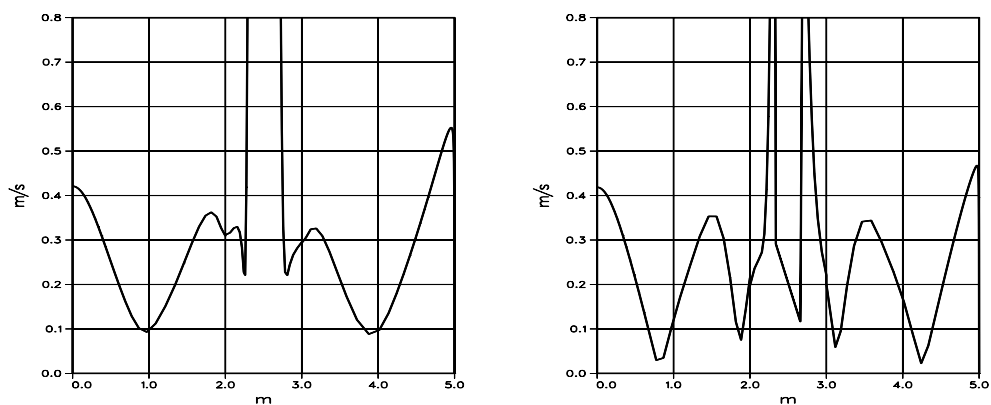
Kuva 37: Nopeusjakaumat tasolla 0,1 m. Vasemmalla tapaus, jossa symmetriataso putken yläpinnassa ja oikealla virtaus on irroitettu putken pinnasta pienillä ulokkeilla.



Kuva 38: Nopeusjakaumat tasolla 1,1 m. Vasemmalla tapaus, jossa symmetriataso putken yläpinnassa ja oikealla virtaus on irroitettu putken pinnasta pienillä ulokeilla.



Kuva 39: Nopeusjakaumat tasolla 1,8 m. Vasemmalla tapaus, jossa symmetriataso putken yläpinnassa ja oikealla virtaus on irroitettu putken pinnasta pienillä ulokeilla.



Kuva 40: Nopeusjakaumat tasolla 3,0 m. Vasemmalla tapaus, jossa symmetriataso putken yläpinnassa ja oikealla virtaus on irroitettu putken pinnasta pienillä ulokeilla.

5 Yhteenveto

Yleensä numeerisessa laskennassa pyritään käyttämään mahdollisimman tarkasti todellista geometriaa ja reunaehtoja, jotka ovat fysikaalisesti perusteltavissa. Ilmastointiteknisissä laskelmissa tuloilmalaitteet sisältävät usein koko laskenta-alueeseen nähden erittäin pieniä yksityiskohtia, jolloin laskentakoppimäärät tarkasti mallinnettaessa kasvaisivat huomattavan suuriksi. Tästä syystä laskennassa on turvauduttava geometriisiin yksinkertaistuksiin ja erittäin monimutkaisissa tapauksissa luotava malleja, joilla pyritään saamaan tuloilmalaitetta vastaava virtauskenttä ainakin jonkin matkan etäisyydellä tuloilmalaitteesta. Mallin luomista helpottaa kuitenkin se, että numeerisessa laskennassa on mahdollista käyttää ilmanjakotapoja, jotka olisivat äärimmäisen kalliita tai jopa mahdottomia toteuttaa todellisuudessa. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu tuloilmalaitetta, joka mallinnuksen kannalta edustaa ääripäätä monimutkaisuudessa ja yksityiskohtien määrässä. Todellista geometriaa ei ole yritettykään jäljitellä, mutta toisaalta on kuitenkin yritetty luoda mallia, jonka avulla pelkät tuloilmamäärä ja -lämpötila riittävät mallin käyttöön. Niinsanoituissa laatikkomalleissa pitää ympäröivän ilman tila joko tietää tai arvata.

Kolmea erilaista mallia on tarkasteltu lähemmin. Näistä kaksi on oikeastaan saman mallin eri versioita. Malleista monimutkaisin, jossa suutinputken suuntaiset kapeat suuttimet on irroitettu putken pinnasta sekundääri-ilman kulkeutumisen helpottamiseksi näytti antavan mittauksiin verrattuna parhaat tulokset. Rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisemmat mallit, joissa ilma tulee putken pinnassa olevien pitkien suuttimien sekä putken yläpinnan kautta vaikuttavat kuitenkin paremmilta suurten tilojen laskennassa, koska laskentakoppeja säästyy n. 50 000 tuloilmalaitetta kohti. Tulokset mallissa, jossa virtaus irrotetaan putken pinnasta pienellä tasoilla, ovat varsin lähellä monimutkaisempaa mallia.

Viitteet

- [1] Ala-Juusela, J., “Activent tuloilmalaitteen CFD-mallinnus –Yhden suutin-rivin laskenta, CFD/TERMO-30-00, julkaisematon,” Sovelletun termody-namiikan laboratorio, TKK, Helmikuu 2000.
- [2] *FINFLO User Manual version 2.2*, 1997.
- [3] Koskela, H., “Mittaustuloskäyrästä,” Turun aluetyöterveyslaitos, Turku, 1999. (Julkaisematon).