

MUISTIO No CFD/TERMO-19-97

pvm 10 lokakuuta, 1997

OTSIKKO

Suutinvirtauksen nopeusprofiilin vaikutus mallinnettaessa kaksiulotteista suihkua

LAATIJA(T)

Juhaveikko Ala-Juusela

TIIVISTELMÄ

Tässä muistiossa esitetään totuudenmukaisempien suutinvirtauksen nopeusprofiilin ja turbulenssiarvojen vaikutus vapaan kaksiulotteisen suihkun CFD-mallinnuksessa saataviin tuloksiin.

PÄÄKOHDAT

SIVUJA

13

AVAINSANAT

FINFLO, suihku, kanavavirtaus, turbulenssi

TARKASTANUT

Timo Siikonen 29. elokuuta, 1997

1 Johdanto

Tässä muistiossa on tarkasteltu totuudenmukaisempien nopeuden, turbulenssin kineettisen energian ja dissipaation jakaumien käyttöä suutinvirtauksen reunaehtoina mallinnettaessa kaksiulotteista ilmasuihkua FINFLO ohjelmalla. Aikaisemmin vastaavanlaisesta tapauksesta on tehty numeerisia mallinnuksia FINFLO ohjelmalla käyttämällä suutinvirtauksessa tasaisia nopeus- ja muiden virtausominaisuuksien jakaumia [1]. Työn päätarkoitus on selvittää, onko suutinvirtauksen lähtöarvoilla todellista vaikutusta tuloksiin. Jatkossa tapauksesta, jossa nopeus on suutinvirtauksessa tasainen, käytetään selvyuden vuoksi nimitystä tulppavirtaus ja tapauksesta, jossa suutinvirtaukselle on laskettu profiili, profiilivirtaus.

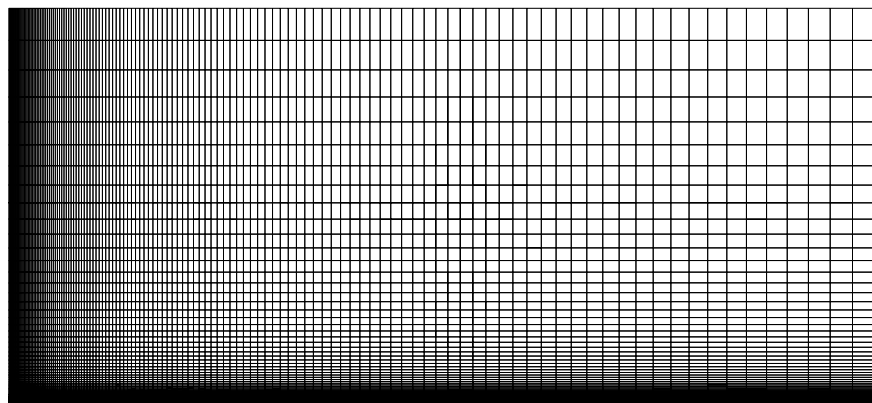
2 Laskentamenetelmä

Laskennassa käytettiin Teknillisessä Korkeakoulussa kehitettyä FINFLO ohjelmaa. FINFLO on Navier-Stokes ratkaisija, jolla voidaan laskea kokoonpuristuvia ja kokoonpuristumattomia alisoonisia, transsoonisia ja ylisoonisia virtauksia. Ohjelma ratkaisee aikakeskiarvotettuja Navier-Stokesin yhtälöitä kontrollitulavuusmenetelmällä. Turbulenssimalleja on useita. Tässä työssä käytetty turbulenssi-malli oli Chienin pienten Reynoldsin lukujen $k-\varepsilon$ -malli. FINFLO ratkaisumenetelmät on kuvattu FINFLO User Guidessa [2].

3 Laskentahila ja reunaehdot

Laskentahila pyrittiin saamaan mahdollisimman samankaltaiseksi kuin lähteessä [1], jotta tulosten vertailu olisi helpompaa. Aivan täsmälleen samanlainen hila ei ole, koska sen tekemiseen on käytetty eri tietokoneohjelmaa, mutta erot ovat niin pieniä, ettei niillä ole merkitystä.

Laskentahila on esitetty kuvassa 1. Origo on vasemmassa alakulmassa. x -akseli on vaakatasossa ja y -akseli pystysuunnassa. x -akselin suunnassa on 128 laskentakoppia. Pienimmän laskentakopin koko on 0.5 mm ja kopin koko kasvaa ekspansiokertoimella 1.028 jolloin viimeisen kopin koko on 15.95 mm . y -akselin suunnassa on 80 laskentakoppia. Ensimmäisen kopin koko on 0.09 mm ja koko suuttimen puolikkaan (leveys 1.4375 mm) kohdalla on yhtäsuuria koppeja. Sen jälkeen kopin koko kasvaa kertoimella 1.09, jolloin viimeisen kopin koko on 20.26 mm . z -akselin suunnassa on yksi koppi, jonka pituus on 5 mm . Laskentahilan mitat olivat täten $575 \times 250 \times 5 \text{ mm}$.



Kuva 1: Laskentahila

Suihku tulee sisään laskentahilaan kuvasta katsoen vasemmasta reunasta, kuudentoista alimman laskentakopin kohdalta. Loppuosa samasta hilan seinämästä on määritelty kiinteäksi. Laskentateknisistä syistä suihkun keskilinja (kuvassa alareuna) on määritelty sym-

metriatasoksi. Koska virtaus on kaksiulotteista, ovat molemmat z -akselin normaalitasot määritelty symmetriatasoiksi. Loput kaksi seinää on määritelty ulosvirtauspinnoiksi.

4 Suutinvirtauksen ominaisuudet

Laskentahilaan sisään tulevan virtauksen ominaisuudet määritetään FINFLO ohjelmassa ns. inlet-tiedoston avulla. Sisääntulevan virtauksen tiheys, nopeuskomponentit, kokonaisenergia, turbulenssin kineettinen energia ja turbulenssin dissipaatio annetaan kussakin sisääntulokohdan laskentakopissa. Kokoonpuristumattoman virtauksen tiheys on vakio ($\rho = 1.188 \text{ kg/m}^3$) ja muiden em. arvojen laskenta on esitetty seuraavassa.

4.1 Nopeusprofiili

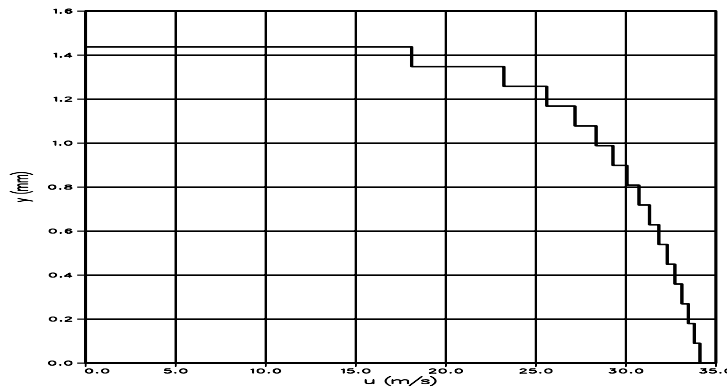
Nopeusprofiili laskettiin Prandtlin nopeusjakauman [3] avulla:

$$\frac{u_{max} - u}{v_{*0}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{y}; \quad (y = \text{etäisyys seinästä}) \quad (1)$$

Kaavassa esiintyvä kitkanopeus v_{*0} laskettiin vastaavalle putkivirtaukselle [3], koska kanavavirtaukselle sitä ei löytynyt.

$$v_{*0} = 0.150 u^{\frac{7}{8}} \left(\frac{\nu}{R} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (2)$$

Laskemalla nopeus suuttimessa olevien 16 laskentakoppin keskikohdissa, saatiin nopeusprofiili, joka on esitetty kuvassa 2. Virtauksen maksiminopeus iteroitiin sellaiseksi, että liikemäärä on yhtäsuuri kuin se olisi tapauksessa, jossa virtausnopeus olisi vakio 30 m/s suuttimen joka kohdassa. Tällä tavoin maksiminopeudeksi saatiin 34.26 m/s .



Kuva 2: Nopeusprofiili suuttimessa.

4.2 Kokonaisenergia

Ulosvirtausreunojen paine annetaan kokonaisenergian avulla. Se on määritelty kaavalla

$$E = \rho i + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) + \rho k \quad (3)$$

Tärkein termi on sisäenergia i jonka avulla paine määritellään kaavalla

$$p = i(\gamma - 1)\rho \quad (4)$$

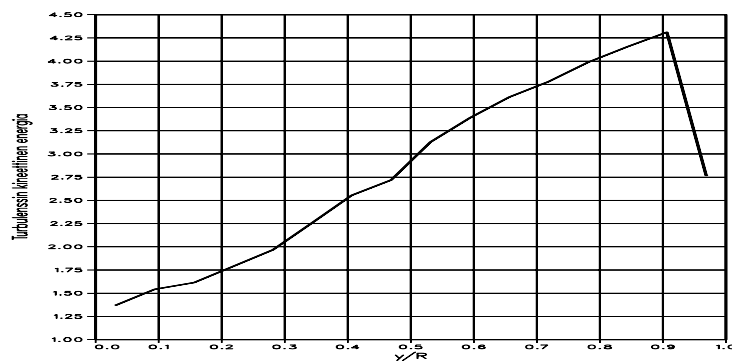
missä p on paine, i sisäenergia ρ tiheys ja $\gamma = 1.4$ (kaksiatomisille kaasuille).

4.3 Turbulenssin kineettinen energia

Turbulenssin kineettisen energian jakauma määritettiin turbulenssiasteen avulla. Turbulenssiaste suhteessa etäisyyteen putken reunasta määritettiin lähteen [4] kuvista Fig. 7.56 ja 7.57, jotka perustuvat Lauferin vuonna 1954 tekemiin mittauksiin. Mittauksissa oli käytetty suoraa 247 mm halkaisijaltaan olevaa saumatonta messinkiputkea, jossa virtasi ilmaa nopeudella 3 m/s ja 30 m/s. Reynoldsin luvut ovat tällöin vastaavasti 50 000 ja 500 000, eli huomattavasti suuremmat kuin lasketussa tapauksessa. Virtaus on kuitenkin kaikissa tapauksissa turbulenta, joten turbulenssiasteen jakauman oletettiin vastaavaksi. Turbulenssin kineettinen energia voitiin laskea turbulenssiasteen avulla kaavasta

$$k = \frac{3}{2} I^2 v^2 \quad (5)$$

Kuvassa 3 esitetään turbulenssin kineettisen energian jakauma. Vaaka-akselilla on etäisyys suuttimen keskilinjasta säteellä normeerattuna.



Kuva 3: Turbulenssin kineettisen energian jakauma.

4.4 Dissipaatio

Dissipaatio laskettiin lähteen [5] avulla. Nyt laskettu tapaus poikkesi siitä mm. virtausaineen osalta niin paljon, ettei lähteen arvoja voinut käyttää suoraan. Siksi määritettiin paljonko turbulenssi näennäisesti kasvattaa kinemaattista viskositeettia putken eri osissa. Dissipaation jakauma suuttimessa määritettiin näennäisen ja todellisen kinemaattisen viskositeetin suhteen perusteella.

Lähteen [5] kuvista 6.5 ja 6.6 määritettiin turbulenssin kineettisen energian ja dissipaation arvot suhteessa dimensiottoomaan etäisyyteen putken reunasta. Koska arvot oli helpompi lukea siten, että dimensiottooman etäisyyden ja käyrän leikkauspiste oli kuvassa olevalla apuviivalla, luettiin arvoja tasaisin 0.1 välein. Arvoista laskettiin turbulenta kinemaattinen viskositeetti, joka määritellään

$$\nu_r = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

missä c_μ :n arvo on 0.09.

Sen jälkeen laskettiin turbulenssin aiheuttaman näennäisen viskositeetin ja kinemaattisen viskositeetin suhteiden arvot ko. kohdissa. MATLAB ohjelman avulla suhteille laadittiin sovitte. Sovittepolynomin

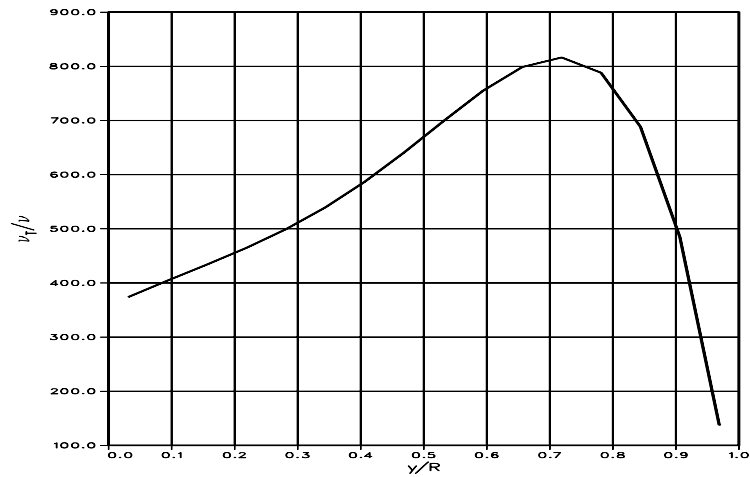
$$\frac{\nu_r}{\nu} = -6255.39r^5 + 6126.43r^4 - 625.02r^3 - 226.28r^2 + 571.8r + 358.04 \quad (7)$$

avulla laskettiin ν_τ/ν :n arvot laskentakoppien keskikohdissa. Nämä arvot dimensiottoman säteen funktiona esitetään kuvassa 4.

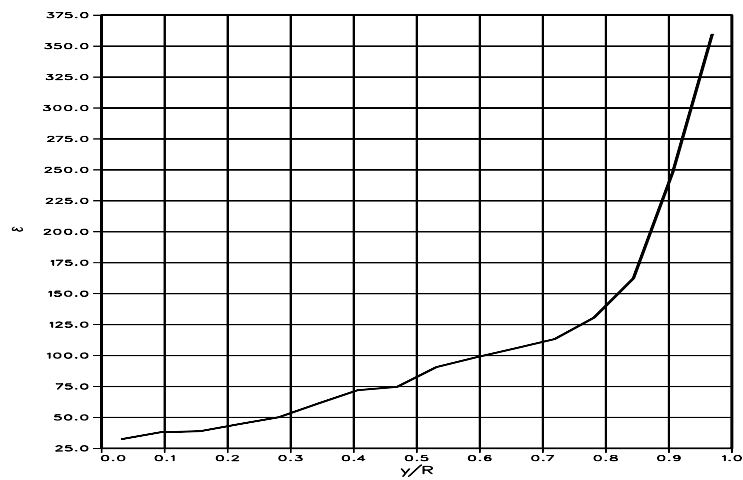
Kun kinemaattinen viskositeetti tunnetaan saadaan dissipaation arvot laskettua halutuissa kohdissa lausekkeesta

$$\varepsilon = c_\mu \frac{k^2}{\nu_\tau} \quad (8)$$

Dissipaation jakauma suuttimessa on esitetty kuvassa 5.



Kuva 4: ν_τ/ν :n jakauma



Kuva 5: Dissipaation jakauma

5 Tulokset

5.1 Keskilinjanopeus

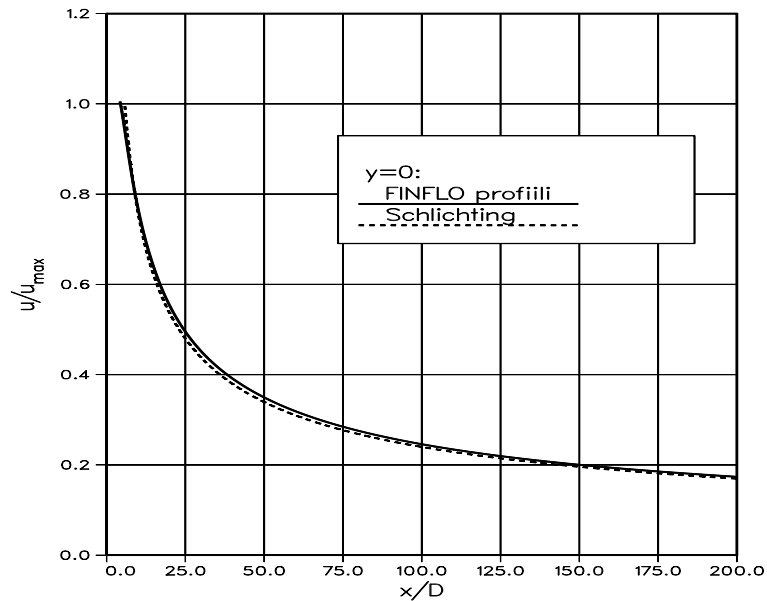
Keskilinjanopeus on esitetty kuvassa 6 käyttäen dimensioittomia nopeuden ja paikan arvoja, jotta niitä olisi mahdollista verrata kirjallisuudessa ja varsinkin lähteissä [1] ja [3] esitettyihin arvoihin. Nopeus on tehty dimensioittomaksi jakamalla nopeuden arvo kussakin kohdassa maksiminopeudella tai tässä tapauksessa oletetulla keskimääräisellä nopeudella 30 m/s. Lähteessä [3] Schlichting esittää empiirisen kaavan suihkunsuuntaiselle (x-suuntaiselle) nopeudelle:

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{K\sigma}{x}} (1 - \tanh^2 \eta) \quad (9)$$

$$\eta = \sigma \frac{y}{x}$$

missä K on kinemaattinen momentti ja σ on empiirinen vakio 7.67.

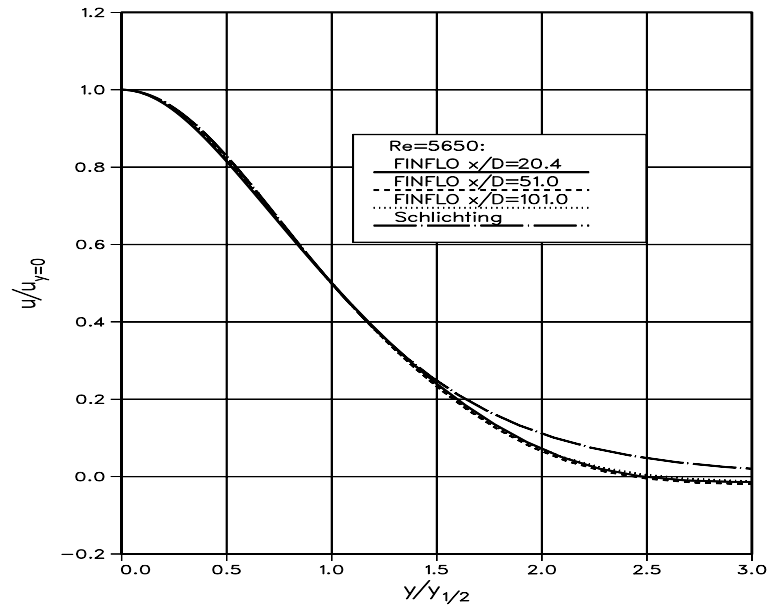
Kun y on nolla voidaan sulussa oleva osa jättää huomiotta, ja käyttää lauseketta keskilinjanopeuden laskemiseen. Kaavasta 9 laskettu keskilinjanopeus on myös esitetty kuvassa 6. Kaavasta laskettu keskilinjanopeus vastaa hyvin FINFLO:lla saatuja tuloksia.



Kuva 6: Nopeusjakauma suihkun keskilinjalla

5.2 Nopeusprofiilit

Nopeusjakaumat suihkua vastaan kohtisuorassa suunnassa (y -suunta) on esitetty kuvassa 7. Vaaka-akselilla on etäisyys suihkun keskilinjasta suhteessa siihen etäisyyteen, jossa x -suuntainen nopeus laskee puoleen keskilinjanopeudesta. FINFLO:n laskemat nopeusprofiilit on otettu kohdista $x/D = 20.4$, $x/D = 51.0$ ja $x/D = 101.0$. Vertailun vuoksi kuvassa on myös kaavasta 9 laskettu nopeusjakauma.

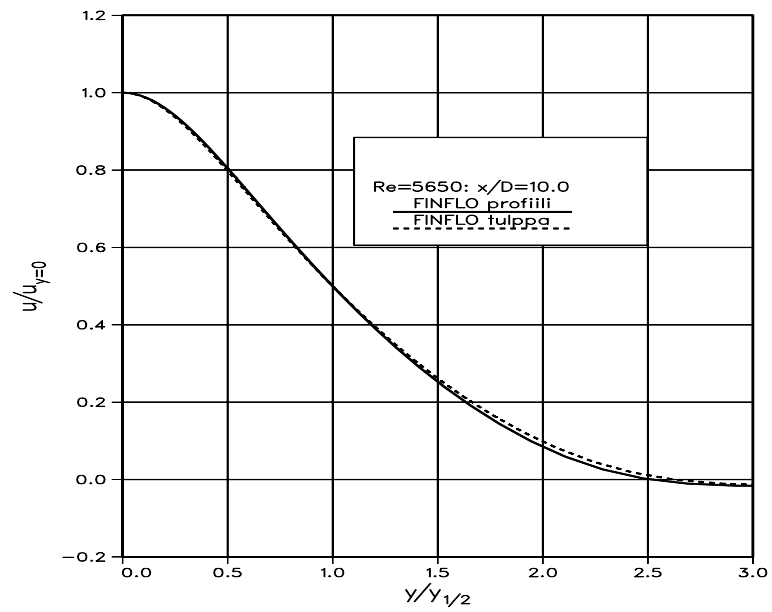


Kuva 7: u -nopeusprofiilit

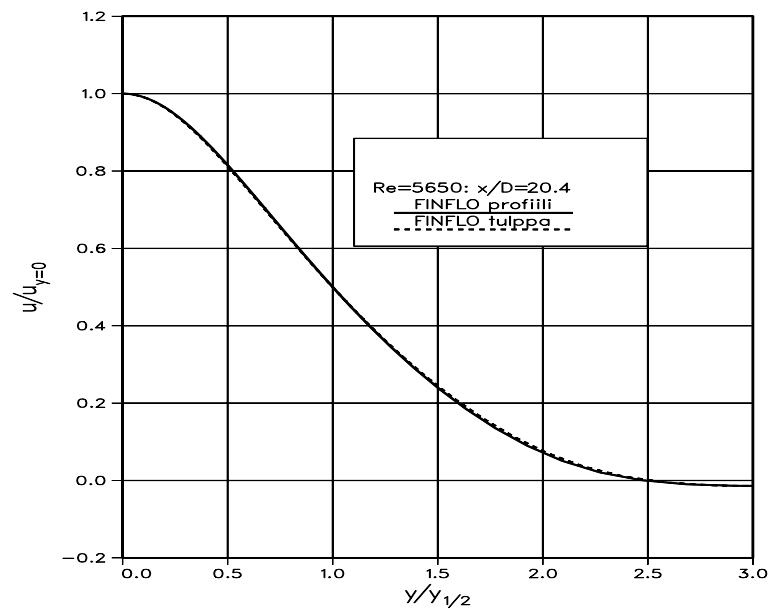
Kuvissa 8, 9, 10 ja 11 on vertailtu tulppavirtauksen ja profiilivirtauksen nopeusprofileja. Suurimmat erot ovat lähellä suutinta (kuvat 8 ja 9), kauempana profiilit ovat käytännössä samanlaiset.

Kuvassa 12 on FINFLO:n laskemat nopeusprofiilit siinä vaiheessa kun suihku tulee suuttimesta. Tulppavirtaustapauksessa profiili on alkanut kehittyä jo heti varsinaiseen laskentahilaan tullessa, johtuen reunaehtojen käsittelystä.

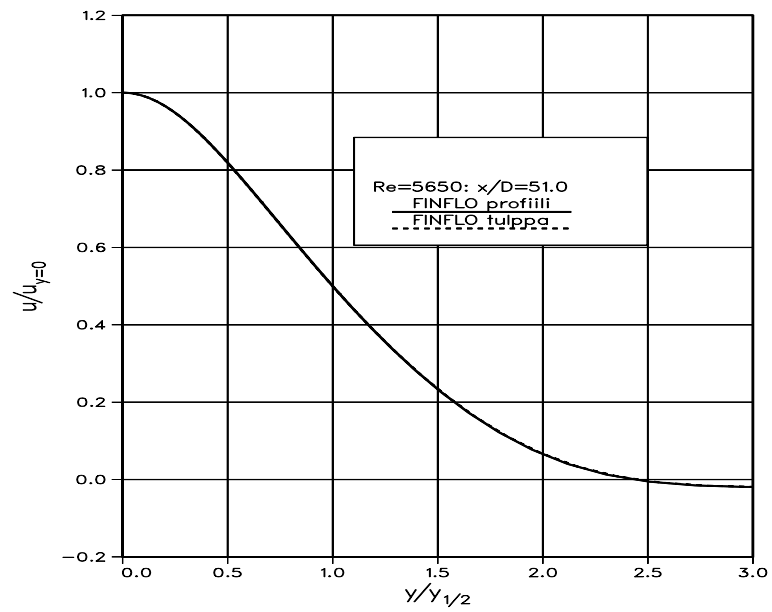
Kuvassa 13 on vertailtu nopeusprofileita kohdassa $x/D = 20.4$ käyttäen yksiköllistä nopeutta. Tällöin käy paremmin ilmi, että nopeusprofileissa on eroavaisuuksia. Mielenkiintoista on, että keskilinjalla nopeus on suurempi tulppavirtauksen tapauksessa, vaikka suuttimesta tullessa päinvastainen nopeusero on selvä, kuten myös suurimmassa osassa suihkun leveyttä. Kauempana suuttimesta (kuva 14, $x/D = 51.0$) keskilinjanopeus on sama molemmilla tapauksissa.



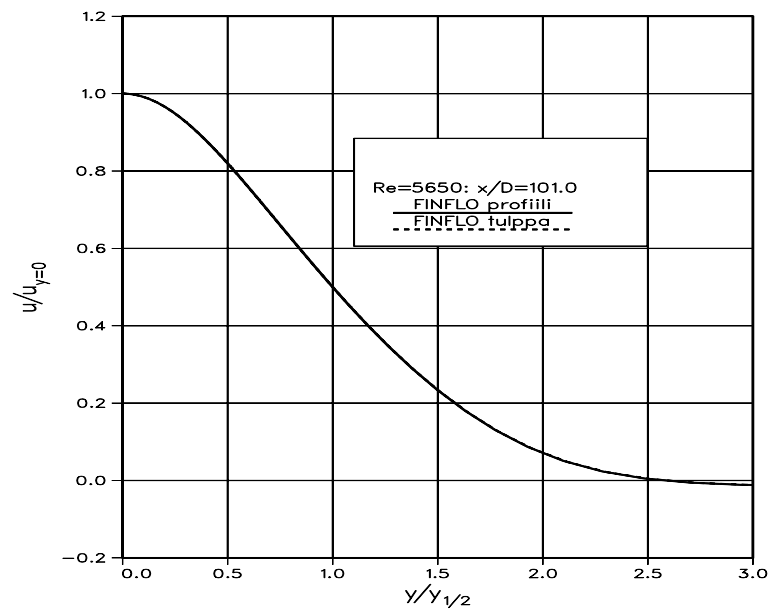
Kuva 8: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 10.0$



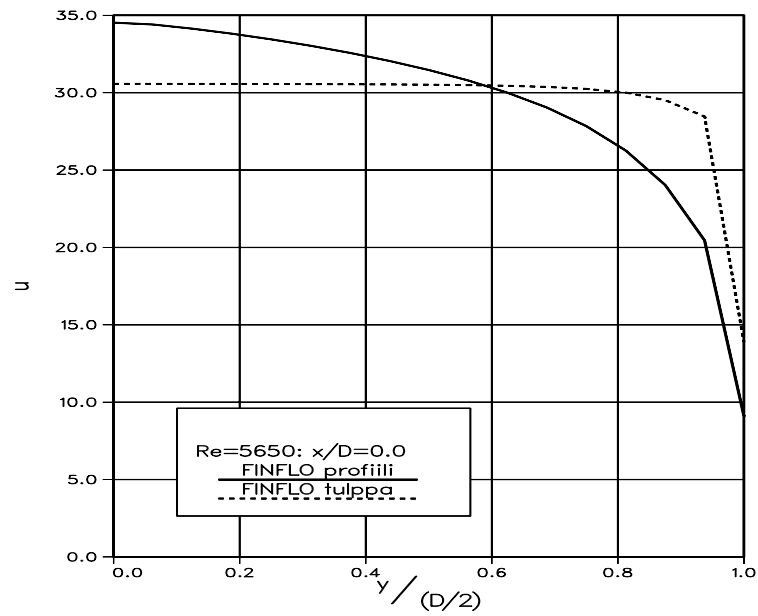
Kuva 9: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 20.4$



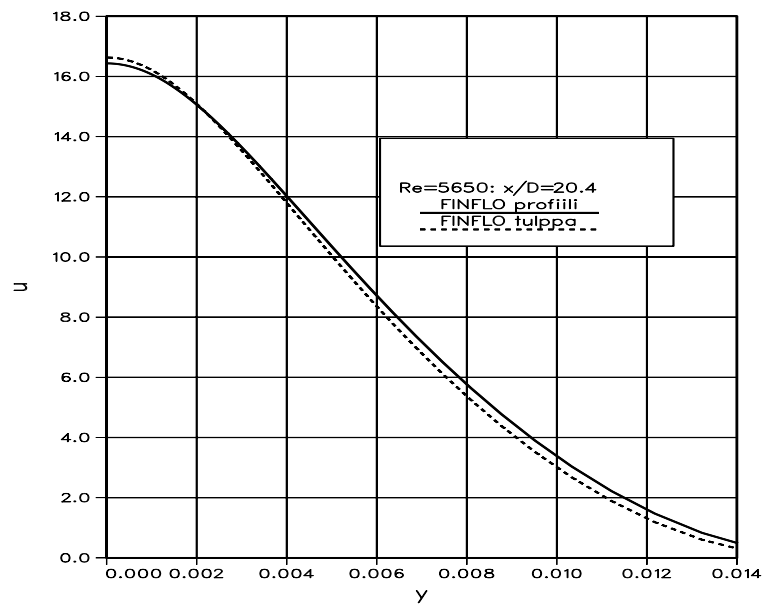
Kuva 10: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 51.0$



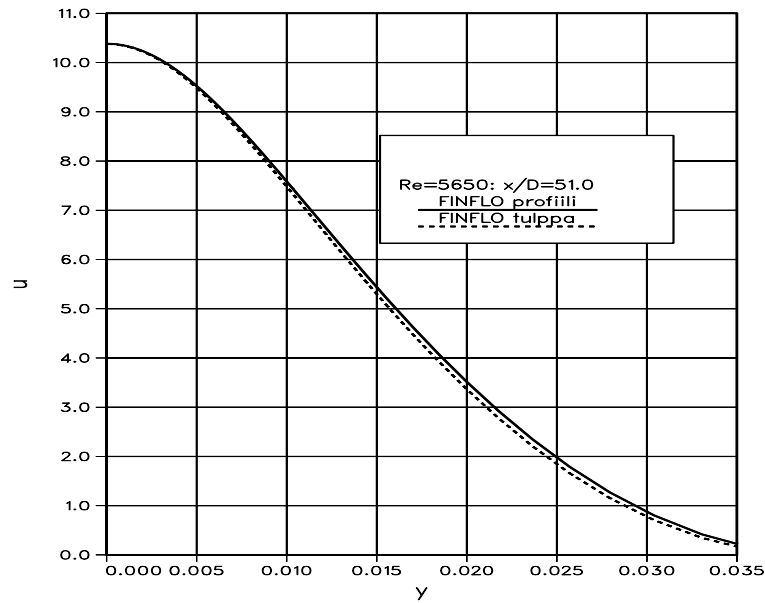
Kuva 11: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 101.0$



Kuva 12: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 0.0$



Kuva 13: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 20.4$, nopeus m/s



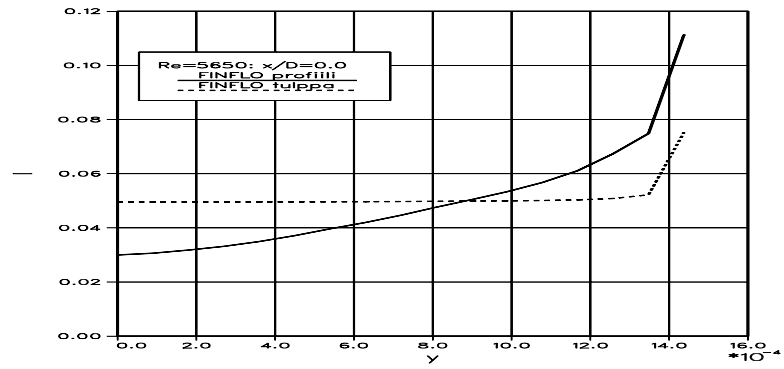
Kuva 14: Nopeusprofiilien vertailu $x/D = 51.0$, nopeus m/s

5.3 Turbulenssin intensiteetti

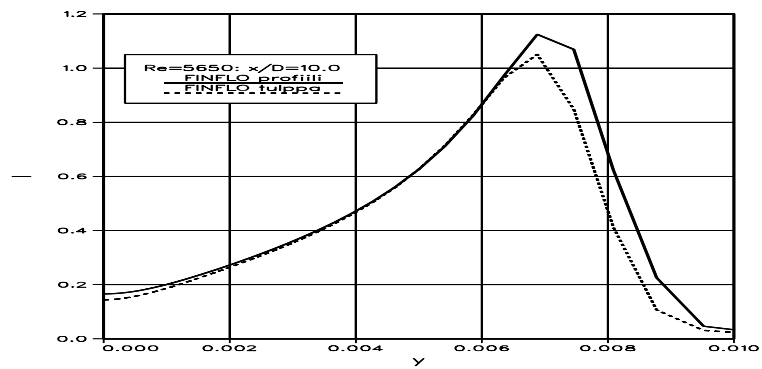
Kuvissa 15, 16 ja 17 on vertailtu tulppavirtauksen ja profiilivirtauksen turbulenssin intensiteettiä eri kohdissa. Koska turbulenssin intensiteetille oli välillisesti annettu jakauma profiilivirtauksen lähtötiedoissa, ero on suuttimesta ulostullessa ($x/D = 0.0$) luonnollisesti suuri. Kohdassa $x/D = 10.0$ jakaumat ovat jo lähestyneet toisiaan ja kohdan $x/D = 51.0$ jälkeen käyrät ovat käytännössä saman muotoiset.

5.4 Turbulenssin kineettinen energia

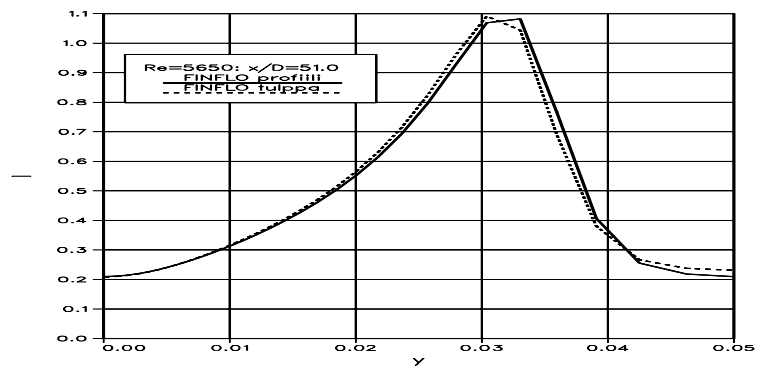
Turbulenssin kineettinen energia lähellä suutinta on esitetty liitteessä 1, kuvissa 18 ja 19. Profiilivirtaustapauksessa turbulenssin kineettinen energia on suurempi ja ennenkaikkea suurimman energiatason ala on suurempi kuin tulppavirtauksen tapauksessa. Suihkun reuna-alueella erot tasottuvat, kun etäisyys suuttimesta kasvaa. Tulppavirtauksen tapauksessa on myös havaittavissa aaltomaisuutta, jota ei profiilivirtauksessa ilmennyt. Tämä on merkki epästabiilisuudesta, jota suuret virtausarvojen gradientit suihkun reunalla aiheuttavat. Virtaus tasoittaa gradientit nopeasti, joten ongelma esiintyy vain lähellä suutinta.



Kuva 15: Turbulenssin intensiteetti, $x/D = 0.0$



Kuva 16: Turbulenssin intensiteetti, $x/D = 10.0$



Kuva 17: Turbulenssin intensiteetti, $x/D = 51.0$

5.5 Liikemäärä

Suihkun liikemäärän muutokset lähellä suutinta on esitetty liitteessä 2, kuvassa 20. Samassa kuvassa on myös suihkun ulkopuolelta lähtevät virtaviivat.

Lähellä suutinta laskettu nopeusprofiili näkyy liikemäärässä, jossa on havaittavissa alusta alkaen selvä jakauma. Tulppatapauksessa jakauma näkyy aivan suihkun reunalla, mutta virtaus alkaa kehittyä välittömästi. Profilitapauksen jakauma ulottuu pidemällä, mutta n. 15 mm päässä suuttimesta (kuvan reunassa) liikemääräjakaumat ovat samanlaiset.

Lasketut virtaviivat kulkevat lähtöpisteestään alaspäin ja hieman kohti suutinta. Tulppatapauksessa suutinvirtauksen reunan läheisyydessä virtaviivat suuntaavat voimakkaammin kohti suutinta. Kun virtaviiva tulee suihkun alueelle, kulkeutuu se suihkun mukana. Virtaviivoista näkyy myös, miten suihkun leveys kasvaa suihkun ottaessa lisää ilmaa mukaansa reunalta.

6 Johtopäätökset

FINFLO:lla laskettu ja Schlichtingin kaavasta laskettu keskilinjanopeus ovat lähes samanlaiset. Varmasti suurimmat erot syntyvät siitä, että lähellä suutinta keskilinjanopeus on suutinvirtauksen profiilista johtuen keskimääräistä nopeutta suurempi, mutta myöhemmin koko suutinvirtauksen liikemäärä on määrävissä asemassa.

Nopeusprofiilit ovat Schlichtingin kaavan mukaisia keskellä suihkua, mutta kun etäisyys keskilinjasta on n. 1.5 kertainen siihen etäisyyteen verrattuna, jossa nopeus on laskenut puoleen keskilinjanopeudesta, alkaa profiileihin tulla eroa. Vastaava ero on havaittavissa lähteen [1] sekä lasketuissa että mitatuissa jakaumissa. Kaava lienee kuitenkin tarkoitettu nopeasti laskettavissa olevaksi likimääräismalliksi, mihin se soveltuu mainiosti. Lasketut profiilivirtaustapauksen nopeusprofiilit ovat hyvin lähellä lähteen [1] mittaustuloksia.

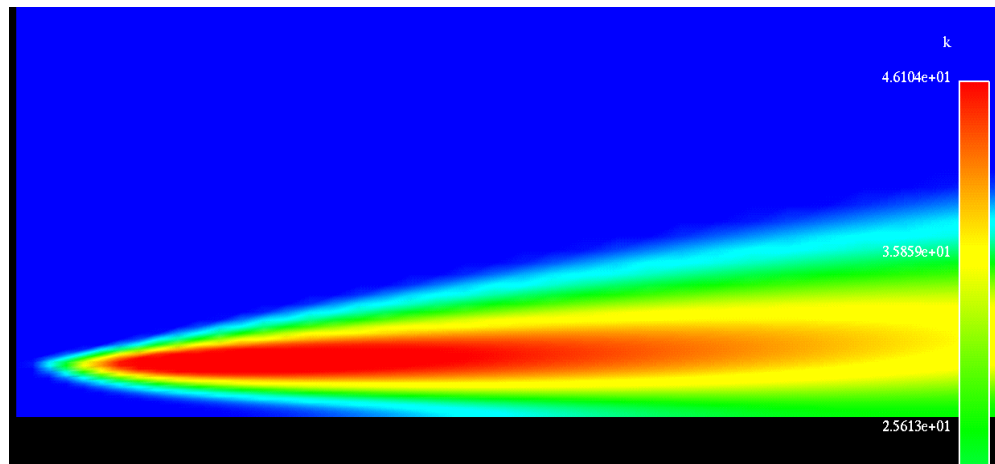
Tarkasteltaessa dimensiollisia nopeusprofileita havaitaan, että nopeudet ovat suurempia profiilivirtauksessa. Suutinvirtausten liikemäärät eivät ehkä olleetkaan riittävällä tarkkuudella yhtäsuuret. Mahdollisesti koppimäärä suuttimessa ei ollut riittävä sopivan jakautuman laskemiseen.

Vapaassa suihkussa turbulenssin kehittymisen kannalta tärkeintä on, mikä on Reynoldsin luku suihkussa. Suuttimen virtausominaisuudet ovat vähemmän merkittäviä, koska kuten kuvasta 18 nähdään, on turbulenssin tuotto vapaassa virtauksessa merkittävästi suurempi. Mikäli ei haluta kuvata ilmiöitä aivan lähellä suutinta ($x/D < 10.0$) on suutinvirtauksen nopeusprofiilin ja muiden virtausarvojen käyttämisestä reunaehtoina saatavissa vain vähän hyötyä. Konvergoitumisnopeudessa ei tapauksissa ollut merkittävää eroa. Suurin hyöty lienee virtauksen stabiloituminen, koska suuret gradientit suihkun reunan ja ympäröivän ilman välillä aiheuttavat epästabiliisuutta.

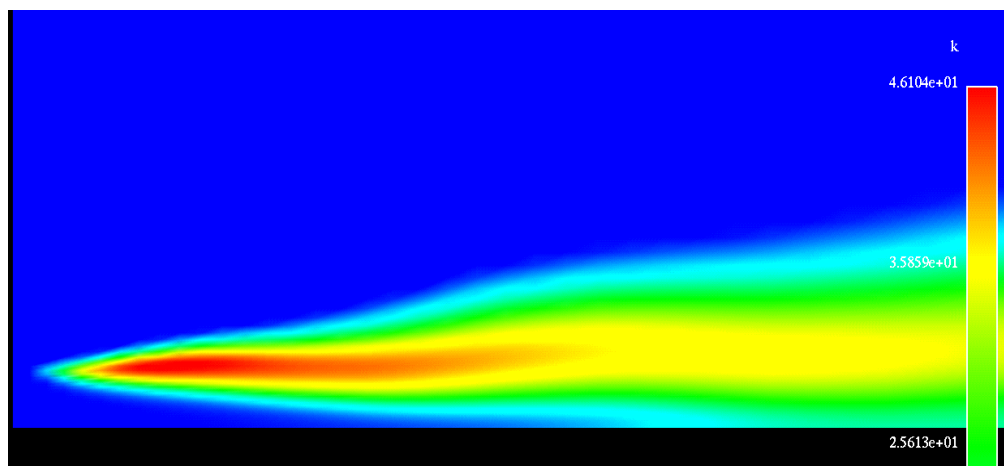
Viitteet

- [1] Miettinen, A. ja Rautaheimo, P., *LDA-measurements and CFD calculations of 2D Single and Dual Unvetilated Jets*, Teknillinen Korkeakoulu, CFD-ryhmä / Sovelletun termodynamiikan laboratorio, 1997
- [2] Siikonen, T. *FINFLO User Guide, Version 2.2* Helsinki University of Technology, Laboratory of Applied Thermodynamics, 1997.
- [3] Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, New York: McGraw-Hill Book Co., 7th ed., 1979. ISBN 0-07-055334-3.
- [4] Hinze, J. O., *Turbulence*, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1987. ISBN 0-07-029037-7.
- [5] Ojala, J., *Keskipakopumpun virtauksen laskenta näennäispuristuvuuskeinoja hyväksi käyttäen*. Julkaisematon. Diplomityö, TKK, 1996.

Liite 1.

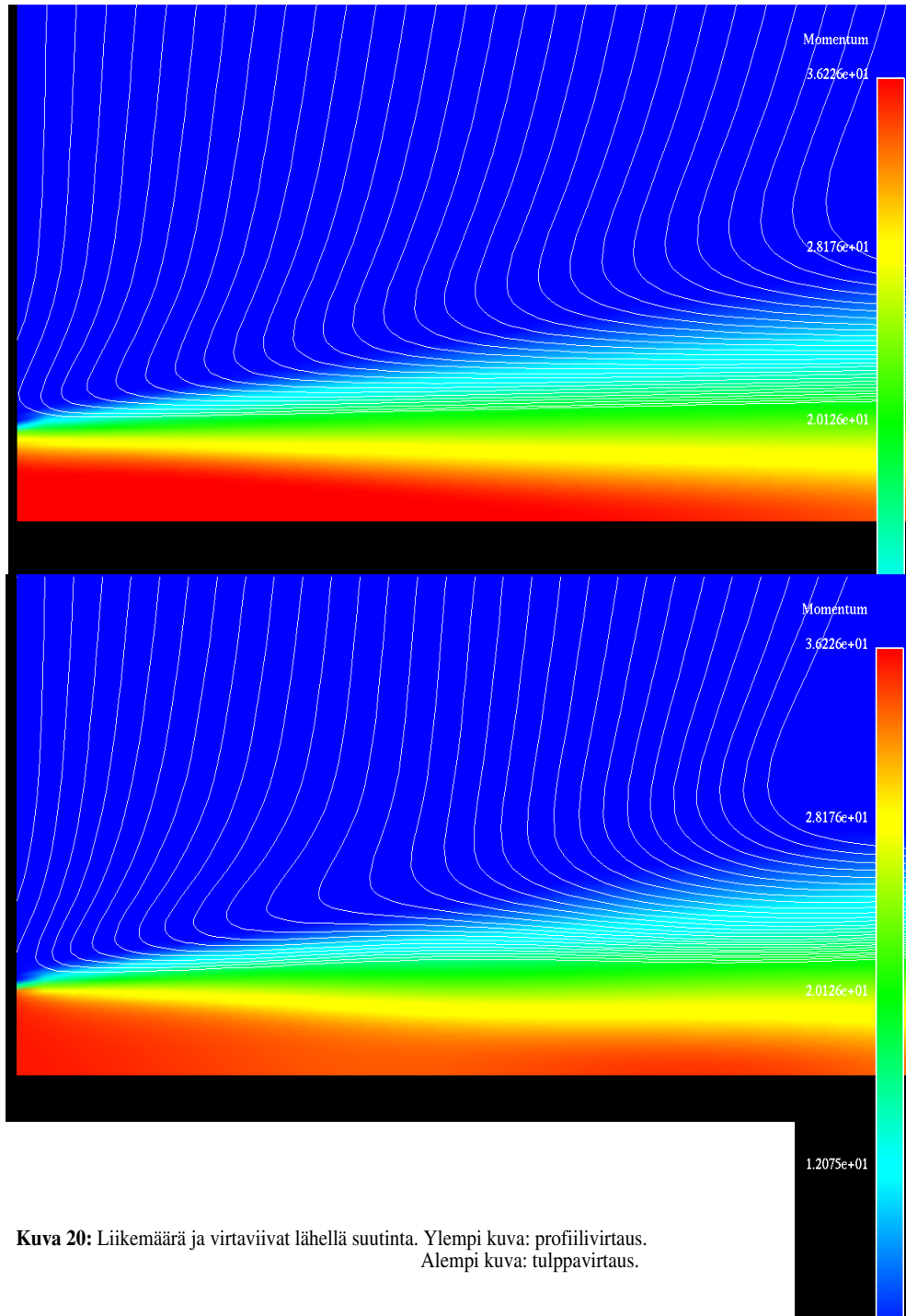


Kuva 18: Turbulenssin kineettinen energia lähellä suutinta, profilivirtaus



Kuva 19: Turbulenssin kineettinen energia lähellä suutinta, tulppavirtaus

Liite 2.



Kuva 20: Liikemäärä ja virtaviivat lähellä suutinta. Ylempi kuva: profiilivirtaus.
Alempi kuva: tulppavirtaus.