

# Isotermisen poltinvirtauksen laskenta

Risto Huhtanen

VTT Energia



ISBN 951-38-4539-7 (nid.)

ISSN 1235-0613 (nid.)

ISBN 951-38-5000-5 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0857 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (90) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT,  
Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energian käyttö, Tekniikantie 4 C, PL 1604, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 5000

VTT Energi, Energiandvändning, Teknikvägen 4 C, PB 1604, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 5000

VTT Energy, Energy Use, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1604, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 5000

Tekninen toimitus Maini Manninen

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1997

Huhtanen, Risto. Isotermisen poltinvirtauksen laskenta. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 827. 66 s. + liitt. 9 s.

**UDK** 532.517(083.7):51-7

**Avainsanat** flow analysis, isothermal flow, turbulent flow, combustion chambers, burners

## TIIVISTELMÄ

Työssä kuvataan kolmen eri turbulenssimallin kykyä kuvata isotermistä virtausta polttimen lähialueella. Mallit ovat k-e-malli, RNG-k-e-malli sekä Reynoldsin jännitysmalli (RSM). Fluent-ohjelmalla tehtyjä simulointeja verrataan sekä mittaustuloksiin että aikaisemmin laskettuihin tuloksiin neljälle tapaukselle.

Tulokset poikkeavat joiltakin osin aiemmin International Flame Research Foundationin esittämistä harvemmillä verkolla suoritetuista laskuista. RNG-turbulenssimalli kuvaa joiltakin osin nopeusjakautuman tavanomaista k-e-mallia paremmin lisäämättä oleellisesti laskenta-aikaa. RNG-malli kuvaa kuitenkin polttimessa muodostuvan paluuvirtausalueen poikkeuksetta liian pitkäksi. Reynoldsin jännitysmallin käyttö tuottaa näistä malleista tarkimman tuloksen, mutta vaatii jonkin verran enemmän laskenta-aikaa ja varsinkin reunaehtojen asettaminen ja laskeminen saatavilla olevista tiedoista voi olla työläämpää. Lisäksi konvergoituneen tuloksen saaminen saattaa RSM-laskennassa olla työlästä ja vaatia sopivan diskretoinnin valitsemisen eri suureille.

Reynoldsin jännitysmalli vaatii muita malleja enemmän laskenta-aikaa. Tästä ei tehty kuitenkaan tarkempaa vertailua. Ero ei ole kovin merkittävä. Suurempi ero tulee siitä, että Reynoldsin jännitysmallin kanssa reunaehdot voidaan määrittellä tarkemmin, mikä lisää tehtävän määrittelyyn käytettävää aikaa. Vaihtoehtoisesti reunaehdot on mahdollista antaa samalla tavalla yksinkertaistaen kuin kaksiyhtälömallien kanssa. Lisäksi konvergoituneen tuloksen saamiseksi on mahdollisesti oltava huolellisempi iteraatioparametrien ja diskretointimenetelmien valinnassa kuin muita malleja käytettäessä. Reynoldsin jännitysmallin alkutilana on usein käytettävä joko k-e-mallilla tai RNG-mallilla laskettua tulosta, jotta laskenta saadaan konvergoitumaan.

Mikään turbulenssimalleista ei ole ehdottomasti muita parempi kaikissa tehtävissä. Vertailua haittaa kuitenkin polttokammion poistoaukon reunaehtojen asettamiseen liittyvät epämääräisyydet. Kyseinen reunaehto vaikuttaa eniten RSM-laskentaan ja vähiten k-e-mallilla tehtyyn laskentaan.

Tämä työ on tehty TEKESin Virtausdynamiikan teknologiaohjelman turbulenssi-projektissa.

## ESIPUHE

Tämä työ on tehty TEKESin osittain rahoittamassa virtausdynamiikan teknologiaohjelman turbulenssiprojektissa.

Työn tarkoituksena on saada kokemusta kaupallisessa Fluent-ohjelmassa käytössä olevien turbulenssimallien suorituskyvystä polttimen virtauksen laskennassa.

Samansisältöistä työtä englantilaisella CFX-virtausohjelmalla on tehnyt Tampereen teknillisessä korkeakoulussa tekniikan tohtori Hannu Ahlstedt, jota kiitän mielenkiintoisista keskusteluista. Kiitos myös apulaisprofessori Timo Siikoselle työtä koskevista kommentteista.

Espoo, Lokakuu 1997

Risto Huhtanen

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ESIPUHE	4
1 JOHDANTO	7
2 VIRTASTILA POLTTIMESSA JA TULIPESÄSSÄ	7
3 LASKETTAVAT TAPAUKSET	9
4 AIKAISEMMAK LASKUT	10
4.1 Laskentaverkon vaikutus tuloksiin	10
5 KÄYTETTÄVÄT TURBULENSSIMALLIT	12
5.1 k-e-malli	12
5.2 Fluentin k-e-malli	12
5.3 RNG k-e-malli	12
5.4 Reynoldsin jännitysmalli	13
6 REUNA-EHDOT	14
7 LASKENNAN TOTEUTUS	15
7.1 Konvektiotermien diskretointi	15
7.2 Laskennan konvergoituminen	15
7.3 Reunaehdon vaikutus	15
7.4 Ratkaisumenetelmät	16
8 VERTAILU AIKAISEMPIIN LASKUIHIN	16
8.1 Iteraatio-suunnan vaikutus	16
8.2 k-e-mallin tulokset	17
9 LASKETUT TAPAUKSET	18
9.1 Poltin 7	18
9.2 Poltin 10	30
9.3 Poltin 11	39
9.3.1 Käänteisen iteraatio-suunnan vaikutus	51
9.3.2 Putken loppuosan supistuksen vaikutus	51
9.4 Poltin 49	54
10 YHTEENVETO	63
11 LÄHDELUETTELO	66
LIITTEET	
Liite 1. Laskennassa käytetyt reunaehdot	
Liite 2. Mittauksista ja aikaisemmista laskuista saatu vertailuaineisto (IFRF lähteet [1] JA [3]).	



# 1 JOHDANTO

International Flame Research Foundation (IFRF) on julkaissut laskennallisesti ja kokeellisesti saatuja tuloksia polttimen lähialueen virtauksesta [1], [2], [3]. Kyseisissä tapauksissa on tutkittu isotermisen virtauksen kulkua eri muotoisissa polttimissa. Nämä eivät siis sisällä palamisen vaikutusta, vaan tässä on haluttu keskittyä virtaukseen ja turbulenssisuureisiin ja niiden mallintamiseen.

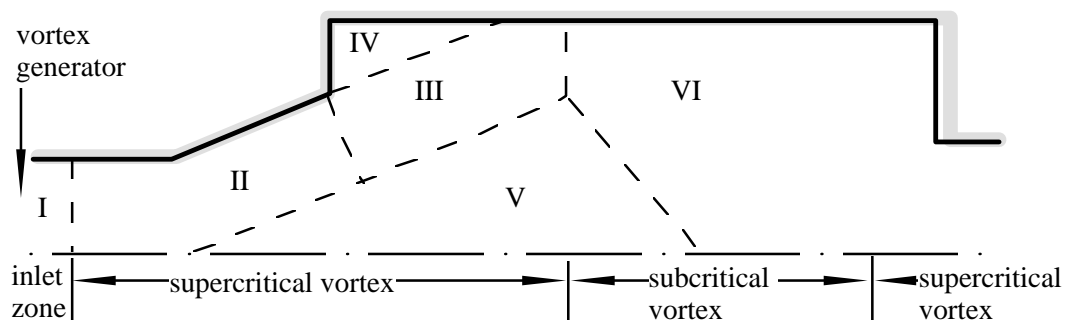
Tässä työssä kokeillaan eri turbulenssimallien suorituskykyä joidenkin edellä mainittujen tapausten simuloimisessa. Tuloksia verrataan sekä kokeellisiin että muiden laskijoiden saamiin arvoihin. Laskentaan käytetään Fluent-ohjelman versiota 4.3.2 [5].

Raportissa kuvataan aluksi tutkittavat tapaukset, viitataan aikaisempiin IFRF:n tekemiin vertailulaskelmiin, käydään lyhyesti läpi turbulenssimallien yhtälöt ja niiden parametrit ja käydään läpi laskennan käytännön toteutus. Lopuksi esitetään yksityiskohtaisemmin kunkin tapauksen laskenta ja siitä saadut tulokset sekä verrataan näitä mittaustuloksiin. Tässä yhteydessä esitetään myös sellaisia tuloksia, joista ei ole mittauksia saatavilla, mutta jotka ovat mielenkiintoisia polttimen laskennan kannalta (kuten turbulenssin aika- ja pituusskaalat).

Samoja tilanteita on laskettu Tampereen teknillisessä korkeakoulussa CFDS-Flow3D-ohjelmalla [6] (muutettu sittemmin CFX-nimiseksi).

## 2 VIRTAUSTILA POLTTIMESSA JA TULIPESÄSSÄ

Polttimen ja tulipesän virtaus riippuu sekä reunaehdoista että alueen muodosta. Kuvassa 1 määritellään tulipesän eri alueita muodon mukaan. Kullakin alueella vallitsee yleensä tietynlainen virtaustila. Reuna- ja alkuehdot vaikuttavat alueiden keskinäisiin suhteisiin. Alueet on nimetty lähteen [1] mukaan.



Kuva 1. Tulipesän virtausalueet.

I Sisäänvirtausalue, jossa alkuperäinen pyörregeneraattorin jälkeinen virtauskenttä vaikuttaa voimakkaasti.

II ja III Suihkuvirtauksen alueet (peak zones), joissa vallitsevat suuret nopeusgradientit aiheuttavat turbulenssiin anisotrooppisuutta.

IV Ulompi paluuvirtausalue (External Recirculation Zone), jonka virtaus aiheutuu lähinnä viskoosien voimien vaikutuksesta.

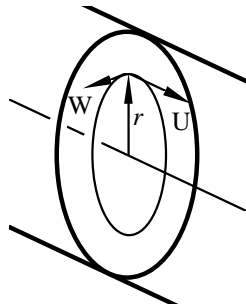
V Sisempi paluuvirtausalue (Internal Recirculation Zone), jonka pyörivän tulovirtauksen leviäminen saa aikaan. Alueen muoto vaihtelee sisäänvirtauksen reunaehtojen ja tulipesän muodon mukaan.

VI Ulosvirtausalue, jossa nopeusgradientit ovat jo oleellisesti tasoittuneet. Turbulenssin kineettinen energia vaimenee nopeasti tässä alueessa.

Virtauksen pyörimisluku  $S$  (swirling number) määritellään tässä sekä lähteissä [1] ja [3] lausekkeella (joissakin lähteissä esiintyy lauseke, jossa nimittäjässä on mukana painetermi)

$$S = \frac{\int_0^R UW r^2 dr}{R \int_0^R U^2 r dr} \quad (1)$$

missä aksiaalista ja tangentialista nopeuskomponenttia  $U$  ja  $W$  havainnollistetaan kuvassa 2. Pienellä pyörimisluvun arvolla ( $W$ -komponentti pieni) virtaus putkessa on parabolinen siten, että alavirrassa olevat virtauksen häiriöt eivät kulkeudu ylävirtaan päin. Suurella pyörimisluvun arvolla pyörimisestä aiheutuu painekentän muutos, joka mahdollistaa häiriöiden etenemisen ylävirtaan. Ilmiöön sidonnaisella terminologialla puhutaan alikriittisestä (subcritical) tilanteesta, kun häiriöt voivat levitä ja ylikriittisestä tilanteesta (supercritical) kun häiriöt eivät etene ylävirtaan. Lähteessä [1] annetaan tällaiseksi pyörimisluvun  $S$  kriittiseksi arvoksi 0,96, jota pienemmällä arvolla häiriöt eivät etene ylävirtaan. Muissa lähteissä lukuarvo saattaa olla hieman erilainen.

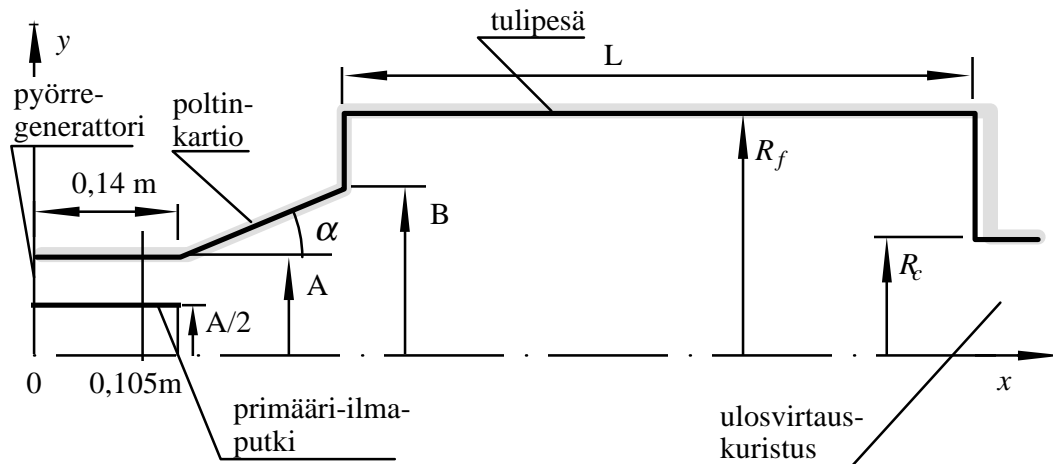


Kuva 2. Pyörimisluvun määrittelyssä käytettävät suureet  $U$ ,  $W$  ja  $r$ . Nopeus  $U$  on putken akselin suuntainen ja  $W$  sekä tätä että sädettä  $r$  vastaan kohtisuora nopeuden tangentialikomponentti.



### 3 LASKETTAVAT TAPAUKSET

Raporteissa [1] ja [2] esitetään lukuisia joukko tapauksia. Näiden laskennassa on aikaisemmin saatu joku käsitys eri turbulenssimallien suorituskyvystä. Nyt laskettavat tapaukset on valittu siten, että joissakin tapauksissa k-e-malli on aikaisemmissa laskuissa toiminut hyvin ja joissakin tapauksissa huonosti. Pyörähdyssymmetrinen polttin avautuu suurempaan sylinterin muotoiseen palokammioon, jonka ulosmenopäässä voi olla kuristus.



Kuva 3. Polttimen ja tulipesän mitat. Ainoastaan tapauksessa 49 on erillinen primääri-ilmaputki.

Tässä työssä lasketaan tapaukset 7, 10, 11 ja 49 [1], [2], [3]. Näissä polttin avautuu joko kapeaan tai leveään tulipesään. Koejärjestely ja mitat esitetään kuvassa 3 ja taulukossa 1.

Taulukko 1. Polttimen ja polttokammion mittasuhteet eri tapauksissa. Tulipesän pituus  $L$  ja polttimen sisäänvirtausaukko  $A$  ovat samat kaikissa tapauksissa. Tapauksessa 49 käytettävän primääri-ilmaputken säde on  $A/2$ .

Tapaus n:o	$\frac{R_f}{A}$	B/A	$\alpha$	$\frac{R_c}{A}$	S
7	3,36	1,5	20 °	2,31	1,2
10	5,05	1,5	20 °	2,31	1,2
11	2,31	2,0	20 °	2,31/1,0	0,7
49	2,31	2,0	35 °	2,31	1,5
L	4,0 m				
A	0,095 m				

Aiemmin tapaukset on laskettu joko k-e-mallilla tai algebrallisella Reynoldsin jännitysmallilla (ASM) [1] sekä myös RNG-k-e- ja Reynoldsin jännitysmallilla

[3]. Tässä työssä laskut tehdään sekä tavallisella k-e-mallilla että Fluentissa optiona olevalla RNG-k-e-mallilla. Lisäksi kokeillaan mahdollisuuksien mukaan Fluentin Reynoldsin jännitysmallia (RSM).

## 4 AIKAISEMMAT LASKUT

Aikaisemmissa laskuissa on tehty seuraavat oletukset [1]:

- Oletetaan, että virtauskenttä on stationäärinen.

Tämän oletuksen seurauksena mitään epästationäärisiä ilmiötä ei saada näkyviin. Mittauksissa on tehty (implisiittisesti) sama oletus. Dokumentista [1] ei tarkkaan selviä, millaista integrointiaikaa mittausjärjestelyissä on käytetty, mutta luultavasti se on vaihdellut virtausnopeuden mukaan.

- Oletetaan, että virtaustila on pyörähdysymmetrinen.

Oletus estää kolmidimensioisten ilmiöiden kuvaamisen, vaikka se muuten voisi ollakin mahdollista. Oletus on kuitenkin yleinen ja ymmärrettävä, koska se mahdollistaa tarkemman resoluution ja/tai lyhyemmän laskentaajan. Yhdessä edellisen oletuksen kanssa tehdään kuitenkin tyhjäksi kolmidimensioisten epästabiliin ilmiöiden kuvaaminen. Vaikka sekä geometria että reunaehdot ovat symmetriset ja stationääriset, ei siitä seuraa, että virtaustila olisi symmetrinen ja stationäärinen.

Laskuissa käytetty koppien määrä on ollut 1 600–2 500 laskentakoppia aksiaalisymmetrisessä stationäärisessä tapauksessa [1] ja vastaavasti 2 100–19 992 lähteen [3] tapauksissa.

Aiemmissa laskuissa virtausreunaehdot on otettu mahdollisuuksien mukaan mittauksista [1]. Ylikriittisissä tapauksissa turbulenssin kineettinen energia  $k$  on arvioitu mittaustulosten perusteella, mutta turbulenssin vaimeneminen  $\epsilon$  on arvioitu lausekkeella

$$\epsilon = \frac{c_{\mu}^{0,75} k^{1,5}}{0,007 A} \quad (2)$$

missä  $c_{\mu}$  on turbulenssimallin kerroin ( $c_{\mu} = 0,09$ ), ja  $A$  on poltinsuuttimen säde. Reunaehdot on tässä tapauksessa asetettu poltinkartion alun tilanteen mukaan.

Alikriittisissä tapauksissa polttimen alussa tapahtuva voimakas transiio alikriittisestä ylikriittiseen on yritetty kuvata, joten laskenta on aloitettua heti pyörregeneraattorista. Tässä on oletettu, että pyörregeneraattorista tuleva ilma pyörii jäykkänä kappaleena. Turbulenssin vaimenemisen arvioinnissa käytettäväksi turbulenssin pituusskaalaksi oletetaan  $A/10$ .

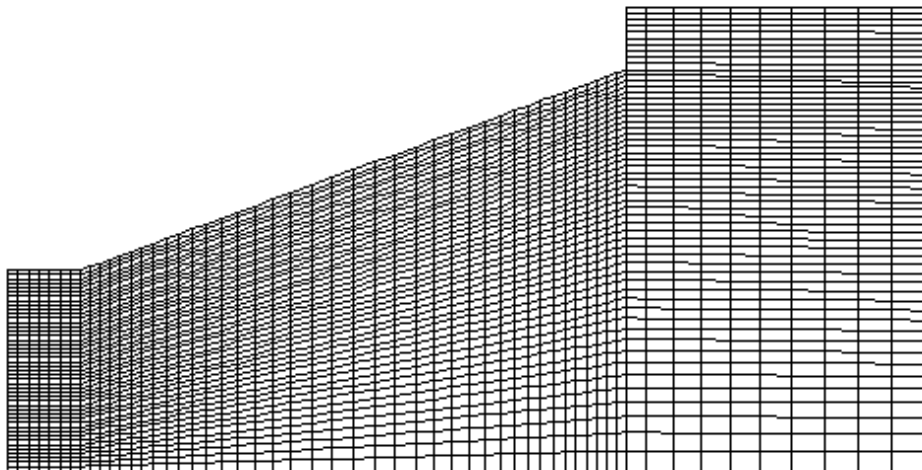
#### 4.1 LASKENTAVERKON VAIKUTUS TULOSSIIN

Aikaisemissa laskuissa on yritetty kiinnittää huomiota erityisesti verkosta riippumattomien tulosten saamiseen. Laskenta on suoritettu erilaisilla verkon tiheyksillä. Kokeilujen tuloksena saatiin:

- Turbulenssimallien vertailua voidaan tehdä vain, jos laskentaverkko on riittävän tiheä. Harvalla verkolla kaikki mallit antavat huonon tuloksen.
- Tihentäminen ei paranna kaikkien mallien antamia tuloksia samalla tavalla.

Kummassakin aiemmassa laskennassa on käytetty pääasiassa suorakulmaista laskentaverkkoa. Valinnan haittana on se, että vinot seinät joudutaan kuvaamaan porrastettuina. Lähteen [1] laskujen aikaan Fluentissa ei liene ollut käytössäkään vinoja laskentakoppeja sallivaa versiota, joten tämä oli ainoa vaihtoehto. Lähteessä [3] on verrattu sekä suorakulmaisen että vinon laskentaverkon vaikutusta tapauksessa 11 ja todettu, että vinolla rakennetta seuraavalla BFC-hilalla tarvitaan huomattavasti vähemmän koppeja samaan tarkkuuteen pyrittäessä. Suorakulmaisella verkolla riittää  $138 \cdot 58$  laskentakoppia. Määrän lisääminen  $168 \cdot 119$ :ään ei tuonut oleellista parannusta tarkkuuteen. BFC-verkolla riittää samaan tarkkuuteen  $70 \cdot 30$  koppia. Lähteessä [3] tehdyt laskut on kuitenkin (luultavasti) tehty suorakulmaisella verkolla.

Tässä kokeilussa kaikki laskentaverkot on tehty myötäilemään rakennetta (BFC-verkko). Verkko valittiin em. aikaisempien kokeilujen perusteella eikä tarkempaa selvitystä tehty. Laskentakoppien määrä vaihtelee hieman eri tapauksissa. Tapauksessa 11 on käytetty  $152 \cdot 57$  koppia, joten verkko on aikaisempia kokeiluja tiheämpi. Kuvassa 4 esitetään laskentaverkon alkuosa tapauksessa 11.



*Kuva 4. Laskentaverkon alkuosa tapauksessa 11. Poltinkartion alueella on aksiaalisuunnassa 38 ja radiaalisuunnassa 46 laskentakoppia.*

## 5 KÄYTETTÄVÄT TURBULENSSIMALLIT

### 5.1 k-ε-MALLI

Turbulenssin kuvaamisessa käytettävät turbulenssin kineettisen energian  $k$  ja turbulenssin vaimenemisen  $e$  yhtälöt mallinnetaan usein muodossa [4]

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}ku_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \bar{\rho} \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} c_{\varepsilon 1} \sigma_{ij}^{(t)} \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

missä lausekkeissa olevien kertoimien arvot ovat

$$\begin{aligned} \mu_t &= c_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \\ c_\mu &= 0,09 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \\ c_{\varepsilon 1} &= 1,44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1,90 \\ \sigma_{ij}^{(t)} &= \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\rho} k \end{aligned} \quad (5)$$

### 5.2 FLUENTIN k-ε-MALLI

Turbulenssiyhtälöiden mallinnettu muoto on ohjelmassa sama kuin edellä kuvattu, paitsi että kummassakin yhtälössä on jätetty pois molekulaarista viskositeettia vastaavat diffuusiotermit (yhtälöiden toiseksi viimeiset termit). Näillä on tässä tapauksessa merkitystä ainoastaan rajakerroksen viskoosissa alakerroksessa.

Malliin liittyvät kertoimet ovat muuten samat, mutta kertoimelle  $c_{\varepsilon 2}$  käytetään arvoa 1,92 [5, s. 19-19].

### 5.3 RNG k-ε-MALLI

RNG-k-ε turbulenssimalli on melko uusi, eikä sen teoria ole kovin hyvin tunnettu laajemmalti. Joitakin osia mallista kehitellään yhä ja eikä näistä ole saatavissa kunnollista dokumentointia. Tällainen on esimerkiksi pyörimisen huomioon ottava korjaustermi.

Malli on kaksiyhtälömalli, jossa lasketaan turbulenssin kineettisen energian  $k$  ja turbulenssin vaimenemisen  $e$  taseet yhtälöistä [5]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = v_t S^2 - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha v_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_t S^2 - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R + \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha v_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \quad (7)$$

missä termi  $R$  lasketaan mallinnetusta yhtälöstä

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (8)$$

ja parametrit  $h$ ,  $h_0$  ja  $S^2$  määritellään lausekkeilla

$$\eta = S k / \varepsilon \quad \eta_0 \approx 4,38 \quad S^2 = 2 S_{ij} S_{ij} \quad (9)$$

missä jännitysvenymätensori  $S_{ij}$  on

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

Mallissa olevat kertoimet on johdettu teorian perusteella eikä tiettyjen erillisten kokeiden antamien mittaustulosten avulla kuten tavallisessa k-e-mallissa. Kertoimien arvot eroavat jonkin verran edellisen kertoimista ja ovat

$$C_\mu = 0,0845 \quad C_{1\varepsilon} = 1,42 \quad C_{2\varepsilon} = 1,68 \quad \alpha = 1,39 \quad (11)$$

k-e-mallissa ei varsinaisesti ole parametria  $a$ , mutta sen voidaan katsoa olevan arvoltaan yksi.

Malliin on esitetty modifikaatio voimakkaasti pyöriville virtauksille. Kerrointa  $C_\mu$  muutetaan paikallisen pyörimisnopeuden mukaan. Kertoimen arvo riippuu muuttujista

$$C_\mu = C_{\mu 0} f \left( \alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon} \right) \quad (12)$$

missä  $C_{\mu 0}$  on 0,0845,  $W$  on karakteristinen pyörimisluku ja  $a_s$  parametri, jonka arvo riippuu siitä onko pyörimen voimakasta vai heikkoa. Lausekkeen tarkempaa muotoa ei ole saatavissa, vaan se on käytettävissä ainoastaan Fluent-ohjelmassa. Simuloinnissa parametrin  $a_s$  arvoksi valittiin oletusarvo, eli pyörimiskorjaus on mukana laskuissa, mutta sitä ei korostettu suurentamalla kerrointa.

## 5.4 REYNOLDSIN JÄNNITYSMALLI

Reynoldsin jännitysmallissa johdetaan yhtälöt kullekin Reynoldsin jännityskomponentille erikseen. Tällöin päästään eroon turbulenssin isotrooppisuus-

oletuksesta (ainakin tältä osin, oletus jää vielä dissipaatioyhtälöön). Yhtälöt ovat muotoa [5]

$$\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + u_k \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) + \underbrace{P_{ij}}_1 + \underbrace{\Phi_{ij}}_2 - \underbrace{\varepsilon_{ij}}_3 + \underbrace{R_{ij}}_4 \quad (13)$$

missä termi 1 kuvaa tuottoa, termi 2 kuvaa paineen ja venymän vaikutusta, termi 3 kuvaa viskoosia dissipaatiota ja termi 4 pyörimisen vaikutusta. Tuottotermi esitetään suoraan ilman mallintamista muodossa

$$P_{ij} = - \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (14)$$

Paine-venymä-termi mallinnetaan muodossa

$$\Phi_{ij} = -C_3 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C_4 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (15)$$

missä  $P$  ja empiiriset kertoimet ovat

$$P = \frac{1}{2} P_{ii} \quad C_3 = 1,8 \quad C_4 = 0,60 \quad (16)$$

Turbulenssin vaimenemisen käsittelyssä oletetaan että tämä on isotrooppista ja voidaan approksimoida lausekkeella

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (17)$$

missä turbulenssin vaimeneminen  $\varepsilon$  saadaan samasta yhtälöstä (4) kuin k-e-mallia käytettäessä. Pyörimistä kuvaava termi on muotoa

$$R_{ij} = -2\Omega_k \left[ \overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right] \quad (18)$$

## 6 REUNAEHDOT

Virtaus alueen reunalla otetaan tässä työssä lähteiden [1] ja [3] mukaisesti. Näistä jälkimmäisessä on hyvä taulukko, josta reunaehdot sekä nopeus- että turbulenssi-suureille tapauksessa 11 on helppo määrittellä. Muille tapauksille käytetään lähteen [1] arvoja ja ne jäävät joiltakin osin hieman epävarmemmiksi.

Reynoldsin jännitysmalliin on mahdollista antaa muita malleja tarkemmin tulovirtauksen reunaehdot. Usein kuitenkin jo virtausnopeuden profiiliin, turbulenssin kineettisen energian ja vaimenemisen saaminen mittauksista tai muulla arviolla on käytännön laskentatapauksissa työlästä. Hienosyisempien Reynoldsin jännityskomponenttien arviointi saattaa täten usein osoittautua ylivoimaiseksi. Reunaehtojen tarkentaminen vaatii myös tarkempaa mittaustekniikkaa. Tapauksessa 11 tämä työ on tehty, ja lähteen [3] taulukosta saadaan helposti reunaehdot asetettua.

Laskennan aikana on yritetty pitää huolta siitä, että seinämäreunaehdon kuvaamiseen käytettävät seinämäfunktiot toimivat pätevyysalueellaan. Ensimmäisen laskentapisteen dimensioton etäisyys  $y^+$  seinästä tulisi olla välillä  $30 < y^+ < 300$ . Pätevyysaluevaatimus liittyy lähinnä turbulenssisuureiden seinämäarvojen määrittämiseen. Alueen alkuosassa vaatimus voidaan täyttää valitsemalla laskentakopit sopivasti. Lieriöputken loppuosassa virtaus on kuitenkin niin hidasta, varsinkin suurissa putkissa, että vaatimus ei täyty. Tämä saattaa vaikuttaa putken loppuosalla turbulenssisuureiden paikallisiin arvoihin vääristävästi.

## 7 LASKENNAN TOTEUTUS

### 7.1 KONVEKTIOTERMIEN DISKRETOINTI

Kaikkien tapausten laskenta aloitetaan käyttäen konvektiotermeille hybridi-diskretointia. Tällöin käytetään keskeisdifferenssiä, kun Peclét'n luku on alle 2 ja tavanomaista ensimmäisen kertaluvun ylävirtamenettelyä muuten. Tämä konvergoituu kohtalaisen varmasti toisin kuin korkeamman kertaluvun menetelmät. Kun virtauskentän pääpiirteet on laskettu, voidaan vaihtaa korkeamman kertaluvun menetelmään. Käytettävissä on toisen kertaluvun upwind sekä QUICK. Yleensä on pyritty käyttämään QUICKiä samoin kuin lähteissä [1] ja [3]. Sekä k-e- että RNG-k-e-mallien tapauksessa laskenta aloitettiin alusta. Reynoldsin jännitysmallin lähtötilanteena käytettiin edellisillä malleilla saatua ratkaisua, joko ensimmäisen tai toisen kertaluvun diskretoinnilla laskettua.

### 7.2 LASKENNAN KONVERGOITUMINEN

Kaikilla turbulenssimalleilla suoritettut laskut konvergoituvat erittäin hyvin ensimmäisen kertaluvun diskretointia käytettäessä. k-e- ja RNG-k-e-mallien tapauksissa konvergointi on kohtalaista vielä toisen kertaluvun menetelmillä, jolloin laskut saadaan suoritettua ilman suurempia vaikeuksia. Stationääristä tapausta ei kokemuksen mukaan voi aloittaa Reynoldsin jännitysmallilla toisen kertaluvun diskretoinnilla, vaan on edettävä vaiheittain. Alkutilana käytetään tällöin jollakin stabiilimmalla turbulenssimallilla laskettua virtauskenttää. Joissakin tapauksissa oli suuria vaikeuksia saada lopputulosta Reynoldsin jännitysmallia käytettäessä ja joskus käytettiin turbulenssisuureiden kohdalla stabiilimmaksi osoittautunutta toisen kertaluvun upwind-diskretointia QUICKin sijasta.

Laskennan kuluessa seurattiin Fluentin ilmoittamaa kunkin suureen normalisoitua residuaalia, joka pienenee ratkaisun tarkentuessa. Loppuvaiheessa joissakin tapauksissa residuaalin arvo ei juurikaan muuttunut, vaikka virtauskenttä vielä muuttui selvästi. Muutokset saattavat olla merkittäviä pyörähdysymmetrisen alueen keskilinjan lähellä, jossa laskentakoppien tilavuuksien osuus virtausalueen tilavuudesta (ja residuaaleista) on pieni.

## 7.3 REUNAEHDON VAIKUTUS

Osa konvergenssivaikeuksista liittyy ulosmenoreunaehtoon. Tässä on käytetty Fluentin 'OUTLET' määrittelyä, jossa suureiden derivaatat asetetaan nolliksi reunalla. Samaa reunaehto on käytetty ainakin lähteen [3] laskuissa ja luultavasti myös lähteessä [1]. Joissakin tapauksissa paikallinen painejakautuma tulee sellaiseksi, että osassa ulosmenoreunaa virtaus tulee sisäänpäin. Näin saattaa tapahtua etenkin Reynoldsin jännitysmallia ja korkean kertaluvun diskretointia käytettäessä. Huonon reunaehdon takia sisään tuleva virtaus saattaa vaikuttaa putken alussa olevaan pyörteeseen. Näyttää siltä, että kuta tarkempi mallinnus on fysikaalisesti sitä tarkemmin on myös reunaehdot tunnettava. Tarkat laskentamenetelmät pystyvät seuraamaan pieniäkin reunaehtoarojen vaihteluja. Ulosmenoreunaehdon parantamiseksi tapauksista ei ole olemassa tarpeellista tietoa. Lierion jälkeisestä osasta ei ole mitään dokumenttia. Myöskään mittauksia ei ole ulosmenokohdasta suoritettu, joten ei tiedetä onko koetilanteessa tässä kohdassa ollut paluuvirtausta.

Edellä mainittua reunaehdon asettelua ei tulisi käyttää silloin, jos virtaus pyrkii reunalta sisälle. Tapauksissa, joissa näin on käynyt, on suhtauduttava varauksellisesti tuloksiin.

Lähteessä [3] esitetään mittaustuloksia myös voimakkaasti kuristetulla ulosmenolla. Esitetyn arvion mukaan mikään turbulenssimalleista ei kykene kuvaamaan siihen liittyvää virtauksen kiihtymistä polttokammion keskilinjalla eikä paluuvirtausta reunan lähellä. Nyt tehdyn simuloinnin antaman kokemuksen valossa tämä ei mitenkään liity turbulenssimalleihin, vaan edellä mainittuun reunaehto asetteluun, jota on myös lähteessä [3] toisessa kohtaa kritisoitu.

## 7.4 RATKAISUMENETELMÄT

Laskennassa käytettiin yleensä Fluentin oletusarvoja eli painekorjauksen laskemisessa käytetään multi-grid-kiihdytystä ja muut suureet lasketaan tavalliseen tapaan pelkällä slab-wise-ratkaisijalla. Reynoldsin jännitysyhtälöiden suureita ratkaistaessa nostettiin sisäisten iteraatioiden määrä oletusarvona käytetystä yhdestä viiteen. Muille suureille käytettiin oletusarvoa yksi. Käytettävät alirelaksaatio-kertoimien arvot selviävät kunkin laskentatapauksen yhteydessä esitetystä taulukosta.

## 8 VERTAILU AIKAISEMPIIN LASKUIHIN

### 8.1 ITERAATIOSUUNNAN VAIKUTUS

Lähteessä [3] on selvitetty myös iteratiosuunnan vaikutusta saatuun tulokseen. Esitetyn arvion mukaan virtauksen pääsuuntaa vastaan etenevä iteraatiosuunta vaikuttaa (tapaus 11, putkessa ei voimakasta supistusta) siten, että tulokset paranevat etenkin k-e- ja RNG-k-e-mallien tapauksessa ja ovat jopa vertailukelpoisia



Reynoldsin jännitysmallien tulosten kanssa. Jos näin olisi, tilanne olisi yllättävä ja kiusallinen ajatellen laskennan yleistä uskottavuutta.

Tässä työssä lasketaan tapaus 11 (putken lopussa voimakas supistus) k-e-mallia käyttäen käänteisellä iteraatiosuunnalla. Laskussa käytetään hybridi diskreetointia kuten vertailutapauksessakin [3]. Aluksi vaikuttaa siltä, että saadaan toisenlainen ratkaisu kuin virtauksen suuntaan iteroiden. Paluuvirtausalueen perässä on pitkä 'häntä' samoin kuin lähteen [3] tuloksissa. Kuitenkin iterointia jatkettaessa virtauskenttä asettuu samaksi kummallakin iterointitavalla. Näyttäisi siltä, että samaa ratkaisua lähestytään 'toisesta suunnasta'. Residuaalien muutos loppuvaiheessa on melko pientä, vaikka virtauskenttä näyttääkin vielä selvästi kehittyvän.

Tehdyn kokeilun mukaan iteraatiosuunnan vaihtaminen ei vaikuta lopputulokseen, mutta se vaikuttaa kuitenkin konvergenssinopeuteen. Konvektion dominoimassa tapauksessa edullisin iteraatiosuunta on virtauksen pääsuunta. Kaikissa tapauksissa ei voida löytää tällaista selkeää virtauksen pääsuuntaa (esimerkiksi sekoittimissa). Lähteessä [3] esitetty iteraatiosuunnan vaikutustapa olisi huolestuttava kaikkia simulointeja ajatellen, mutta onneksi tämän kokeilun perusteella huoli ei liene aiheellinen.

Samalla ohjelmalla laskettujen tulosten erot voivat johtua siitä, että ohjelmassa on tällä välin korjattu jokin kohta (versiot 4.23 ja 4.3.2) tai lähteessä [3] esitetyt tulokset eivät ole täysin konvergoituneesta tilanteesta. Jälkimmäinen vaihtoehto on todennäköisempi, koska tässä työssä laskettu virtauskenttä osoittaa väli-vaiheissaan samoja piirteitä kuin lähteessä [3] esitetty tulos.

## 8.2 k- $\epsilon$ -MALLIN TULOKSET

Tässä suoritetuissa simuloinneissa saadaan k-e-mallilla huomattavasti paremmin mittaustuloksia vastaavat tulokset kuin lähteen [3] laskuissa. Laskujen erona on mm. edellä mainittu ohjelmaversion kehittyminen. Kuitenkin merkittävämpi ero lienee laskentaverkon määrittelyssä. Nyt tehdyissä laskuissa käytetään aina reunoja mukailevaa BFC-verkkoa, mikä vaikuttanee oleellisesti varsinkin poltinkartion virtaus- ja turbulenssikentän laskentaan. Juuri tässä osassa vallitsevat suurimmat nopeusgradientin, virtausnopeuden, turbulenssin tuottotermin ja dissipaation arvot. Näiden arviointi kartion alueella lienee pyörrealueen laskennan kannalta oleellista.

Etenkin lähteen [1] laskut on tehty huomattavan harvalla laskentaverkolla. Esimerkiksi tapauksessa 11 käytetään poltinkartion kartiomaisen osan kuvaamiseen vain 9 laskentakoppia kummassakin suunnassa suorakulmaisessa hilassa. Tässä tehdyssä laskussa käytetään poltinkartion alueella akselin suunnassa 38 ja säteen suunnassa 46 laskentakoppia BFC-hilassa.

## 9 LASKETUT TAPAUKSET

### 9.1 POLTIN 7

Polttimen 7 laskemiseen käytetään niitä reunaehtoja, jotka on esitetty lähteen [1] liitteessä. Reunaehdot esitetään myös liitteessä 1. Laskenta aloitetaan heti pyörre-generaattorin jälkeen kohdasta  $x = 0,0$  m, samoin kuin lähteen [1] laskuissa. Sisään tulevan virtauksen oletetaan pyörivän jäykkänä kappaleena. Turbulenssi-suureille annetaan vakioarvot koko poikkileikkauksessa. Laskentaverkossa on yhteensä 7 228 laskentakoppia joista 139 aksiaali- ja 52 radiaalisuunnassa. Polttin-kartion alueella on aksiaalisuunnassa 18 ja radiaalisuunnassa 26 laskentakoppia. Putken loppupäässä on supistus, joka kuristaa 53 % lieriöputken poikkipinta-alasta. Lähteessä [1] on laskennassa käytetty 58 %:n supistusta.

Polttimen laskenta k-e-mallilla aloitetaan alusta, jolloin kaikille suureille käytetään ensin hybrididiskretointia. Myöhemmin diskretoinniksi vaihdetaan numeerisen diffuusion eliminoimiseksi QUICK kaikille suureille. Laskuissa käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimet esitetään alla taulukoissa 2 ja 3.

*Taulukko 2. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Poltin 7, k-e-malli.*

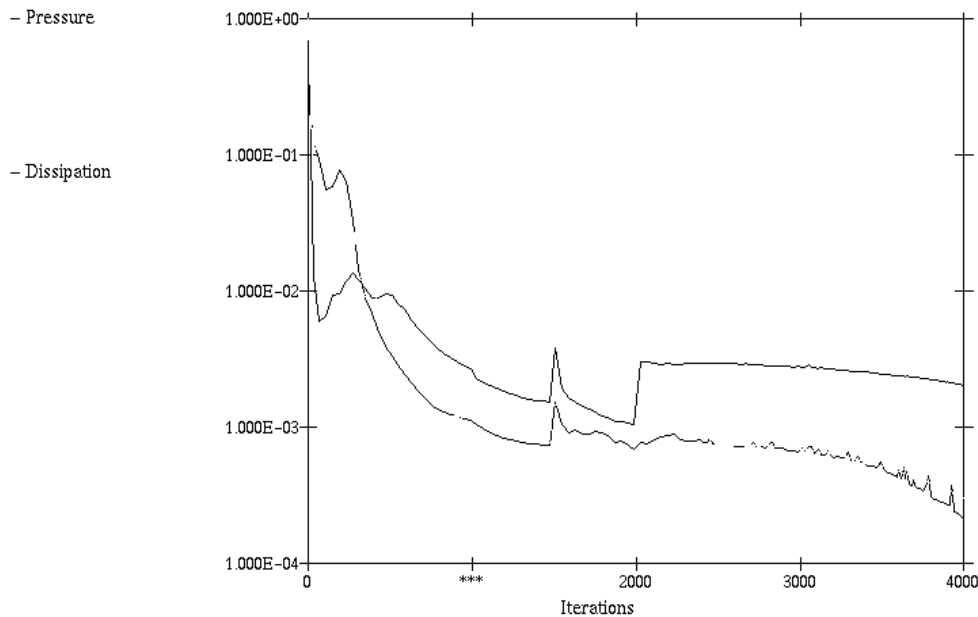
Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
1–450	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
451–1000	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
1001–1500	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2

*Taulukko 3. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 7, k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
1501–2000	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2
2001–4000	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Iterointi divergoi nopeasti ennen 600 iteraatiokierrosta, jos jatketaan laskennan alussa sovelletuilla alirelaksaatiokertoimilla. Ongelmaksi tulee ulosmenoreunalla akselilla oleva laskentakoppi, jossa saavutetaan suuria nopeuksia. Luultavasti epästabiilisuuden alku on ulosmeno-reunaehdossa. Alirelaksaatiokertoimen muutok

sella häiriö saatiin kuitenkin asettumaan. Laskentaa jatkettiin QUICKillä 1500 iteraatiokierroksen jälkeen ilman vaikeuksia. Residuaalien kehitys esitetään kuvassa 5.



*Kuva 5. Residuaalien muutos 4 000 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 1 500 on vaihdettu konvektiotermeille QUICK-diskretointi. k-e-malli, poltin 7. Kohdassa 2 000 iteraatiota jatkuvuusyhtälön virheen residuaalin nousu johtuu nopeus-suureiden alirelaksaatiokertoimien kasvattamisesta.*

RNG-mallin laskut aloitetaan alusta ja ne etenevät suoraviivaisesti loppuun ilman ongelmia. Käytettävät alirelaksaatiokertoimien arvot ovat taulukoissa 4 ja 5.

*Taulukko 4. Iteraation aikana käytettävät alirelaksaatiokertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Poltin 7, RNG-k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–3000	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2

*Taulukko 5. Iteraation aikana käytettävät alirelaksaatiokertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 7, RNG-k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
3001–3500	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
3501–4800	0,12	0,12	0,3	0,2	0,2	0,2
4801–5000	0,12	0,12	0,3	0,15	0,15	0,15

Reynoldsin jännitysmallin laskenta aloitetaan k-e-mallin välituloksesta kohdasta 1 500 iteraatiokierrosta. Turbulenssisuureille käytetään aluksi hybrididiskreointia ja muille QUICKiä. Käytettävät kertoimien arvot selviävät alla olevasta taulukosta VI.

*Taulukko 6. Iteraation aikana käytettävät alirelaksaatiokertoimien arvot. Diskreointi QUICK-menetelmällä. Alussa on turbulenssisuureille käytetty hybrididiskreointia, lopussa toisen kertaluvun upwindiä. Poltin 7, RSM-malli.*

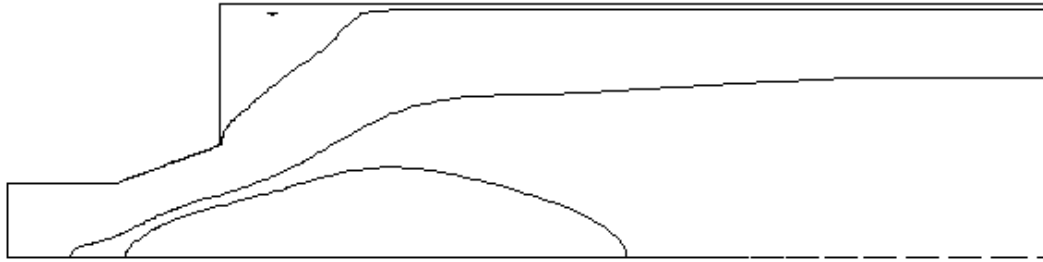
Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
1501–3500	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
3501–7000	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
7001–7500	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
7501–7700	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
7701–9500	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2

Kohdassa 3 500 vaihdetaan kaikille suureille hybrididiskreointi. Ulosmeno-reunalta virtaus kääntyi sisäänpäin ja diskreoinnin vaihto auttaa takaisin-virtauksen saamisessa kuriin. Muiden laskujen mukaan ei ulosmeno-reunalta tule virtausta sisään (varsinaista mittausta ei ole tehty).

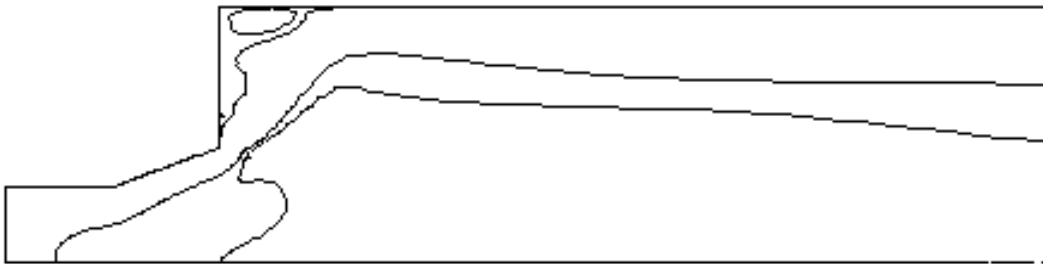
Kohdasta 7 000 eteenpäin vaihdetaan QUICK nopeuskomponenteille. Residuaalit hieman suurenevät, mutta laskenta pysyy hallinassa. Kohdassa 7 500 vaihdetaan dissipaation yhtälössä diskreointi QUICKille, jonka seurauksena taas pieni loikkaus. Kohdasta 7 700 kokeiltiin jatkaa siten, että myös Reynoldsin jännityksille asetetaan QUICK käyttöön. Tästä kuitenkin aiheutuu välitön ratkaisun sekoaminen. Loppuosa alkaen 7 700 iteraatiosta edetään käyttäen turbulenssisuureille toisen kertaluvun upwindiä (II-upwind), jolloin laskenta pysyy hallinnassa.

Tällä tavoin laskien edetään 9 500 iteraatioon. Ulosmenoaukosta tulee nyt keskilinjalta virtaus sisään. Reunaehto asetettaessa on oletettu, että virtaus on ulospäin, joten näihin tuloksiin tulee suhtautua erittäin varauksellisesti.

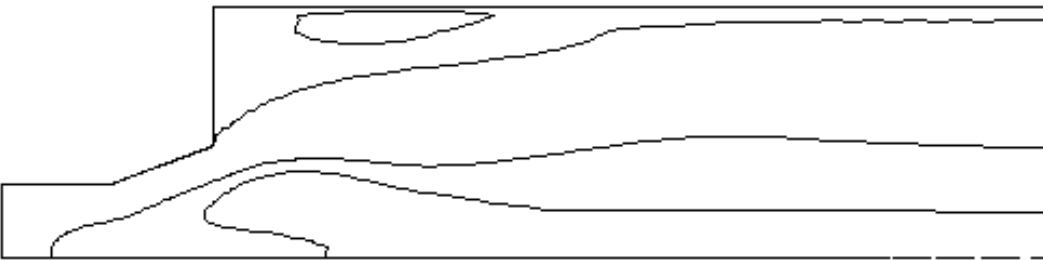
Paluuvirtausalue nähdään kuvasta 6, jossa esitetään aksiaalinopeuden U arvo nolla sekä vertailun vuoksi arvot -0,5 m/s ja +0,5 m/s. Laskettua tasa-arvokäyrää voidaan verrata liitteen 2 kuvaan 1d, jossa sama esitetään koetuloksiin perustuen [1].



a



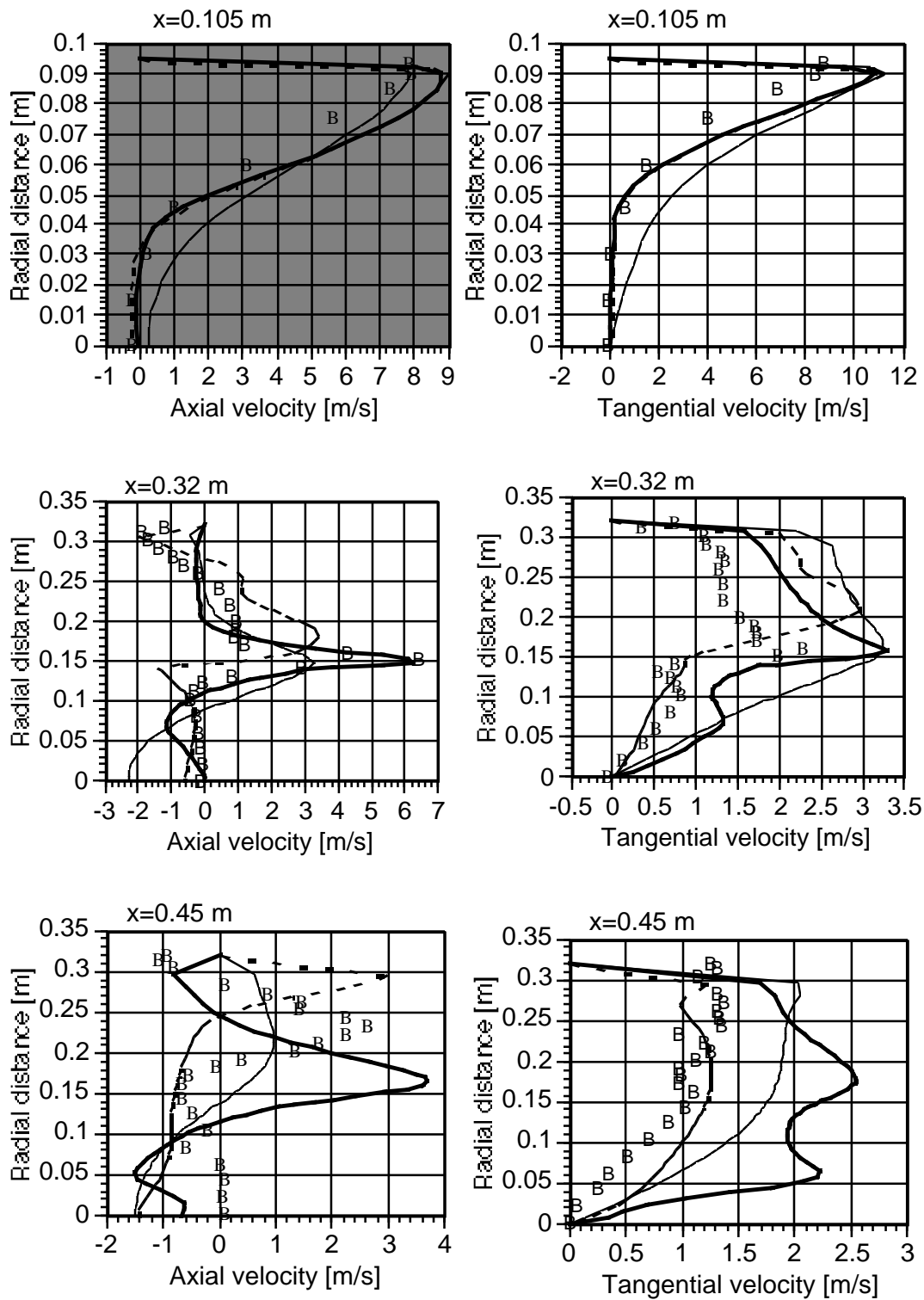
b



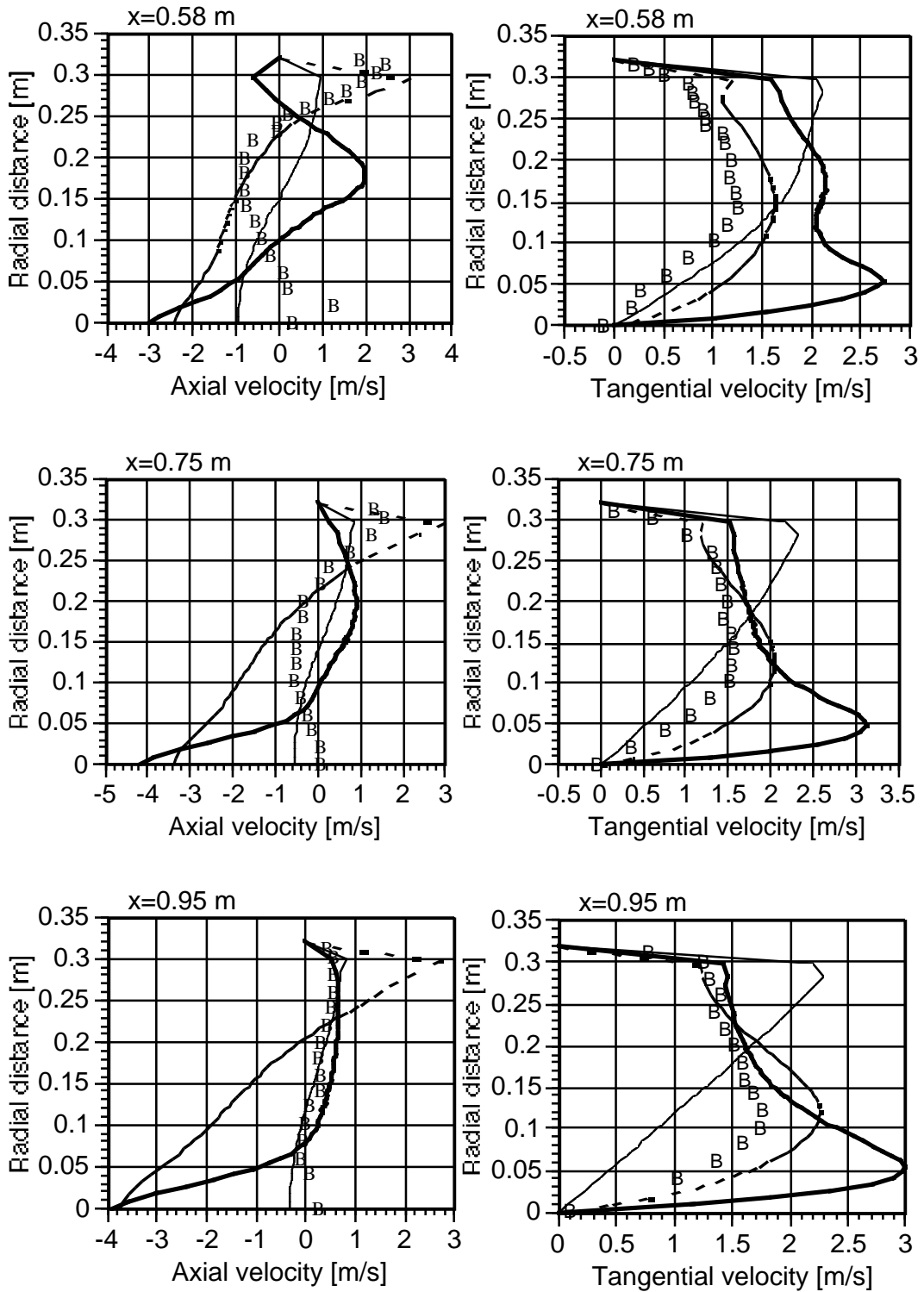
c

Kuva 6. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5 \text{ m/s}$  (sininen),  $0 \text{ m/s}$  (vihreä) ja  $+0,5 \text{ m/s}$  (punainen). a) k-e-malli, QUICK 4 000 iteraatiota, b) RNG-k-e-malli. QUICK 5 000 iteraatiota, c) RSM QUICK/II-upwind 9 500 iteraatiota. Poltin 7.

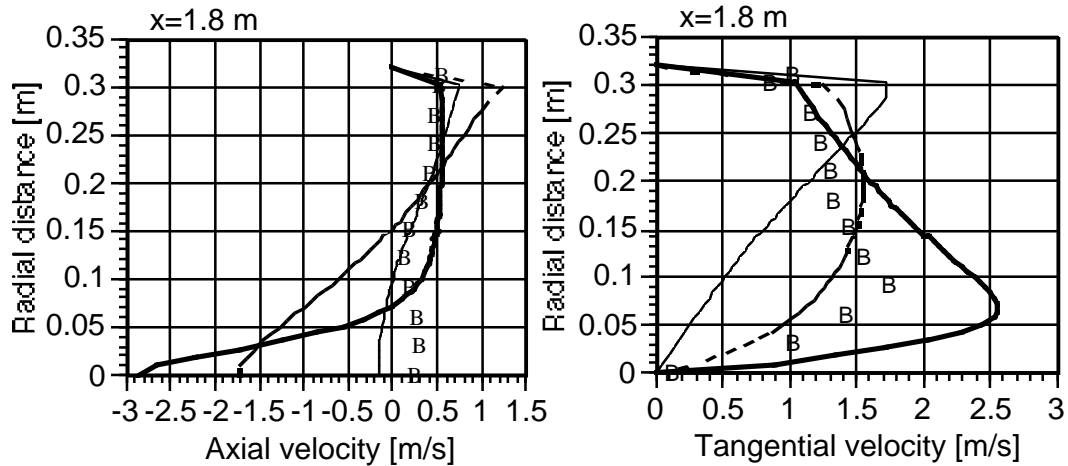
Nopeusprofiilit eri kohdissa polttokammiota esitetään kuvissa 7, joissa laskettuja arvoja verrataan mittaustuloksiin. Nopeusjakautumista nähdään, että mikään laskentatapa ei tavoita kaikkia mittauspisteitä edes profiilin muodon puolesta. k-e-mallin lasku ei kykene seuraamaan paluuvirtausalueen yksityiskohtia, vaikka kuvaakin pyörteen yleisen muodon ja koon kohtalaiseen hyvin. RNG-malli kuvaa useassa kohdassa nopeusjakautumat polttimen alkuosassa ainakin muodoltaan paremmin kuin k-e-malli. Vaikka profiilin muoto on suunnilleen sama kuin mitattu profiili, huiput eivät aina satu samalle kohdalle kuin mitatussa ( $x = 0,32 \text{ m}$ ,  $x = 0,45 \text{ m}$ ). Näissä kohdissa RSM-laskenta antaa suunnilleen saman tasoisen tuloksen. Pitemmällä polttokammiossa nopeusjakautumat ovat huomattavasti virheellisiä, koska RNG-malli kuvaa takaisinvirtausalueen systemaattisesti liian pitkäksi. Näissäkin osissa tangentaalinopeuden laskettu profiili on RNG:llä laskien huomattavasti k-e-mallilla laskettua parempi.



Kuva 7. Mittausarvot (B),  $k-e$ -malli (—), RNG-malli (----), RSM (-·-). Poltin 7. (jatkuu)



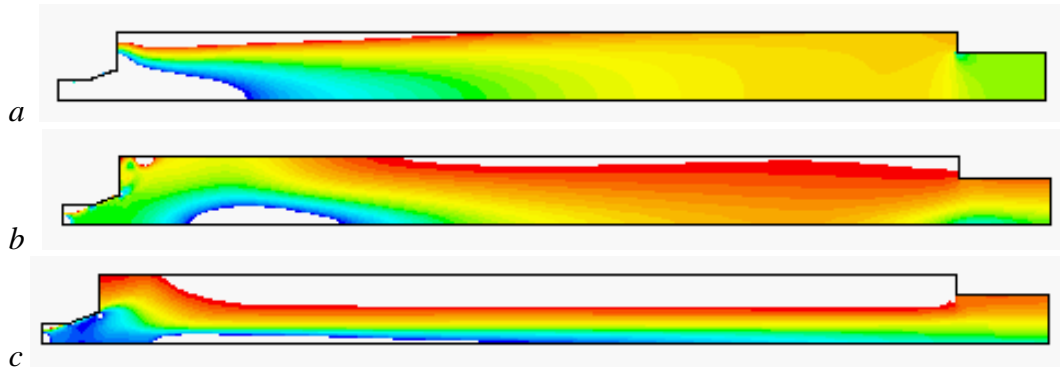
Kuva 7. Mittausarvot (B),  $k\text{-}e\text{-}malli$  (—), RNG- $malli$  (----), RSM (—). Poltin 7. (jatkuu)



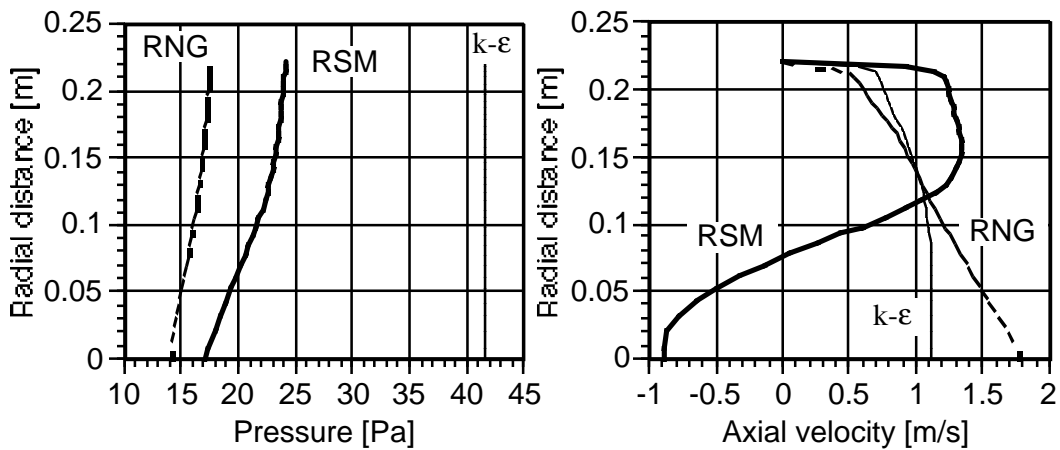
Kuva 7. Aksiaali- ja tangentiaalinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja profiileita verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat k-e-malli (—), RNG-malli (----) ja Reynoldsin jännitysmalli RSM (—). Poltin 7.

Pitemmällä polttokammiossa ( $x = 1,8$  m) k-e-malli antaa aksiaalinopeuden suhteen parhaan tuloksen, mutta tangentiaalinopeuden arvo on tässäkin tyypillisen huono. RNG- ja RSM-laskuissa aksiaalinopeuden arvojen poikkeaminen putken loppuosalla saattaa johtua käytetystä OUTLET-reunaehdosta, jonka valinta ei ole ollut paras mahdollinen. Tämän käytön edellytyksenä on, että kaikki virtaus menee reunalta ulos. Reunaehto asettaa oleellisesti suureiden derivaatan nollassi eli sisäpuolella ovat arvot vaikuttavat mahdolliseen sisäänvirtaukseen. k-e-mallilla valinta on johtanut käytännössä reunaehtoon, jossa ulosmenoreunalle asetettaisiin vakioaine. Tämä vastaa reunaehdon alkuperäistä pyrkimystä. Muilla menetelmillä laskien reunalle tulee jonkin suuruinen radiaalinen painegradientti, joka varsinkin RSM-laskuissa on niin suuri, että keskilinjalta virtaus kääntyy sisäänpäin. Tässä tapauksessa sisäänvirtauksen vaikutus ulottuu polttimen alkuosan pyörteeseen saakka. Kuvissa 8 ja 9 esitetään kullakin menetelmällä laskettu painekenttä sekä nopeus- ja paineprofiilit ulosmenoreunalla. Huomattakoon, että painekentän kuvista pois jätetyt asteikot ovat kussakin tapauksessa erilaisia. Kuvilla pyritään ainoastaan havainnollistamaan sitä, että painekentän muoto kussakin tapauksessa on erilainen. RSM-laskun tuloksiin on tässä suhtauduttava erittäin kriittisesti, koska toteutunut reunaehto ei vastaa alkuperäistä tarkoitusta.



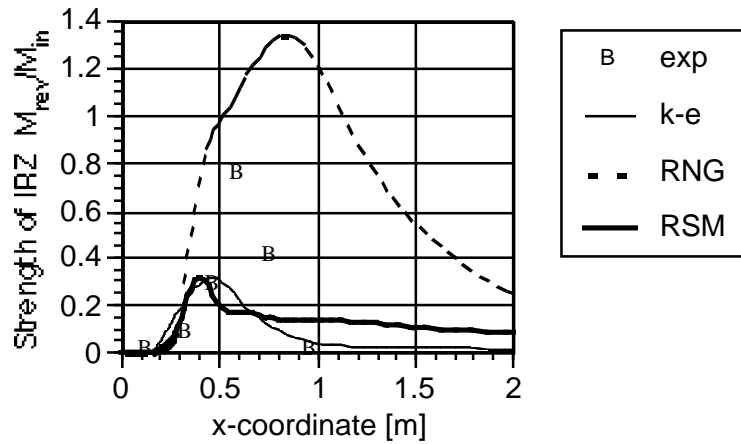


Kuva 8. Painejakautuma tapauksessa 7, a)  $k$ - $\epsilon$ , (piirretty alue 40...43 Pa), b) RNG- $k$ - $\epsilon$ , (piirretty alue 10...18 Pa), c) RSM 9 500 iteraatiota (ensimmäinen tapaus), (piirretty alue 12...25 Pa). Huomaa, että kunkin kuvan väriasteikko vastaa eri painealuetta.

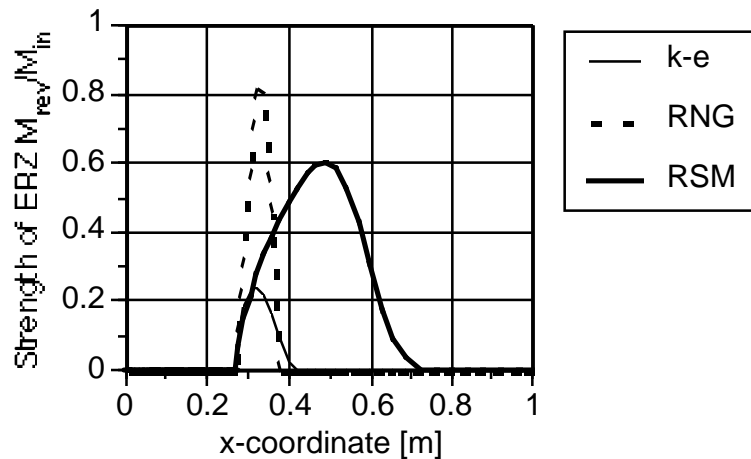


Kuva 9. Paine- ja nopeusjakautuma ulosmenoreunalla. Voimakkaamman paineeron takia RSM-laskuissa virtaus kääntyy keskilinjalla sisäänpäin. Poltin 7.

Pyörteen voimakkuutta havainnollistetaan suhdeluvulla, jossa paluuvirtauksen suuruutta verrataan poltinaukosta tulevaan massavirtaan. Pyörteessä erotetaan vielä sisäinen (internal) ja ulkoinen (external) osa. Lähteessä [1] esitetään joitakin mittaustulosten perusteella saatuja arvoja, joihin laskettuja tuloksia verrataan. Sisemmän pyörteen (IRZ) voimakkuus esitetään kuvassa 10 ja ulomman kuvassa 11.  $k$ - $\epsilon$ -malli antaa liian pienen pyörteen voimakkuuden (lähteen [1] simuloinnissa vastaavasti liian suuri). RSM-laskuun vaikuttaa luultavasti epäonnistunut reunaehto, koska sen vaikutus ulottuu paluuvirtausalueeseen saakka. RNG-mallin antama sisempi pyörre on paitsi liian pitkä myös liian voimakas. Ulomman pyörteen voimakkuudesta ei ole mittaustietoja.



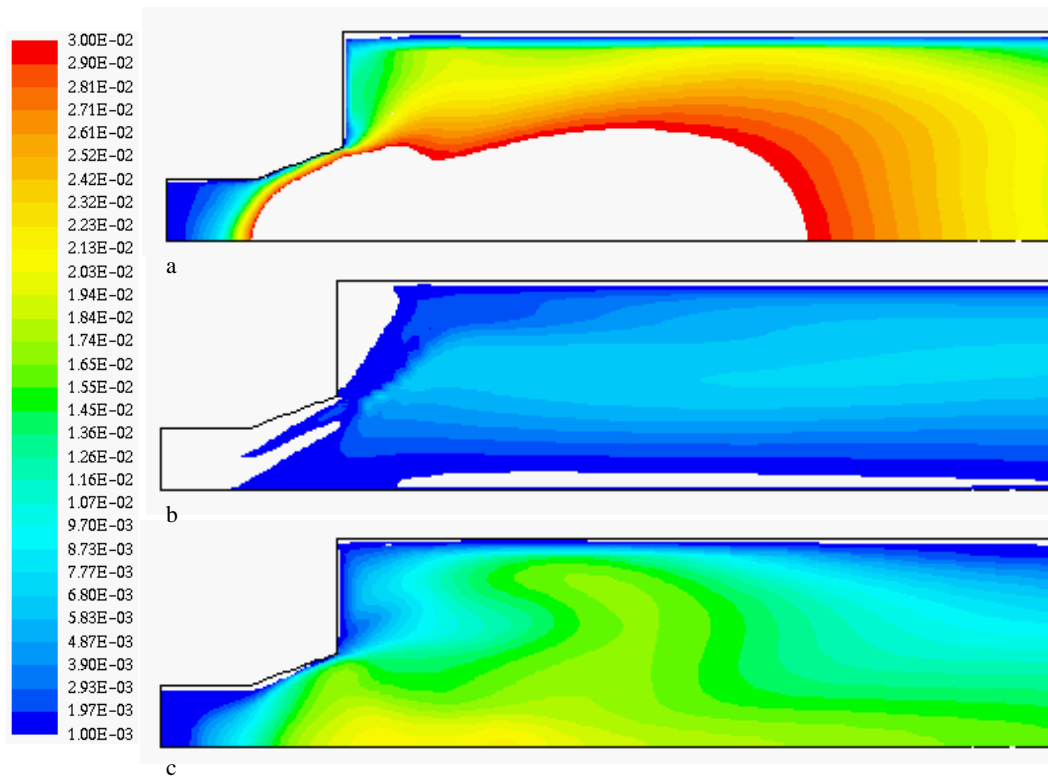
Kuva 10. Sisemmän paluuvirtausalueen voimakkuus, joka on määritelty paikallisen paluuvirtauksen ja poltinaukosta tulevan massavirran suhteena. Poltin 7.



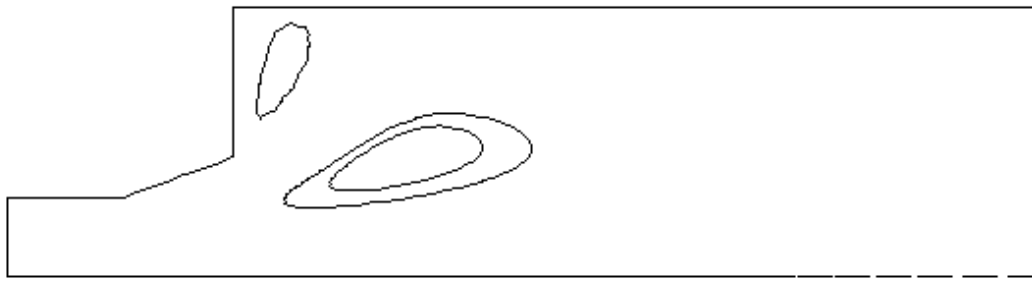
Kuva 11. Ulomman paluuvirtausalueen voimakkuus, joka on määritelty paikallisen paluuvirtauksen ja poltinaukosta tulevan massavirran suhteena. Poltin 7.

Kuvassa 12 a–c esitetään kullakin mallilla laskettu efektiivinen viskositeetti. Tästä ei ole mittaustietoja. k-e-mallin laskema viskositeetti on selvästi suurempi kuin muiden menetelmien ja RNG-mallin laskema pienin. Kuvassa on jouduttu rajoittamaan k-e-tapauksen piirtoaluetta, koska kenttien erot ovat suuret.

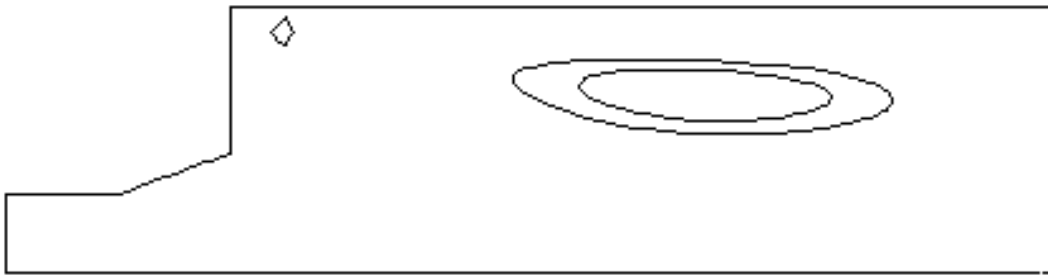
Kuvassa 13 a–c esitetään virtafunktion tasa-arvokäyrät, jotka stationäärisessä tapauksessa vastaavat virtaviivoja. Mikään laskentatapauksista ei aivan vastaa mittausten perusteella piirrettyä virtaviivakuviota [1]. Ulkoisen pyörteen koko on k-e- ja RNG-laskuissa suunnilleen oikein, vaikkakin pyörteiden voimakkuudet ovat hyvin erilaisia (kuva 11). RNG-laskussa sisempi pyörre on selkeästi liian pitkä, liian voimakas ja väärän muotoinen. k-e-laskussa se taas on liian heikko (kuva 10). RSM-laskentaan ulosmenoreunehto vaikuttanee haitallisesti, koska virtauskuvio on selvästi muista tapauksista poikkeava.



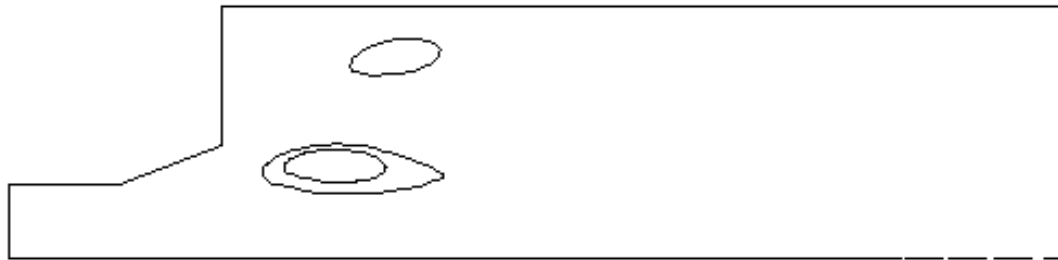
Kuva 12. Turbulenttinen viskositeetti tapauksessa 7. Arvot ovat 0,001... 0,03 kgm/s. a) *k-e*-malli, (koko alueen arvot  $1,85 \cdot 10^{-5} \dots 4,83 \cdot 10^{-2}$ ), b) RNG-*k-e*-malli ( $1,85 \cdot 10^{-5} \dots 7,718 \cdot 10^{-3}$ ), c) RSM QUICK/II-upwind 9 500 iteraatiota ( $1,85 \cdot 10^{-5} \dots 2,15 \cdot 10^{-2}$ ).



a) *k-e*



b) *RNG-k-e*

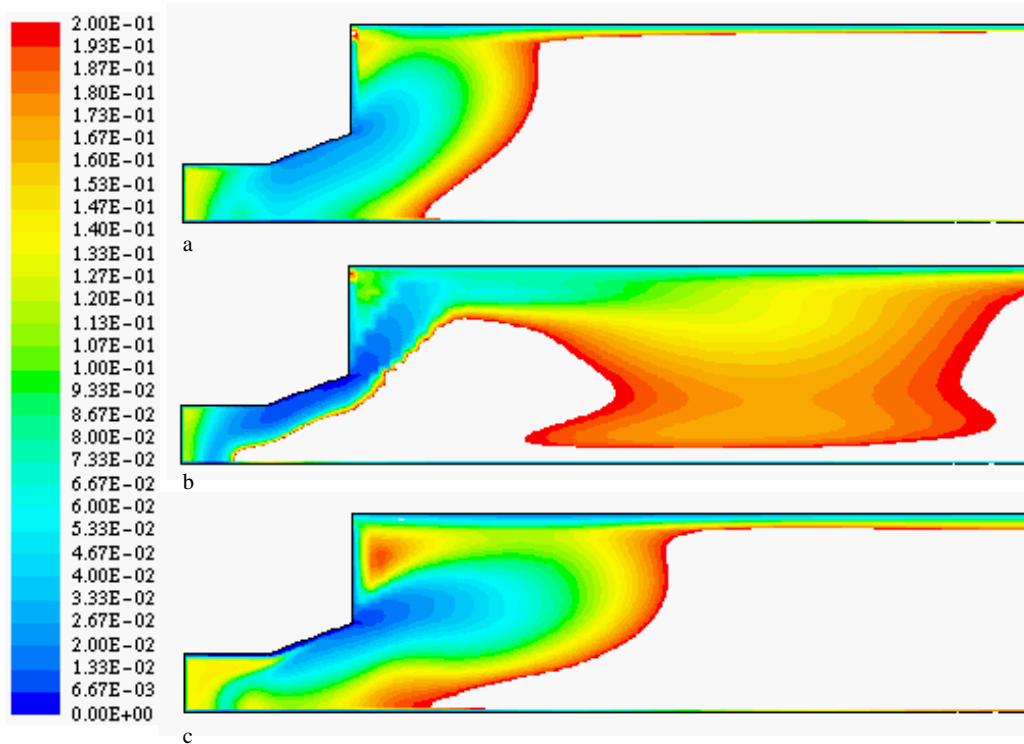


c) *RSM*

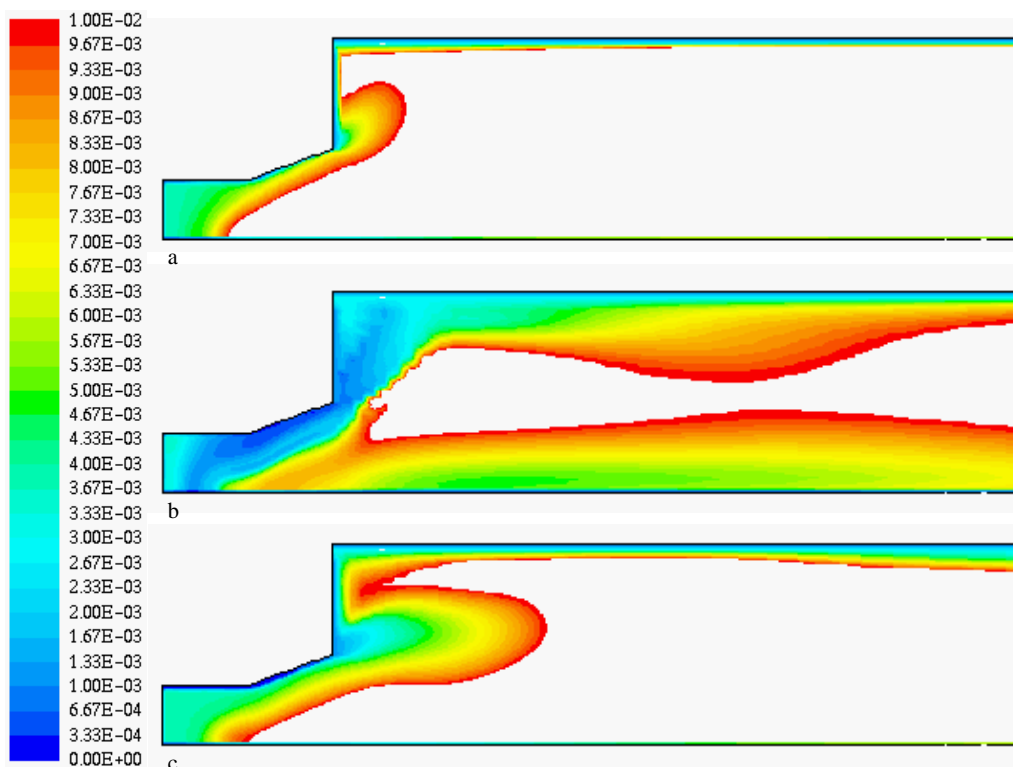
Kuva 13. Virtafunktion tasa-arvokäyrät tapaukselle 7. a) *k-e*-malli, *QUICK* 4 000 iteraatiota, b) *RNG-k-e*-malli, *QUICK* 5 000 iteraatiota, c) *RSM QUICK/II-upwind* 9 500 iteraatiota.

Kuvassa 14 esitetään turbulenssin aikaskaala ja kuvassa 15 turbulenssin pituuskaala eri malleilla arvioituna. *RNG*-mallin näkemys poikkeaa huomattavasti muilla malleilla saadusta tuloksesta. Tässä aikaskaala  $t$  ja pituuskaala  $L$  on laskettu turbulenssin kineettisen energian  $k$  ja vaimenemisen  $\varepsilon$  avulla lausekkeista

$$t = \frac{k}{\varepsilon} \quad L = c_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (3)$$



Kuva 14. Turbulenssin aikaskaala välillä 0–0.2 s tapaukselle 7. Koko alueen arvot ovat a) 0–2,5 s k-e-malli, b) 0–1,18 s RNG- k-e-malli, c) 0–1,65 s RSM.



Kuva 15. Turbulenssin pituuskaala välillä 0–0,01 m, a) k-e, koko alue 0–0,037 m, b) RNG-k-e, koko alue 0–0,024 m, c) RSM, koko alue 0–0,038 m. Poltin 7.

## 9.2 POLTIN 10

Polttimen 10 laskemiseen käytetään niitä reunaehtoja, jotka on esitetty lähteen [1] liitteessä. Reunehdot esitetään myös liitteenä 1. Laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0.0$  m heti pyörregeneraattorin jälkeen, samoin kuin lähteen [1] laskuissa. Sisään tulevan virtauksen oletetaan pyörivän jäykkänä kappaleena. Turbulenssi-suureille annetaan vakioarvot koko poikkileikkauksessa. Laskentaverkossa on yhteensä 8 866 laskentakoppia, joista 143 aksiaali- ja 62 radiaalisuunnassa. Polttikartion alueella on aksiaalisuunnassa 18 ja radiaalisuunnassa 26 laskentakoppia. Putken loppupäässä on supistus, joka kuristaa 79 % lieriöputken poikkipinta-alasta.

Polttimen laskenta k-e-mallilla aloitetaan alusta, jolloin kaikille suureille käytetään ensin hybrididiskretointia. Myöhemmin diskretoinniksi vaihdetaan numeerisen diffuusion eliminoimiseksi QUICK kaikille suureille. Laskuissa käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimet esitetään alla taulukoissa 7 ja 8.

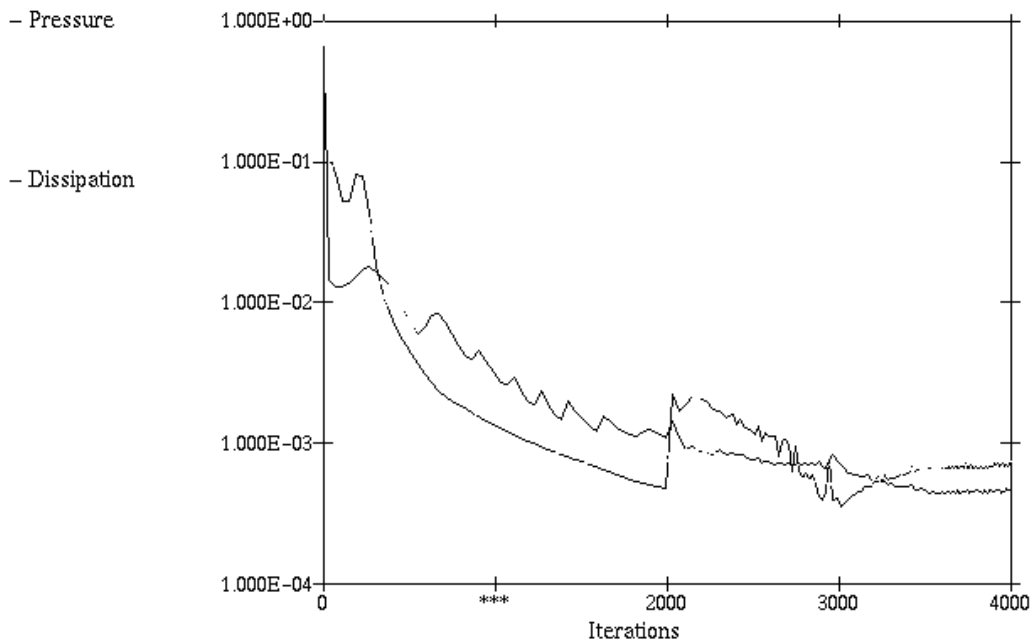
*Taulukko 7. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Poltin 10, k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–1500	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2

Alun perin tiheämpää laskentaverkkoa jouduttiin harventamaan etenkin reunoilta, koska seinämfunktioiden kannalta reunimmaisat kopit olivat liian lähellä seinää lieriömäisen polttokammion alueella (dimensioton etäisyys  $y^+$  alle 10). Tällä verkolla  $y^+$ -arvot ovat alkuosassa 60–80 ja polttokammiossa yleensä 50–120 paitsi aivan loppuosassa paikallisesti alle 30. Muuten laskenta sujuu ilman vaikeuksia. Residuaalien historia esitetään kuvassa 16.

*Taulukko 8. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 10, k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
2001–3000	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
3001–3500	0,15	0,15	0,3	0,1	0,1	0,1
3501–4000	0,12	0,12	0,2	0,1	0,1	0,1



*Kuva 16. Residuaalien muutos 4 000 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 2 000 on vaihdettu konvektiotermille QUICK-diskretointi. Poltin 10, k-e-malli.*

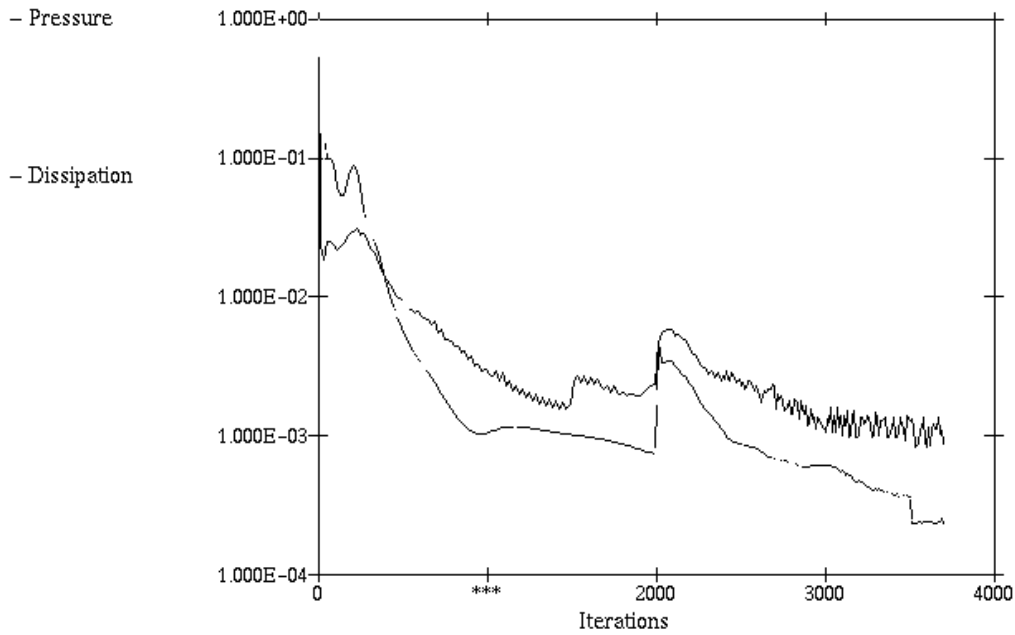
RNG-mallin laskut aloitetaan alusta ja ne etenevät ilman vaikeuksia samalla tavoin kuin edellä. Käytettävät alirelaksaatiokertoimet esitetään taulukoissa 9 ja 10. Residuaalien kehitys iteraation kuluessa esitetään kuvassa 17.

*Taulukko 9. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Poltin 10, RNG-k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–1500	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
1501–2000	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2

*Taulukko 10. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 10, RNG-k-e-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
2001–3500	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
3501–3700	0,12	0,12	0,3	0,1	0,1	0,1



Kuva 17. Residuaalien muutos 3 700 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 2 000 on vaihdettu konvektiotermeille QUICK-diskretointi. Poltin 10, RNG-malli.

RSM-laskut aloitetaan k-e-tuloksesta kohdasta 2 000 iteraatiota. Käytettävät alirelaksaatiokertoimet esitetään alla olevissa taulukoissa. Laskennan aikana joudutaan valitsemaan diskretointimenetelmiä sopivasti, jotta laskenta saadaan konvergoitumaan. Väli 2 001–5 000 lasketaan RSM-mallilla käyttäen kaikille suureille hybrididiskretointia. Väli 5 001–6 500 lasketaan käyttäen nopeuskomponenteille toisen kertaluvun upwindiä (II-upwind) ja turbulenssisuureille hybrididiskretointia. Edelleen välillä 6 501–7 500 käytetään nopeuskomponenteille QUICK-diskretointia ja välillä 7 501–8 800 käytetään turbulenssisuureille toisen kertaluvun upwindiä hybrididiskretoinnin sijasta. Laskennassa käytetyt alirelaksaatiokertoimien arvot esitetään taulukossa 11 ja residuaalien käyttäytyminen kuvassa 18.

Taulukko 11. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Myöhemmin vaihdetaan toisen kertaluvun upwind kohdassa 5 000. Turbulenssi RSM-mallilla. Edelleen on kokeiltu kohdasta 6 500 alkaen nopeuksille QUICKiä. Poltin 10.

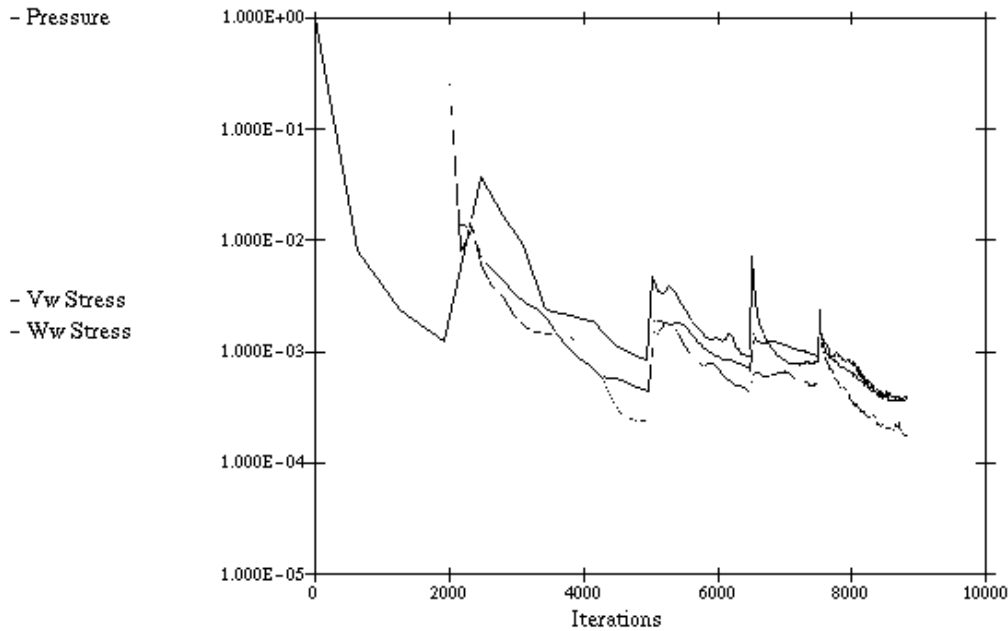
Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
2001–3000	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
3001–3250	0,15	0,15	0,3	0,1	0,1	0,1
3251–4000	0,12	0,12	0,2	0,1	0,1	0,1
4001–7500	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2



Kohdasta 8 800 yritettiin jatkaa vaihtamalla myös turbulenssisuureille QUICK-diskretointi, mutta laskenta divergoi välittömästi.

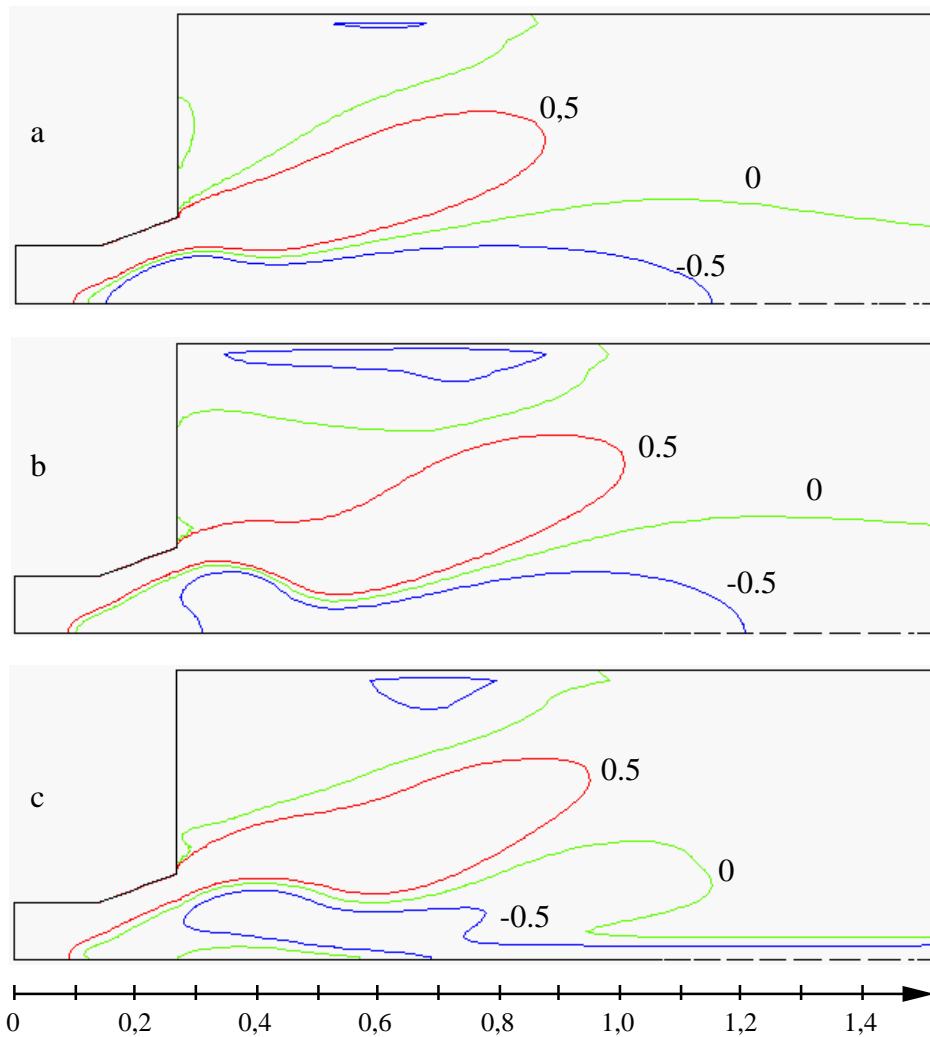
*Taulukko 12. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä muille suureille, toisen kertaluvun upwind turbulenssisuureille. Turbulenssi RSM-mallilla. Poltin 10.*

Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
7501–8400	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2
8401–8800	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,1



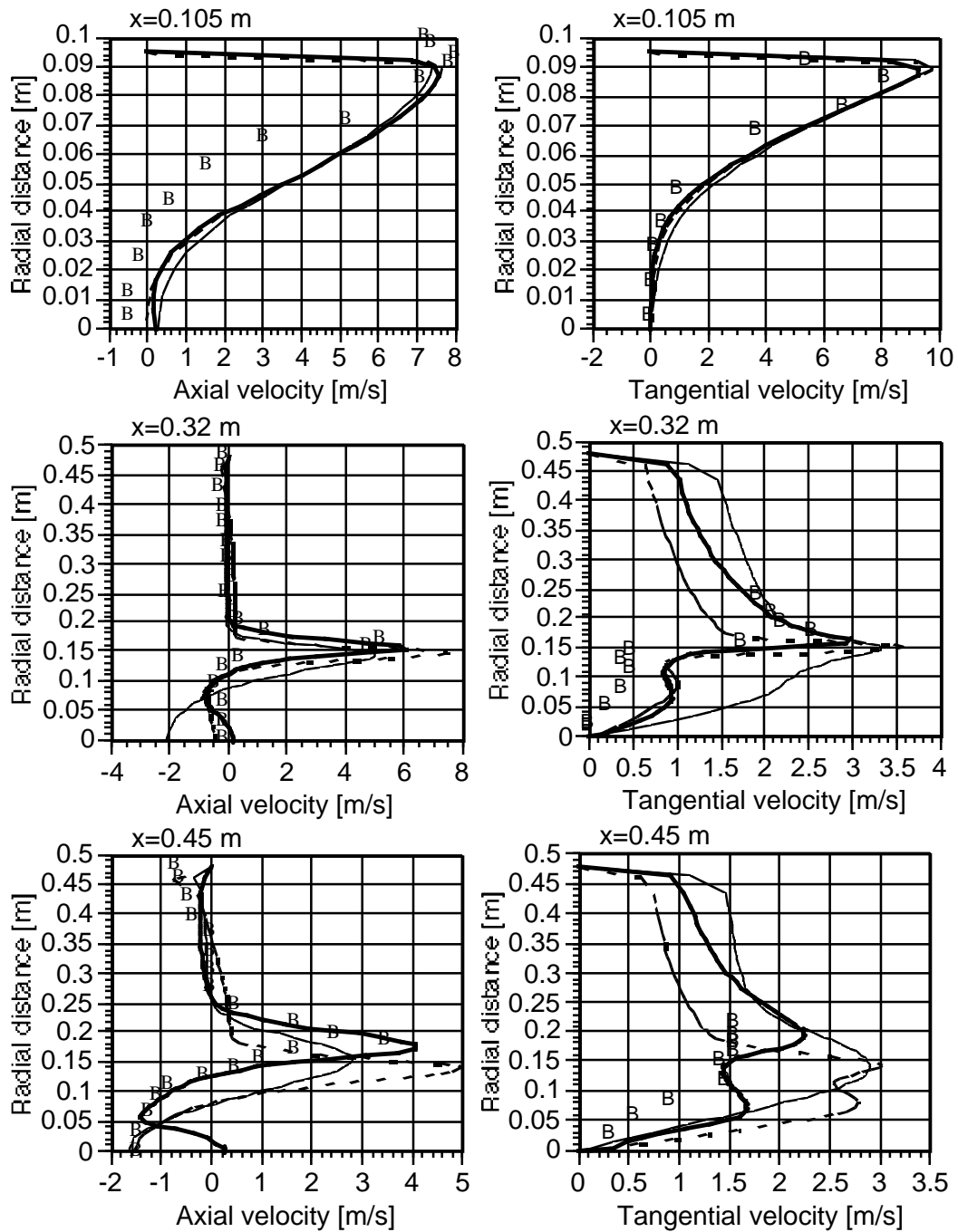
*Kuva 18. Residuaalien muutos 8 800 iteraatiokierroksen aikana. Kierrokset 1–2 000 on laskettu ensimmäisen kertaluvun diskretoinnilla ja k-e-mallilla, 2 001–5 000 RSM/hybrid, 5 001–6 500 RSM/II-upwind/hybrid, 6 501–7 500 RSM/QUICK/hybrid, 7 501–8 800 RSM/QUICK/II-upwind.*

Paluuvirtausalue nähdään kuvasta 19, jossa esitetään aksiaalinopeuden U tasa-arvokäyrä nolla sekä vertailun vuoksi arvot -0,5 m/s ja +0,5 m/s. Laskettua tulosta voidaan verrata liitteen 2 kuvaan 2d, jossa esitetään vastaava kokeellinen tasa-arvokäyrä [1].

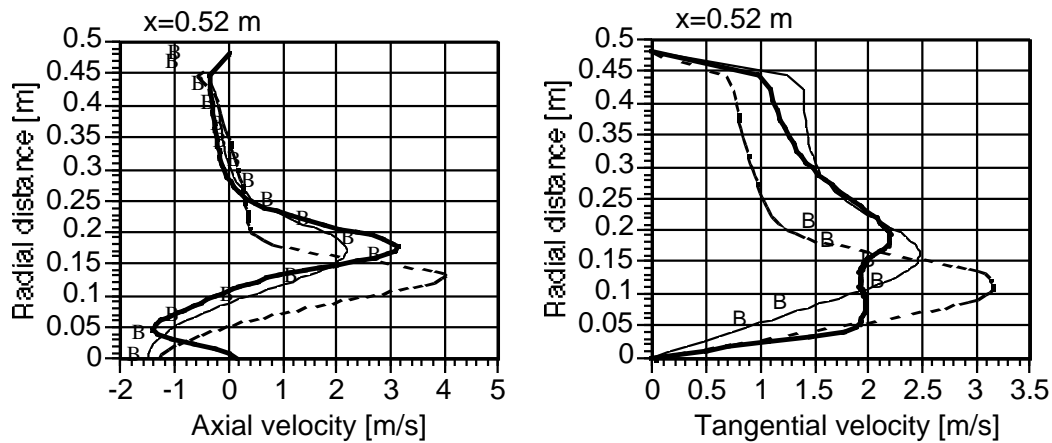


Kuva 19. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5 \text{ m/s}$  (sininen),  $0 \text{ m/s}$  (vihreä) ja  $+0,5 \text{ m/s}$  (punainen). a)  $k\text{-}\epsilon$ -malli 4 000 iteraatiota, b) RNG-malli 3 700 iteraatiota, c) RSM/QUICK 8 800 iteraatiota. Poltin 10.

Nopeusprofiilit esitetään kuvassa 20, joissa olevat mittaustulokset on otettu lähteestä [1]. Aksiaalinopeudet voidaan laskea melko hyvin ja tangentiaalinopeudet kohtalaisesti. Reynoldsin jännitysmallin avulla tehdyt laskut ovat tarkkuudeltaan omaa luokkaansa. RNG- ja  $k\text{-}\epsilon$ -malli antavat satunnaisesti jompi kumpi paremman nopeusprofiilin. Kohdassa  $x = 0,32 \text{ m}$   $k\text{-}\epsilon$ -malli antaa keskilinjalla tyypillisesti liian suuren paluuvirtausnopeuden. RSM-laskuissa lähellä keskilinjaa laskettu aksiaalinopeus poikkeaa sekä mitatusta että muilla malleilla saadusta tuloksesta poikkileikkauksissa  $x = 0,45 \text{ m}$  ja  $x = 0,52 \text{ m}$ . Kuvasta 19 nähdään, että tällä kohdalla aksiaalinopeus keskilinjalla on pienellä alueella positiivinen.



Kuva 20. (jatkuu) Aksiaali- ja tangentiaalinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat  $k-\epsilon$  (—), RNG- $k-\epsilon$  (-----), ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (-·-). Poltin 10.



Kuva 20. Aksiaali- ja tangentiaalivopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat k-e (—), RNG-k-e (-----), ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (- -). Poltin 10.

Kuvassa 21 a-c esitetään virtafunktion tasa-arvokäyrät kullakin turbulenssimallilla laskettuna. Kaikki mallit kuvaavat yleisen virtauskentän polttokammion alkusallalla saman tapaisesti siten, että paluuvirtauspyörteet jakautuvat kolmeen osaan. k-e-mallissa ensimmäinen sisempi pyörre on liian syvällä polttokartiossa. RNG- ja RSM-laskenta kuvaa tämän paremmin mittaustuloksia vastaavasti. RSM-tapauksessa ulosmenoaukosta tulee taas virtaus sisään läheltä keskilinjaa, ja tämä vaikuttaa tulokseen, joskin lievästi.

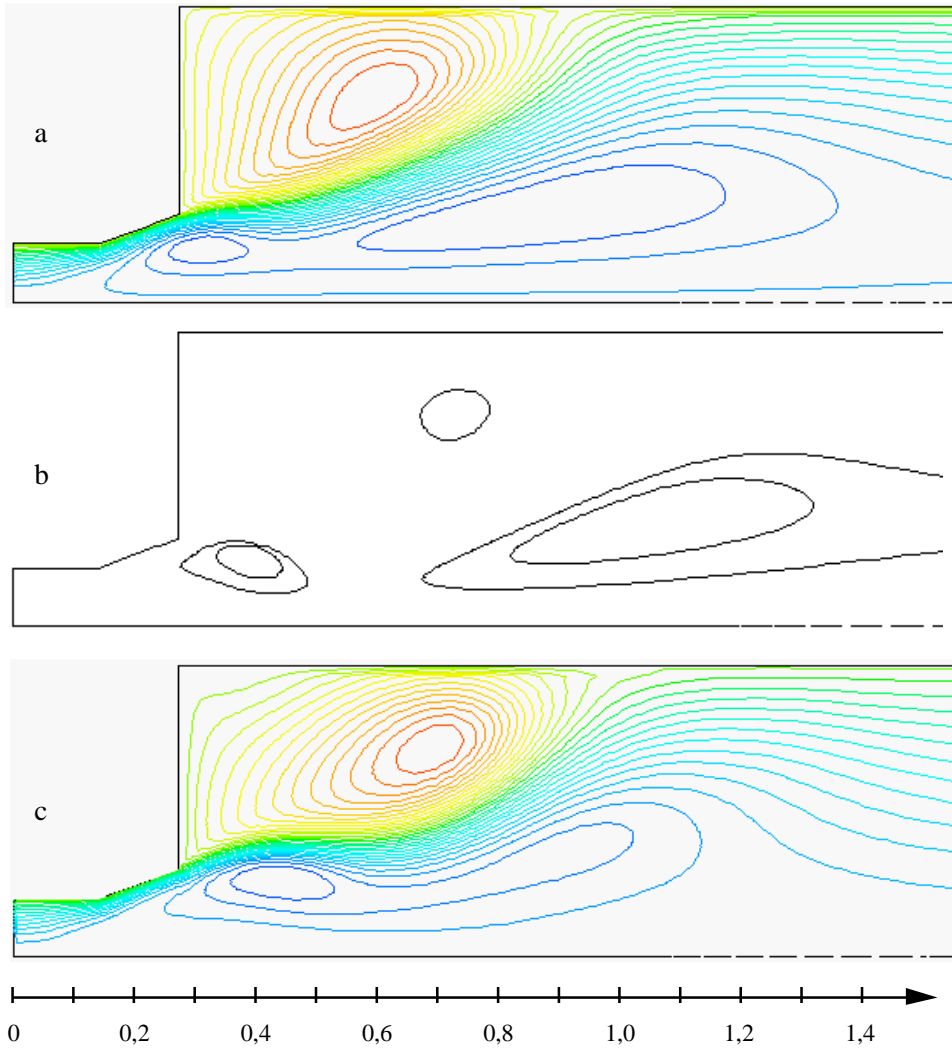
Kuvassa 22 esitetään paluuvirtausalueen voimakkuuden jakautuma pitkin polttokammion keskilinjaa. Sisemmän paluuvirtausalueen ensimmäinen huippu tulee RSM-laskussa kuvatuksi parhaiten. Toinen huippu hiipuu tässä tapauksessa luultavasti keskilinjalta tulevan virtauksen vaikutuksesta. RNG-laskenta kuvaa ensimmäisen huipun kohtalaisesti ja toisen parhaiten, joskin pyörrealueet ovat erottuneet liiaksi toisistaan. k-e-malli kuvaa virtauskuvion kohtalaisesti, mutta ei kykene laskemaan pyörteiden voimakkuuksia oikein vaan antaa liian pienet arvot. Lähteen [1] laskuissa on sekä k-e että ASM-laskennassa saatu mittaustuloksia suuremmat pyörteiden voimakkuudet välillä  $x = 0,2 \dots 1,2$  m.

Ulommasta paluuvirtausalueesta ei ole muita numerotietoja, kuin että sen maksimivoimakkuus on mittausten mukaan 1,7 [1]. RNG-laskenta antaa maksimiarvon 1,4, RSM arvon 1,2 ja k-e arvon 0,75. Kaikki siis kuvaisivat tämän mukaan ulomman paluuvirtauksen todellista heikompana.

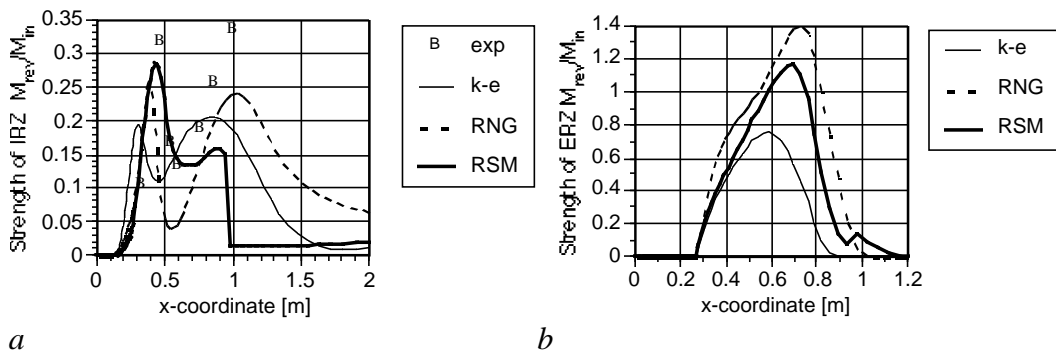
Tässä laskettuja tuloksia voidaan verrata liitteessä 2 esitettyihin mittausten perusteella piirrettyihin virtauskuvioihin sekä lähteessä [1] laskettuihin tuloksiin.

Kuvassa 23 esitetään turbulentsin viskositeetin jakautuma eri malleilla laskettuna. Tulokset ovat paremmin yhdenmukaisia kuin polttimella 7, joskin eroja esiintyy. Kuvissa 24 ja 25 esitetään turbulentsin aika- ja pituuskaalat, jotka

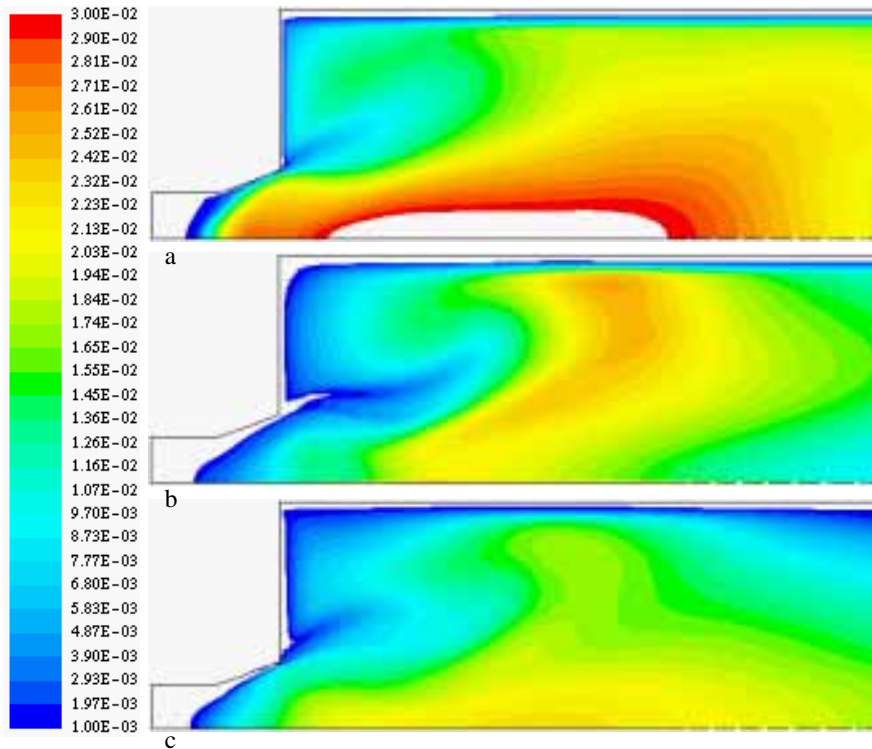
ovat eri malleilla lähes saman muotoiset. Pieniä eroja esiintyy paikallisissa arvoissa.



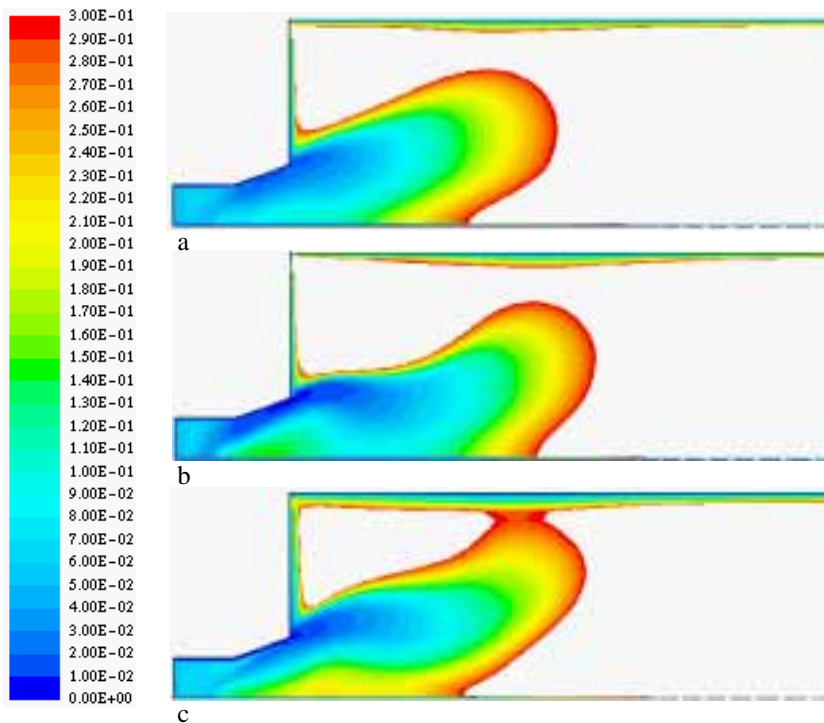
Kuva 21. Virtafunktion tasa-arvokäyrät polttimelle 10. a) k-e-malli, b) RNG-k-e-malli, c) RSM-malli.



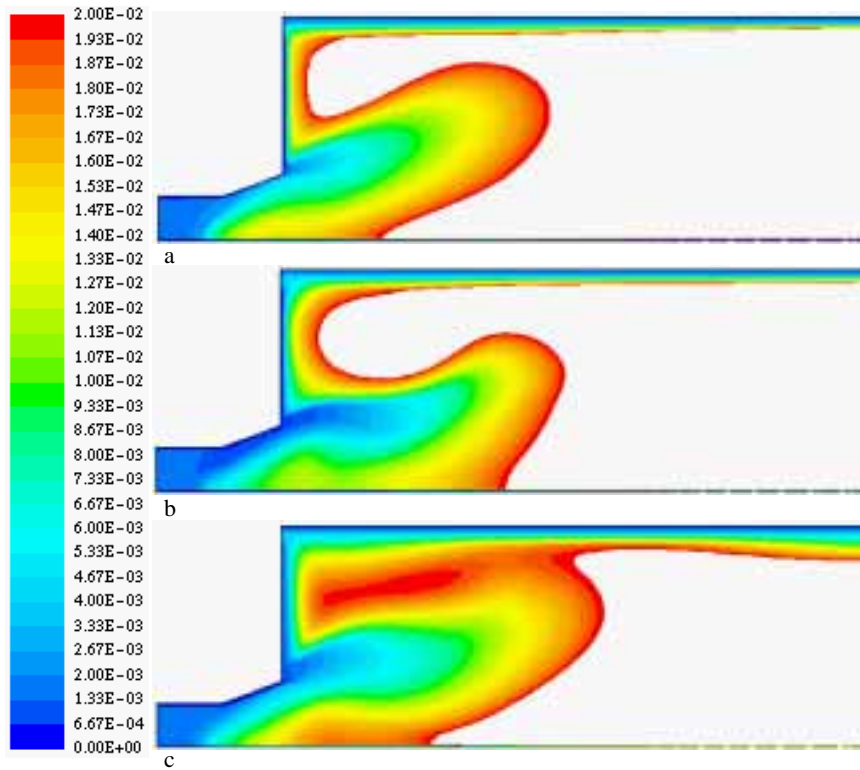
Kuva 22. Paluuvirtausalueiden voimakkuus a) ulompi, b) sisempi polttimelle 10 eri turbulenssimalleilla laskettuna. Mittaustulokset (B) on saatavissa vain sisemälle alueelle [1].



Kuva 23. Turbulenttinen viskositeetti polttimelle 10. Arvot 0,001–0,03 kgm/s. a) k-e-malli, (koko alueen arvot  $1,85 \cdot 10^{-5}$ – $3,24 \cdot 10^{-2}$ ), b) RNG-k-e-malli (koko alue  $1,85 \cdot 10^{-5}$ – $2,64 \cdot 10^{-2}$ ), c) RSM QUICK/sou 9 500 iteraatiota ( $8,8 \cdot 10^{-5}$ – $2,28 \cdot 10^{-2}$ ).



Kuva 24. Turbulenssin aikaskaala välillä 0–0,3 s polttimelle 10. Koko alueen arvot ovat a) 0–2,5 s k-e-malli, b) 0–3,3 s RNG- k-e-malli, c) 0–2,43 s RSM-malli.



Kuva 25. Turbulenssin pituuskaala välillä 0–0,02 m a) k-e, koko alue 0–0,046 m, b) RNG-k-e, koko alue välillä 0–0,04 m, c) RSM, koko alue 0–0,042 m. Poltin 10.

### 9.3 POLTIN 11

Polttimen 11 laskemiseen käytetään niitä reunaehtoja, jotka on esitetty lähteen [3] liitteessä (Table 1). Arvot ovat myös liitteenä 1. Turbulenssisuureille annetaan koko sisäänvirtausreunalla turbulenssin kineettisen energian ja turbulenssin vaimenemisen arvot mittaustulosten perusteella. Laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,105$  m, samoin kuin lähteiden [1] ja [3] laskuissa. Laskentaverkossa on yhteensä 8 874 laskentakoppia joista 153 aksiaali- ja 58 radiaalisuunnassa. Poltinkartion alueella on aksiaalisuunnassa 38 ja radiaalisuunnassa 46 laskentakoppia. Verkon alkuosa esitetään kuvassa 4. Lieriömäisen polttokammion ulosmenoreuna kuvataan ilman supistusta ja reunalla sovelletaan Fluentin OUTLET-reunaehtoa.

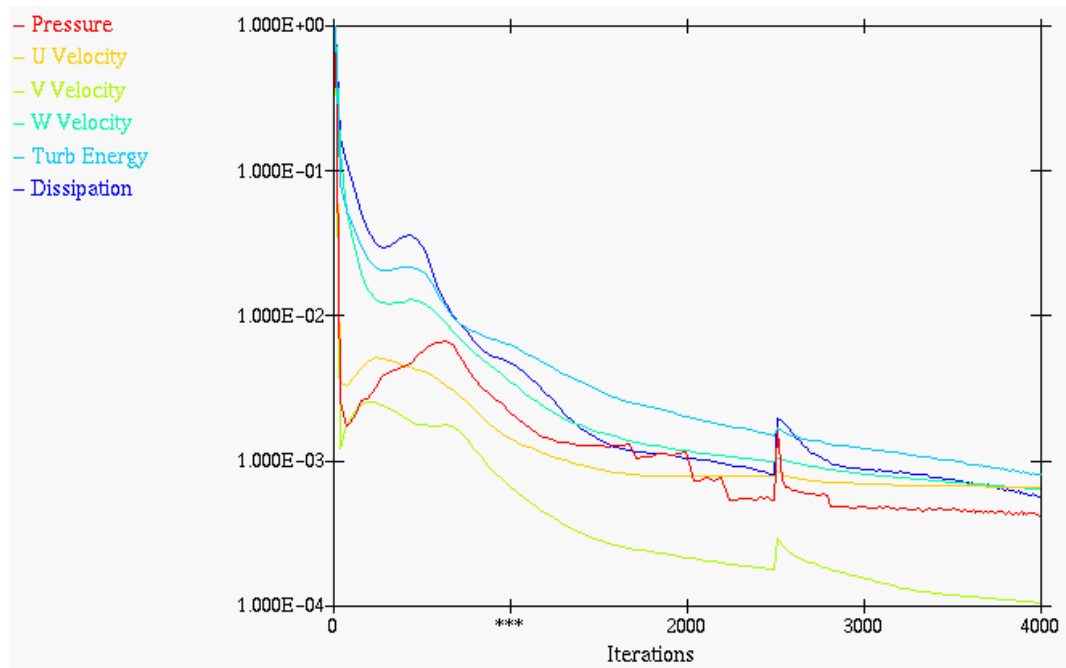
Laskenta k-e-mallilla aloitetaan alusta käyttäen kaikille suureille hybridi-diskreointia. Taulukoissa 13 ja 14 esitetään laskennassa käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimet. Kuvassa 26 esitetään residuaalien muutos laskennan aikana.

Taulukko 13. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi hybridimenetelmällä. Poltin 11, k-e-malli.

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–1500	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
1501–1700	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,05
1701–2000	0,15	0,15	0,2	0,1	0,1	0,05
2001–2200	0,12	0,12	0,2	0,1	0,1	0,05
2201–2500	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,05

Taulukko 14. Iteraation aikana eri suureille käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 11, k-e-malli.

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
2501–2800	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,05
2801–4000	0,08	0,08	0,15	0,1	0,1	0,05



Kuva 26. Residuaalien muutos 4 000 iteraation aikana. Kohdassa 2 500 on vaihdettu konvektiotermien diskretointimenetelmäksi QUICK kaikissa yhtälöissä. Poltin 11, k-e-malli.



RNG-mallin laskut aloitetaan alusta. Käyttäjävirheen vuoksi laskenta aloitettiin ensin käyttämällä kaikille suureille QUICK diskretointia. Ratkaisu lähtee näinkin konvergoitumaan, mutta tulos näyttää epäfysikaaliselta. Välillä 4 000–6 500 iteraatiokierrosta käytetään kaikille suureille hybrididiskretointia, jolloin virtauskenttä asettuu. Väli 6 500–9 800 lasketaan jälleen käyttäen QUICKiä kaikille suureille. Laskennan aikana käytettävät lineaarisen alirelaksoinnin kertoimet esitetään taulukoissa 15, 16 ja 17. Residuaalien kehitys esitetään kuvassa 27.

*Taulukko 15. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. Poltin 11, RNG-malli.*

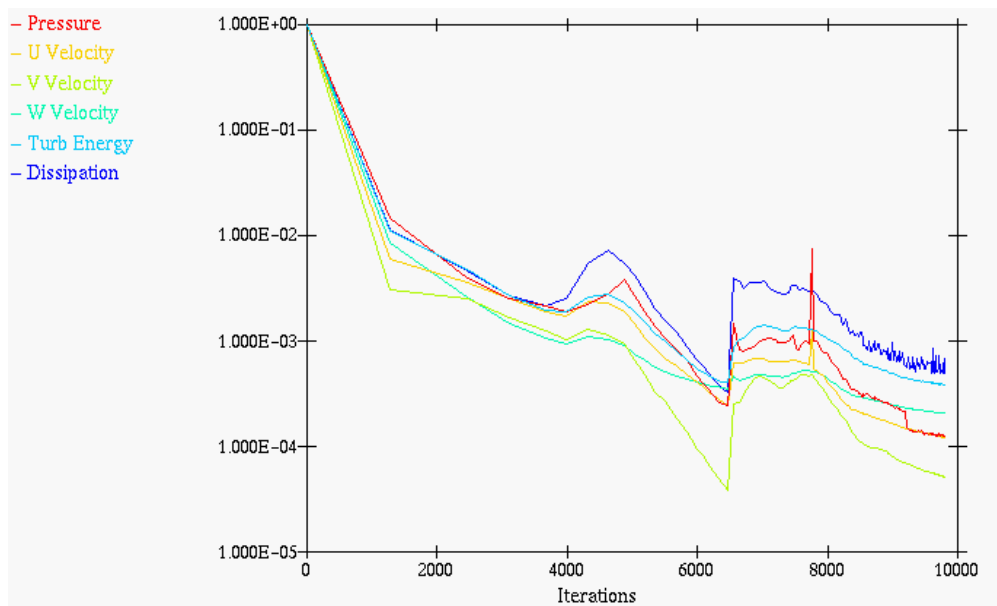
Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
1–500	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
501–1000	0,15	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1
1001–2000	0,12	0,12	0,2	0,1	0,1	0,1
2001–3500	0,1	0,1	0,18	0,1	0,1	0,08
3501–4000	0,12	0,12	0,2	0,1	0,1	0,1

*Taulukko 16. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Iteraation aikana on kokeiltu eri arvoja, korkeampia kuin edellä taulukossa XV olevat. Diskretointi hybridi-menetelmällä. Poltin 11, RNG-malli.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
4001–?						
?–6500	0,15	0,15	0,2	0,15	0,15	0,15

*Taulukko 17. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk.
6501–6700	0,15	0,15	0,2	0,15	0,15	0,15
6701–7500	0,15	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1
7501–9000	0,12	0,12	0,18	0,1	0,1	0,08
9001–9800	0,1	0,1	0,18	0,08	0,08	0,07



Kuva 27. Residuaalit 9 800 iteraation aikana. Laskenta aloitetaan käyttäen QUICK-diskretointia kaikille yhtälöille. Kohdassa 4 000 vaihdetaan konvektiotermeille hybrididiskretointi kaikille yhtälöille ja jatketaan kohtaan 6 500 iteraatiota, jonka jälkeen vaihdetaan takaisin QUICKiin. Poltin 11, RNG-k-e-malli.

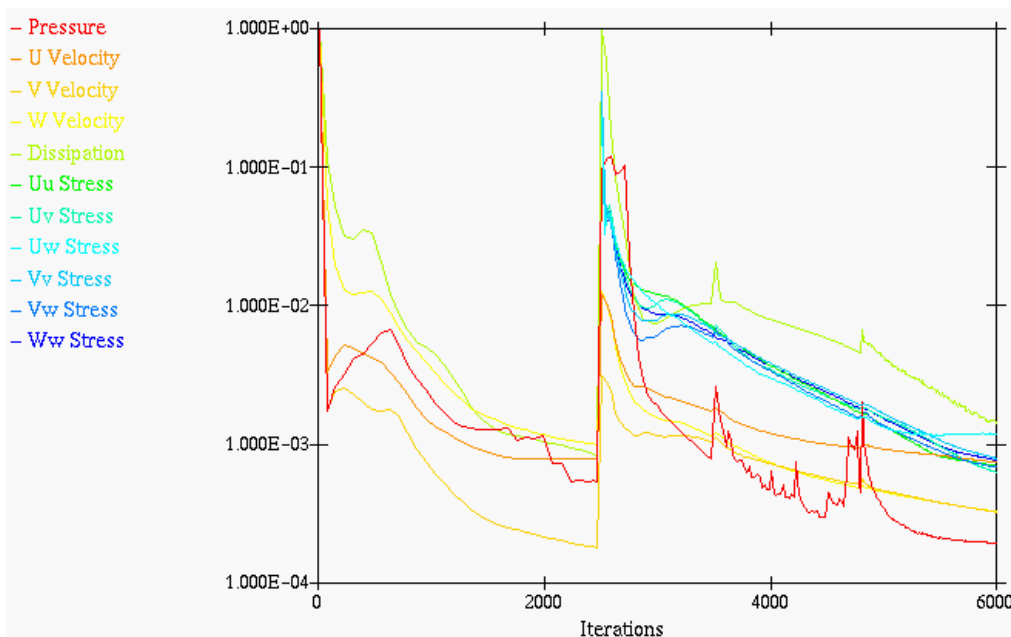
Reynoldsin jännitysmallin laskenta aloitetaan k-e-mallin välituloksesta kohdasta 2 500 iteraatiota, joka on saatu hybrididiskretoinnilla. Tässä vaiheessa vaihdetaan ainoastaan turbulenssimallia ja käytetään yhäti alhaisen kertaluvun diskretointimenetelmää. Jos diskretoinniksi vaihdetaan tässä vaiheessa QUICK, divegoi laskenta välittömästi. Hybrididiskretoinnilla jatketaan väli 2 500–3 500, jonka jälkeen vaihdetaan kaikille suureille toisen kertaluvun upwind (II-upwind). Tämän on jo esillä olleissa tapauksissa todettu olevan QUICK-diskretointia huomattavasti stabiilimpi vaihtoehto. Näin lasketaan väli 3 500–4 800, jonka jälkeen kaikille suureille paitsi Reynoldsin jännityksille käytetään QUICK-disretointia (väli 4 800–6 000). Tässä vaiheessa ratkaisu on muuten asettunut, mutta alkuosan takaisinvirtauspyörteen perässä lähellä keskilinjaa oleva häntä pitenee vielä hiljalleen ratkaisun edetessä. Tässä on nähtävissä aikaisemmin esitetty vaara, että virtaus kääntyy ulosmenoaukon keskilinjalta sisään, vaikka tilannetta ei ole niin pitkälle lasketukaan. Laskennan aikana käytettävät alirelaksaatiokertoimien arvot esitetään taulukoissa 18 ja 19. Residuaalien kehitys esitetään kuvassa 28.

Taulukko 18. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi hybridi-menetelmällä. RSM, poltin 11, ei supistusta.

Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
2501–3500	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1

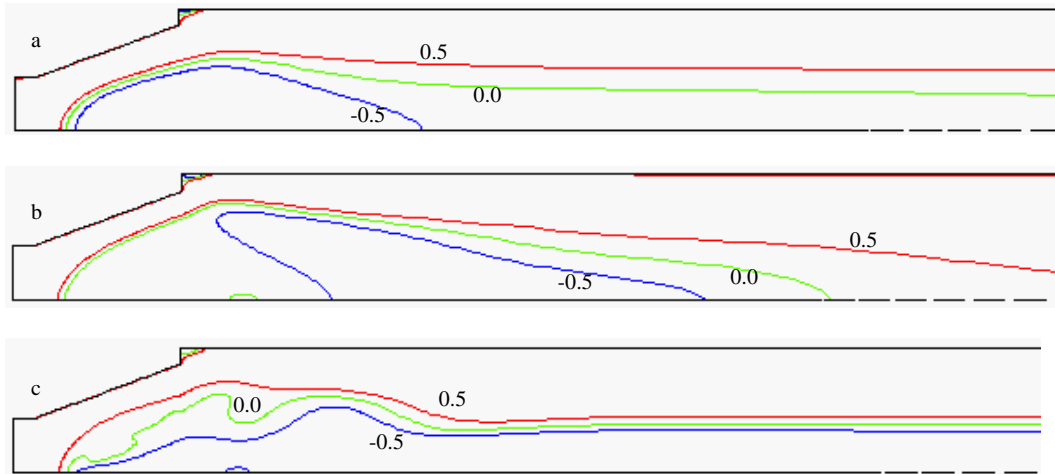
Taulukko 19. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi toisen kertaluvun upwind-menetelmällä iteraatioon 4 800 saakka, josta alkaen nopeuksille ja turbulenssin vaimenemiselle käytetään QUICK-diskretointia. RSM, poltin 11, ei supistusta.

Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
3501–4500	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
4501–4800	0,12	0,12	0,2	0,2	0,1	0,2
4801–6000	0,12	0,12	0,2	0,2	0,1	0,2



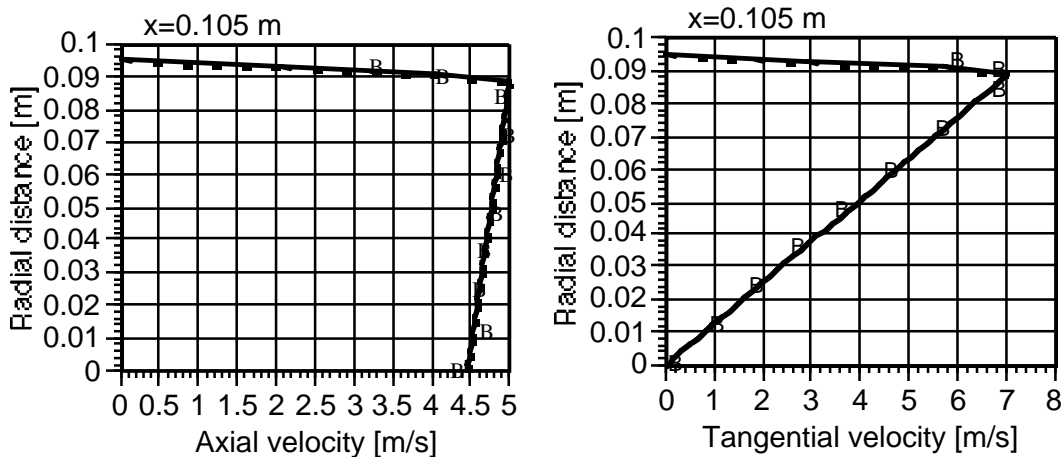
Kuva 28. Residuaalit 6 000 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 2 500 on vaihdettu turbulenssimalliksi RSM k-e:n sijasta. Konvektiitermien diskretointi hybridimenetelmällä välillä 2 500–3 500 kaikissa yhtälöissä, II-upwind välillä 3 500–4 800, QUICK/II-upwind 4 800–6 300. Poltin 11. RSM-malli.

Paluuvirtausalue nähdään kuvasta 29, jossa esitetään aksiaalinopeuden U arvo nolla sekä vertailun vuoksi arvot  $-0,5$  m/s ja  $+0,5$  m/s. Tätä voidaan verrata liitteen 2 kuvaan 3d, jossa esitetään mittausten perusteella saatu aksiaalinopeuden tasa-arvokäyrä. k-e-malli kuvaa paluuvirtausalueen summittaisen muodon kohtalaisesti, mutta ei sen etuosan yksityiskohtia. RNG-mallin versio on hieman parempi. RSM-mallin antama tulos näyttää paremmalta oikeastaan laskennan aikaisessa vaiheessa, jolloin käytettiin alhaisen kertaluvun diskretointia. Valittu tapaus on 6 000 iteraation kohdalla ja saattaa vielä kehittyä siten, että ulosmenoreunan reunaehdot (lähinnä painejakautuma) eivät ole samat kuin muissa laskuissa.

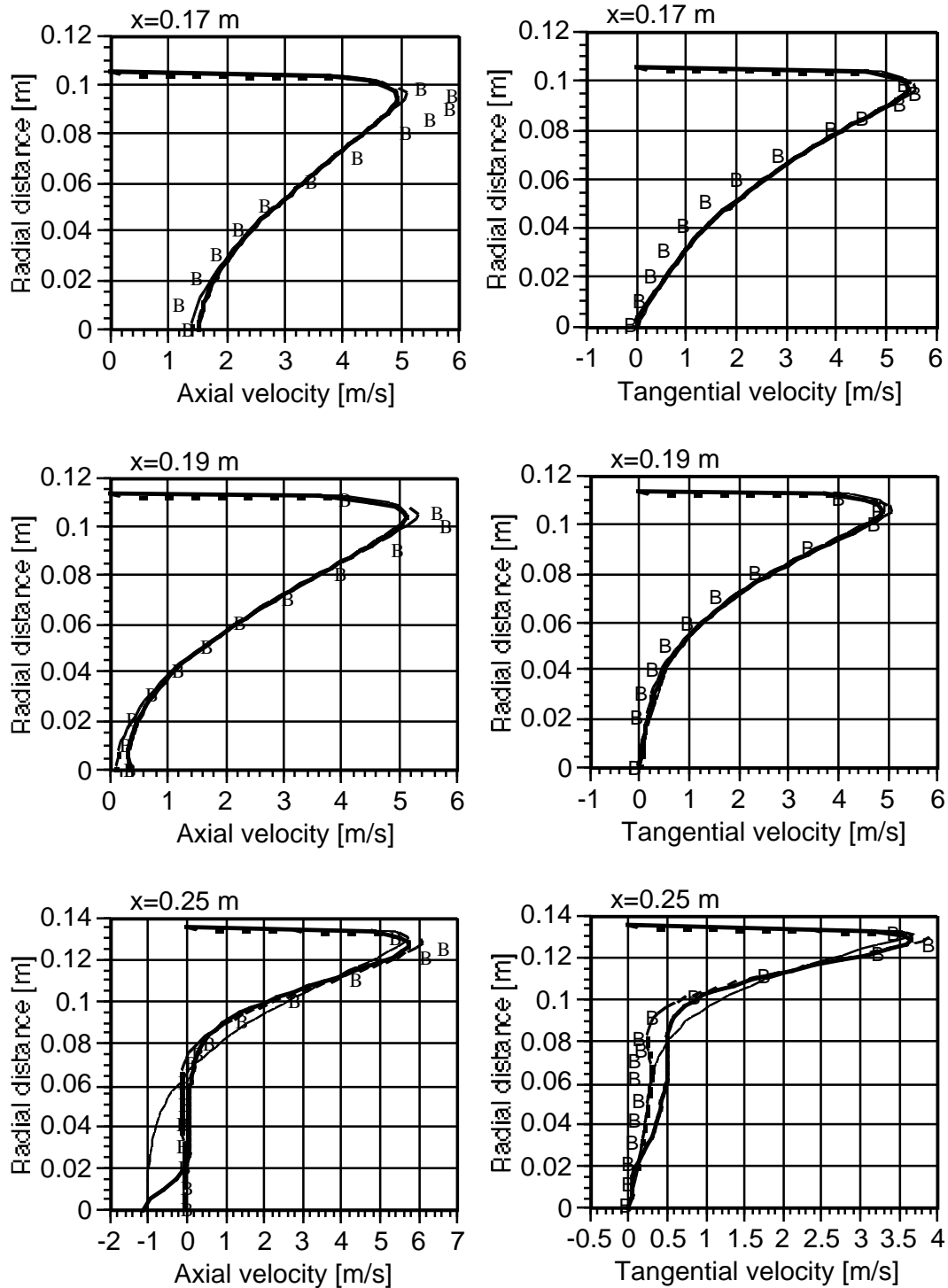


Kuva 29. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5$  m/s (sininen),  $0$  m/s (vihreä) ja  $+0,5$  m/s (punainen viiva). a) k-e-malli QUICK 4 000 iteraatiota, b) RNG-k-e-malli, QUICK 9 800 iteraatiota, c) RSM QUICK/II-upwind 6 000 iteraatiota. Poltin 11.

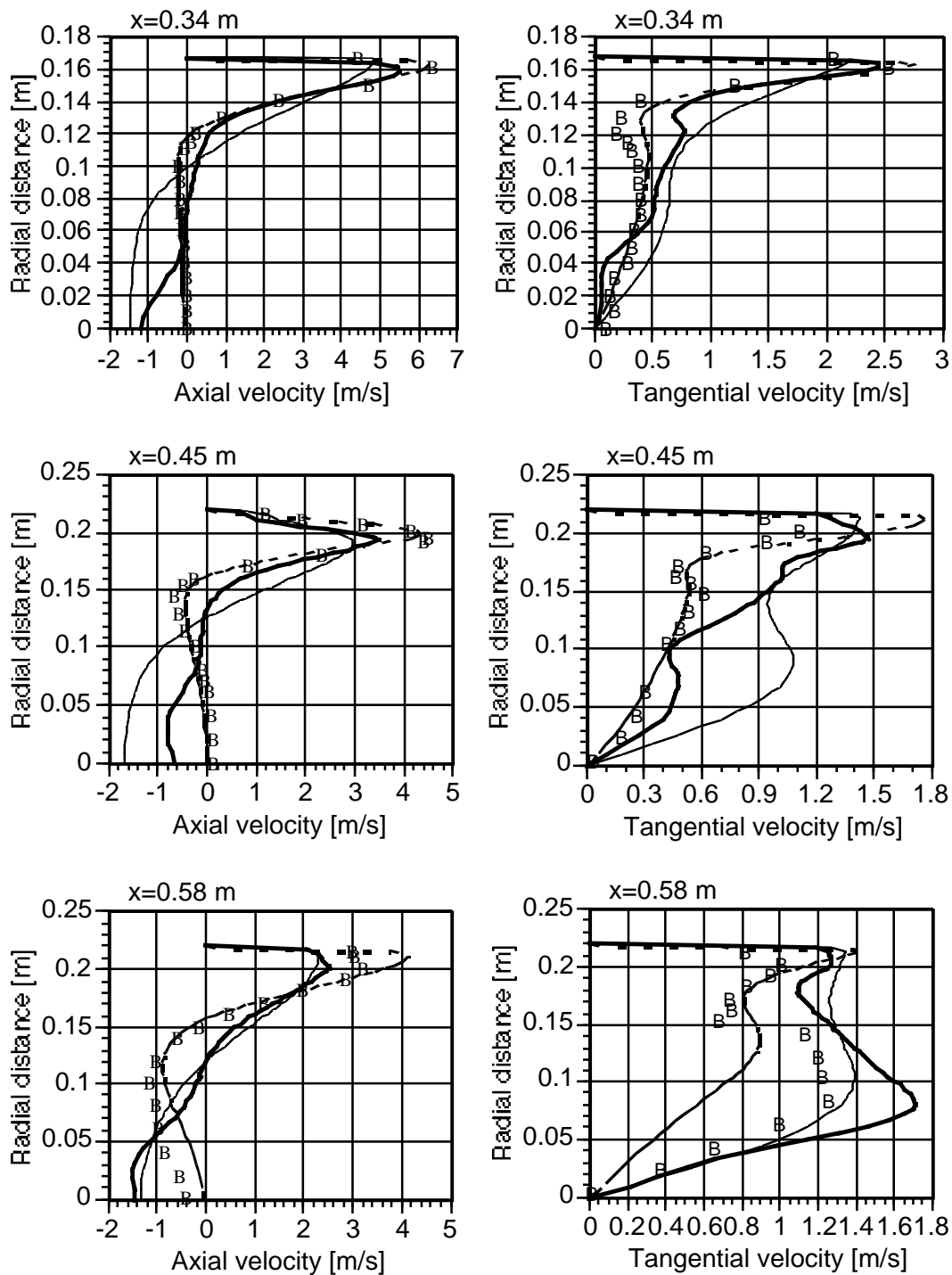
Nopeusjakautumat eri kohdissa esitetään kuvassa 30. Näissä RNG-mallin antama tulos on useassa kohdassa suorastaan erinomainen ( $x = 0,25$  m,  $0,34$  m,  $0,45$  m). k-e-malli ei pysty seuraamaan kaikkia virtauksen yksityiskohtia. Varsinkin keskilinjalla malli antaa tyypillisesti liian suuren paluuvirtausnopeuden ( $x = 0,25$ – $0,58$  m). RSM-laskenta antaa keskilinjalla voimakkaan paluuvirtauksen ( $x = 0,25$ – $1,2$  m). Tämä saattaa johtua aikaisemmin mainitusta reunaehtojen puutteellisesta määrittelystä. Paluuvirtausalue näyttäisi pidentyvän ulosmenoreunalle saakka, jos laskentaa jatketaan.



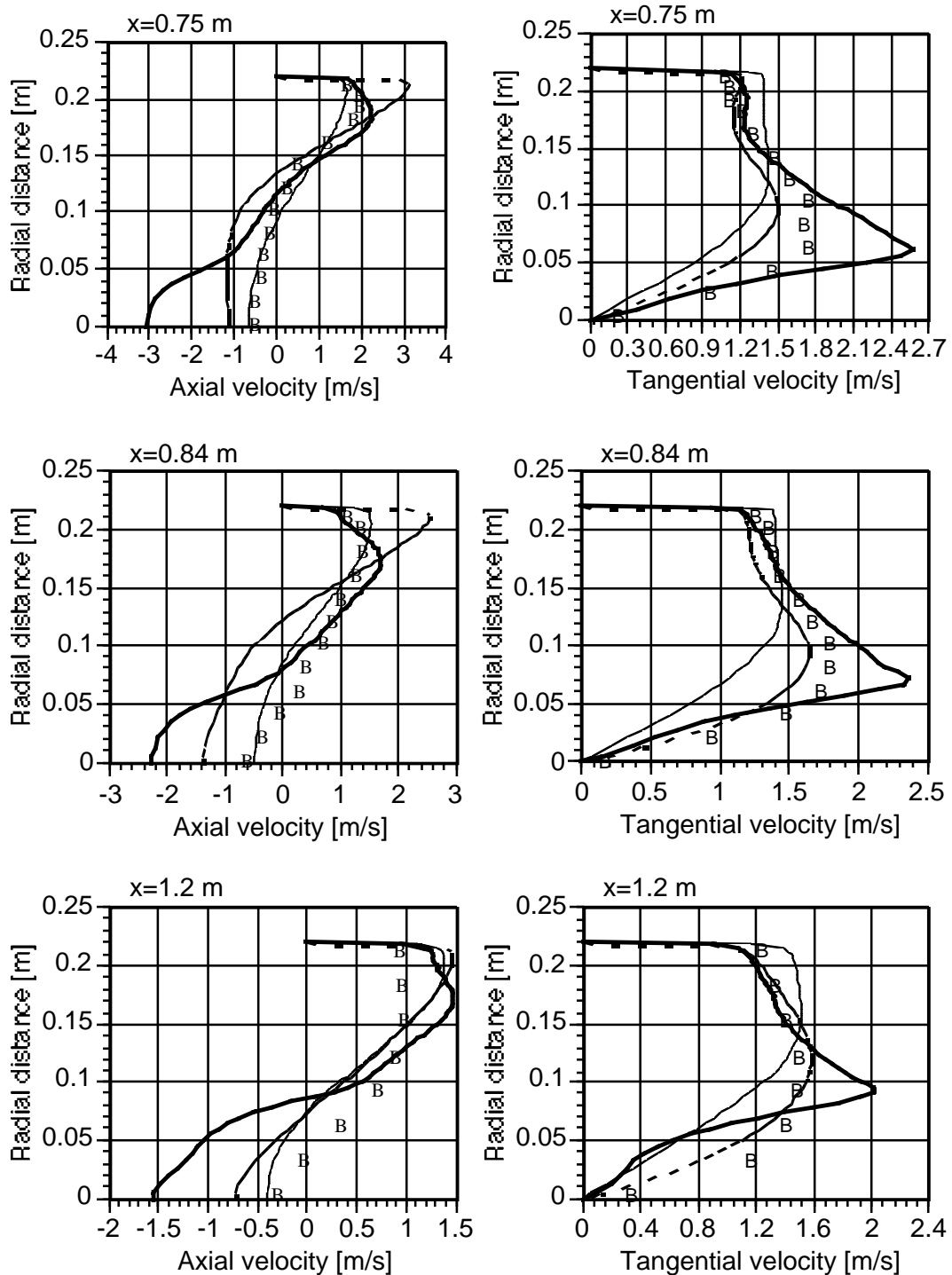
Kuva 30. Aksiaali- ja tangentialinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat k-e (—), RNG-k-e (- - -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (- · -). Poltin 11. (jatkuu)



Kuva 30. Aksiaali- ja tangentialinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat  $k$ - $\epsilon$  (—), RNG- $k$ - $\epsilon$  (- - -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (- · -). Poltin 11. (jatkuu)



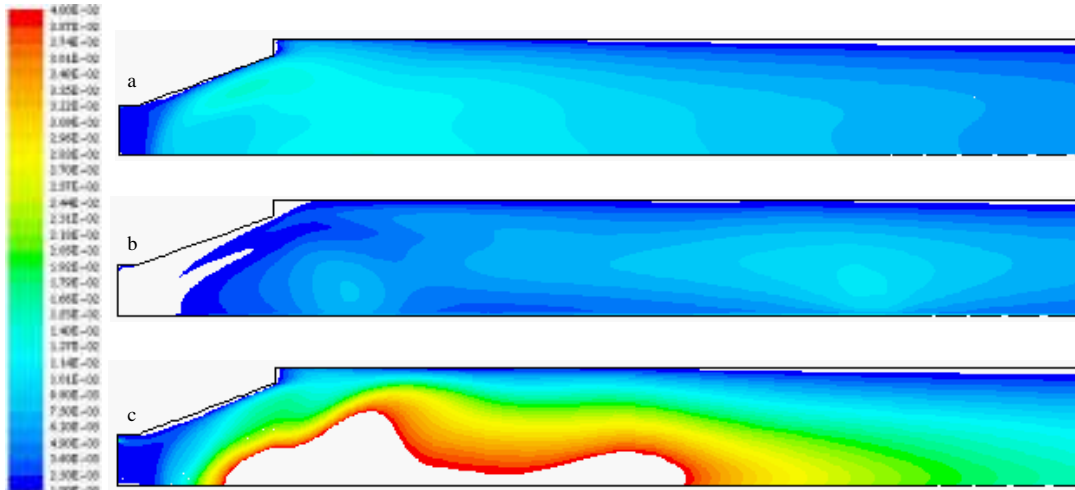
Kuva 30. Aksiaali- ja tangentialinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat  $k-\epsilon$  (—), RNG- $k-\epsilon$  (- - -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (- · -). Poltin 11. (jatkuu)



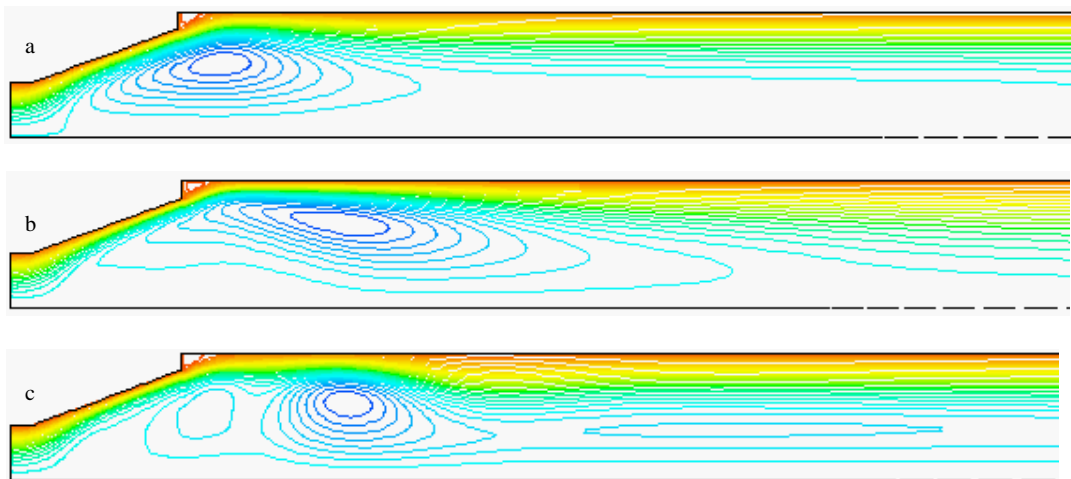
Kuva 30. Aksiaali- ja tangentialinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B). Turbulenssimallit ovat  $k-\epsilon$  (—), RNG- $k-\epsilon$  (- - -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (—). Poltin 11.

Kuvassa 31 esitetään efektiivisen viskositeetin jakautuma polttimelle 11 eri turbulenssimalleilla laskettuna. Jälleen RNG-malli antaa muita pienemmän tason. Tässä tapauksessa RSM-mallin antama viskositeetin taso on muita huomattavasti suurempi.

Kuvassa 32 esitetään virtaviivat, joita voidaan verrata liitteen 2 kuvassa 3 esitettyihin lähteestä [1] saatuihin virtaviivoihin. k-e-mallilla laskettu tulos on tässä parempi kuin lähteessä [1] esitetty harvemmalla verkolla laskettu tulos. Paluuvirtauspyörre ei ole niin syvässä kartiossa kuin lähteen [1] laskussa ja sijaitsee ylempänä. RNG-mallin virtaviivat vastaavat pääosin lähteen [1] RSM-mallilla laskettua tulosta. RSM-mallilla laskettu virtaviivakenttä poikkeaa sekä mittauksista että kaikista muista laskuista.



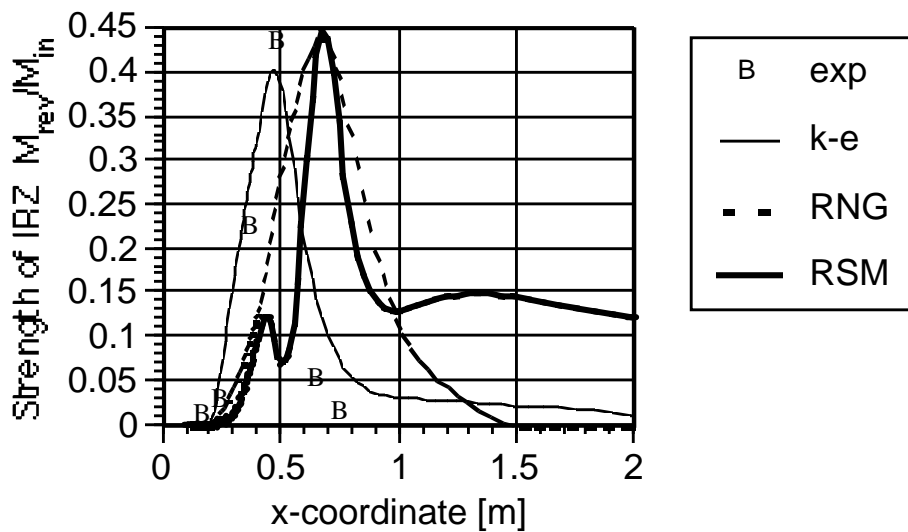
Kuva 31. Turbulenttinen viskositeetti eri malleilla laskettuna. Suureen arvot on piirretty välillä  $0,001-0,040$  kg/ms. Koko alueessa esiintyvät arvot esitetään suluissa kunkin tapauksen kohdalla. a) k-e-malli QUICK 4 000 iteraatiota ( $7,57 \cdot 10^{-5}-1,44 \cdot 10^{-2}$ ). b) RNG-k-e-malli QUICK 9 800 iteraatiota ( $5,14 \cdot 10^{-5}-1,04 \cdot 10^{-2}$ ), c) RSM QUICK/II-upwind 6 000 iteraatiota ( $1,85 \cdot 10^{-5}-6,61 \cdot 10^{-2}$ ). Poltin 11.



Kuva 32. Virtafunktion tasa-arvokäyrät polttimelle 11. a) k-e-mallilla QUICK 4 000 iteraatiota, b) RNG-k-e-mallilla QUICK 9 600 iteraatiota, c) RSM QUICK/II-upwind 6 000 iteraatiota.

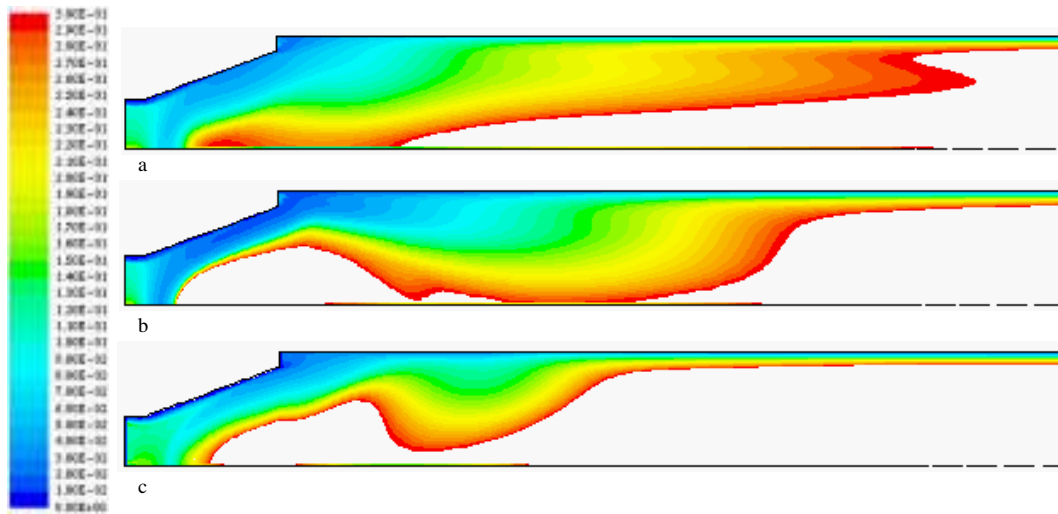


Kuvassa 33 esitetään nopeusjakautumasta laskettu paluuvirtausalueen voimakkuus. Kuvan mittauspisteet ovat lähteestä [1]. Paluuvirtauksen voimakkuuden kuvaa muodoltaan parhaiten k-e-malli. Mallin antama virheellisen suuri paluuvirtausnopeus keskilinjalla ei vaikuta kovin paljoa massavirtaan, koska keskilinjalla oleva osuus polttokammion poikkipinta-alasta on pieni. RNG- ja RSM -mallit antavat paluuvirtauksen voimakkuuden maksimi-arvon oikein, joskaan maksimin sijainti ei ole kohdallaan. Kummatkin kuvaavat lisäksi paluuvirtausalueen liian pitkäksi. RSM-malli antaa lisäksi paluuvirtaukseen pitkän 'hännän', joka lähteen [1] mittaustuloksissa esiintyy heikompana kuin tässä laskettu. k-e-malli antaa hännän heikompana ja RNG-mallin yhteydessä sitä ei näy lainkaan.

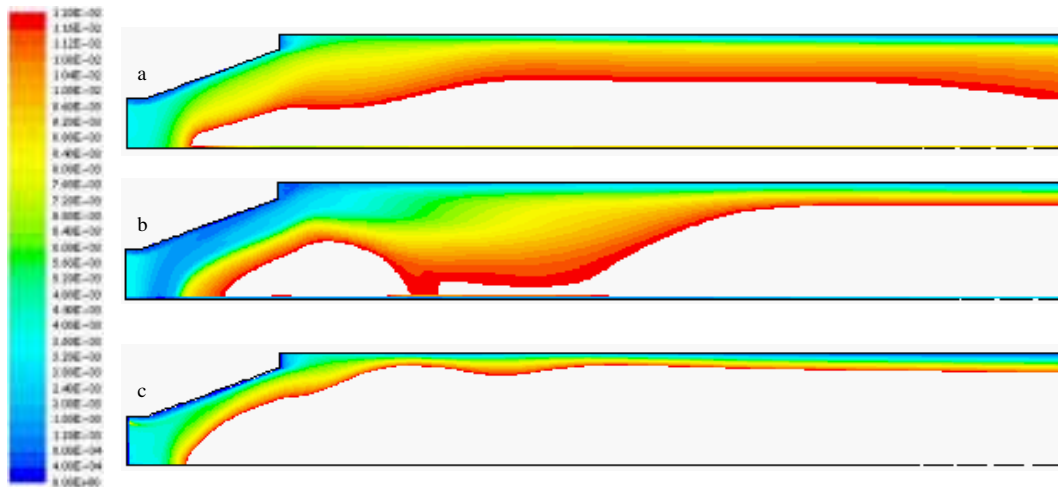


Kuva 33. Paluuvirtausalueen voimakkuus (IRZ) eri turbulenssimalleilla laskettuna. Koetulokset ovat lähteestä [1]. Poltin 11.

Kuvissa 34 ja 35 esitetään turbulenssin aika- ja pituusskaalat eri malleilla laskettuna. Tässä tapauksessa arvot ovat suuruudeltaan samaa luokkaa vaikka kenttien muodoissa on erojakin.



Kuva 34. Turbulenssin aikaskaala välillä 0–0,3 s. Koko alueen arvot ovat välillä a) 0–1,5 s k-e-malli, b) 0–0,81 s RNG-k-e-malli, c) 0–8,16 s, RSM-malli. Poltin 11.

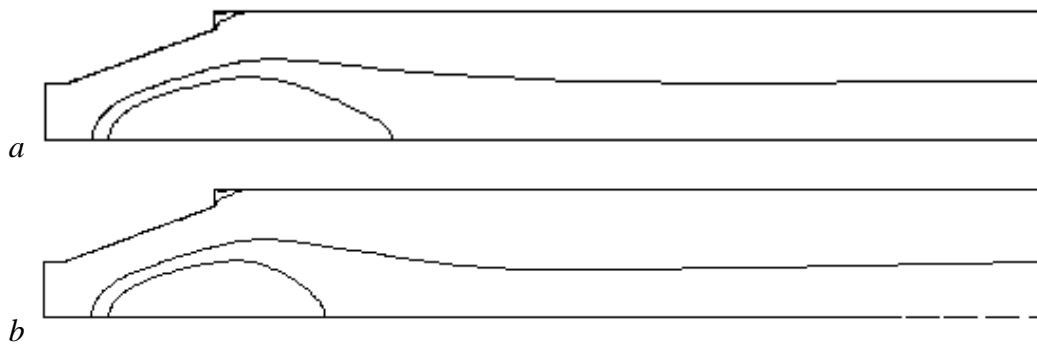


Kuva 35. Turbulenssin pituusskaala välillä 0–0,012 m. Koko alueen arvot ovat välillä a) 0–0,03 m k-e-malli QUICK, 4 000 iteraatiota, b) 0–0,017 m RNG-k-e-malli QUICK 6 500 iteraatiota, c) 0–0,029 m, RSM QUICK/II-upwind 6 000 iteraatiota. Poltin 11.

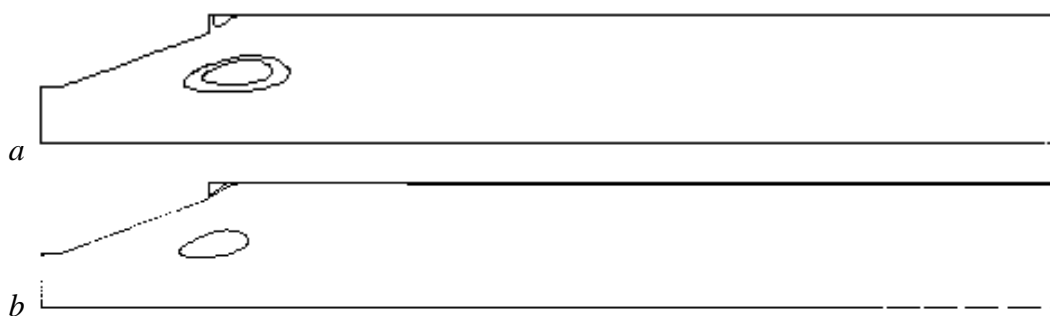
### 9.3.1 Käänteisen iteraatiosuunnan vaikutus

Käänteisen iteraatiojärjestyksen käyttöä kokeillaan vaihtamalla I-indeksi juoksemaan vastakkaiseen suuntaan, jolloin iteraatio etenee ulosvirtausaukosta putken alkupäähän päin. Tämä lasketaan käyttäen konvektiolle hybrididiskreointia, koska tässä yhteydessä ei numeerisella tarkkuudella ole merkitystä. Kummallakin iteraatiosuunnalla lasketaan 4 000 kierrosta, jotta varmistuttaisiin siitä, ettei ratkaisu enää muutu. Aksiaalinopeuden ja virtafunktion tasa-arvokäyrät esitetään kuvissa 36 ja 37. Eri tavoin lasketuissa tuloksissa on hieman eroja, mutta ne eivät ole niin dramaattisia kuin lähteessä [3] on esitetty.

Tämä vertailu on laskettu siten, että putken loppupäässä on voimakas supistus, joka lähteen 3 laskuissa on esitetty optiona. Tässä suhde  $R_c / A = 1,0$  (taulukko 1 ja kuva 3). Supistus muuttaa virtauskentän muotoa siten, että paluuvirtausalue on lyhyt kupla, jossa ei ole häntää keskilinjalla. Lähteessä [3] käänteisen iteraation kokeilu tehtiin tapauksella, jossa ei ole supistusta.



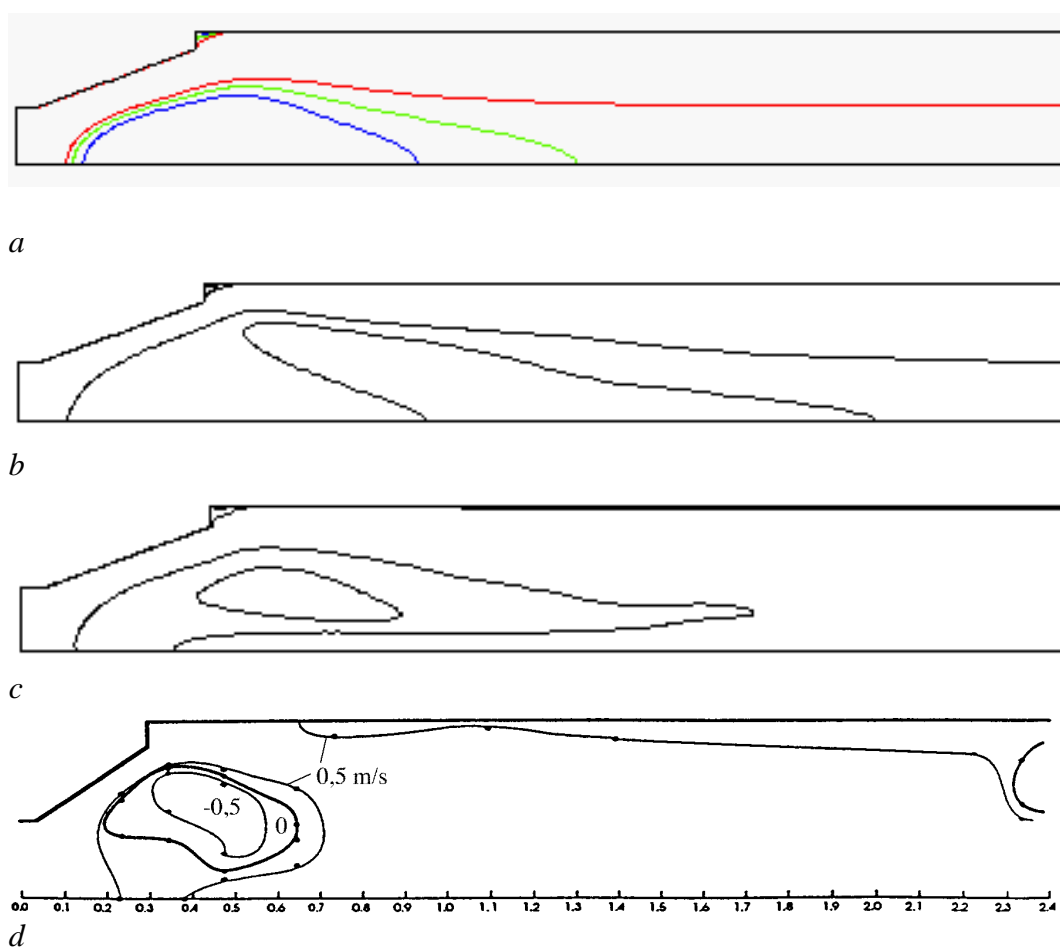
Kuva 36. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5$  m/s,  $0$  m/s ja  $+0,5$  m/s. k-e-malli, hybridi-diskreointi 4 000 iteraatiota. a) virtauksen suuntaan, b) virtausta vastaan iteroiden. Poltin 11, putken loppupäässä on voimakas supistus.



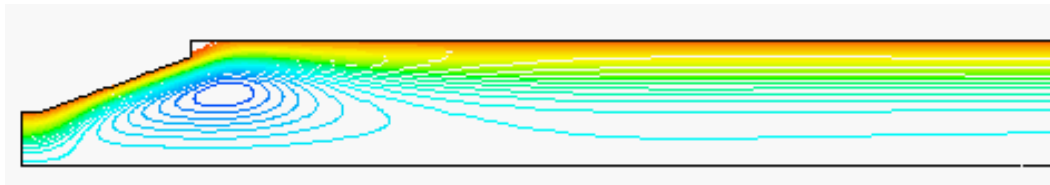
Kuva 37. Virtafunktion tasa-arvokäyrät, k-e-malli, hybridi-diskreointi 4 000 iteraatiota. a) virtauksen suuntaan, b) virtausta vastaan iteroiden. Poltin 11, putken loppupäässä on voimakas supistus.

### 9.3.2 Putken loppuosan supistuksen vaikutus

Lähteen [3] mukaan kokeillaan putken ulosmenoreunaehdon vaikutusta lopputulokseen. Poltin 11 on mitattu ja laskettu sekä putken loppupäässä olevan voimakkaan supistuksen kanssa että ilman sitä. Edellä esitetyt kohdat on kaikki (käänteistä iterointia lukuun ottamatta) laskettu ilman supistusta. Kuvissa 38 ja 39 esitetään aksiaalinopeuden tasa-arvokäyrät ja virtafunktion käyrät tapauksessa, joka on laskettu polttokammion loppupäässä olevan supistuksen kanssa, jolloin kenttä muuttuu hieman. Lähteen [3] mukaan aksiaalinopeuden tasa-arvokäyrä arvolla nolla on RSM-laskennan tuloksen tapaan irti keskilinjalta, joskin mittaukset antavat enemmän pallomaisen alueen (kuvat 38 d ja c). Virtaviivoista tai nopeusjakautumasta ei ole kokeellista tietoa käytettävissä.



Kuva 38. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5$  m/s (sininen),  $0$  m/s (vihreä) ja  $+0,5$  m/s (punainen) tapaukselle, jossa putken loppuosassa on voimakas supistus. Laskettu a) k-e-mallilla, 4 000 iteraatiota, b) RNG-k-e-mallilla, 6 500 iteraatiota, c) RSM-mallilla 9 500 iteraatiota, d) mittaustulosten mukaan [3]. Poltin 11.



a



b



c

Kuva 39. Virtafunktion tasa-arvokäyrät tapaukselle, jossa putken loppuosassa on voimakas supistus. Laskettu a) k-e-mallilla, 4 000 iteraatiota, b) RNG-k-e-mallilla, 6 500 iteraatiota, c) RSM-mallilla 9 500 iteraatiota. Poltin 11.

## 9.4 POLTIN 49

Polttimen 49 laskemiseen käytetään niitä reunaehtoja, jotka on esitetty lähteen [1] liitteessä. Nopeusjakautuman muoto otetaan lähteen liitteen kuvasta lukemattarkkuuden rajoissa. Laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,105$  m, samoin kuin lähteen [1] laskuissa. Turbulenssisuureille annetaan koko sisäänvirtausreunalla vakioarvot – turbulenssin kineettiselle energialle  $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ja turbulenssin vaimenemiselle  $19 \text{ m}^2/\text{s}^3$ . Laskentaverkossa on yhteensä 6 958 laskentakoppia, joista 142 on aksiaalisuunnassa ja 49 radiaalisuunnassa. Poltinkartion alueella on aksiaalisuunnassa 27 ja radiaalisuunnassa 40 laskentakoppia.

Poltin 49 on ainoa tässä lasketuista, jossa suuttimen keskellä on primääri-ilmaputki. Tästä virtaus tulee aksiaalisesti ja vain annulaarisessa osassa nopeudella on nollasta eroava tangentiaalikomponentti. Primääriputken sisäosalla on aksiaalisuunnassa 7 laskentakoppia ja radiaalisuunnassa 10. Vastaavasti annulaarisella osalla on radiaalisuunnassa 28 laskentakoppia.

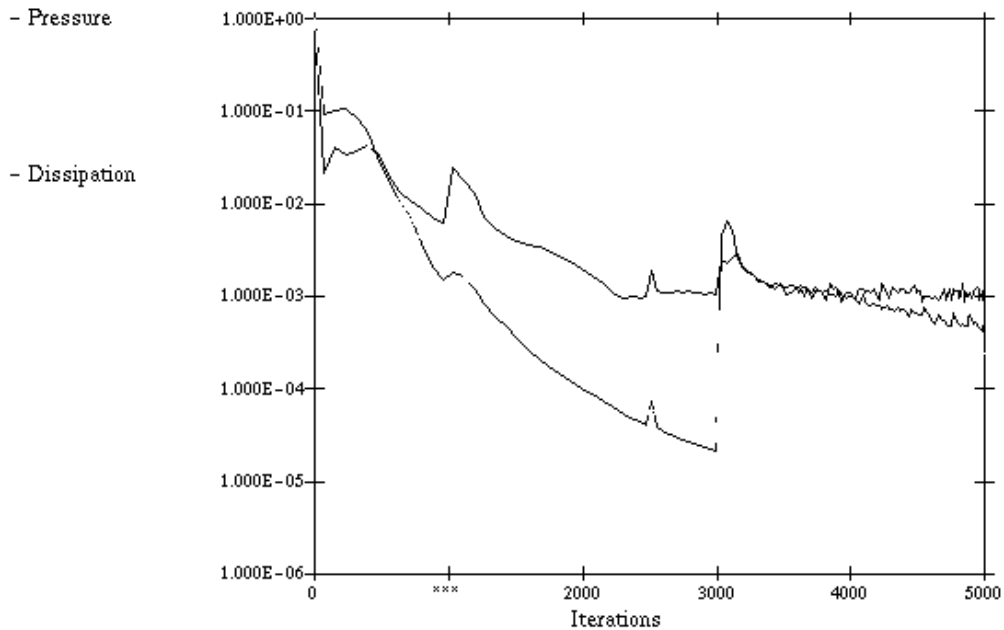
Polttimen 49 laskenta k-e-mallilla aloitetaan alusta, jolloin kaikille suureille käyttää ensin hybrididiskretointia. Myöhemmin vaihdetaan QUICK-diskretointi numeerisen diffuusion eliminoimiseksi. Laskuissa käytettävät lineaarisen alirelaksaation kertoimet esitetään alla taulukoissa 20 ja 21. Iteraatioilla 1 700–2 000 kokeiltiin nopeuden  $u$  ja  $v$  -komponenteille multi-grid-ratkaisijan käyttöä, mutta se ei vaikuttanut mitenkään konvergenssinopeuteen. Muissa kohdissa on käytetty aina Line-Gauss-Seidel-ratkaisijaa. Laskennan residuaalien kehitys esitetään kuvassa 40.

*Taulukko 20. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi hybridi-menetelmällä. k-e-malli, poltin 49.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–1000	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
1001–1200	0,4	0,4	0,5	0,2	0,2	0,2
1201–1400	0,4	0,4	0,7	0,2	0,2	0,2
1401–3000	0,4	0,4	0,7	0,3	0,3	0,2

*Taulukko 21. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. k-e-malli, poltin 49.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
3001–4600	0,4	0,4	0,7	0,3	0,3	0,2
4601–5000	0,4	0,4	0,7	0,2	0,2	0,2



*Kuva 40. Residuaalit 5 000 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 3 000 iteraatiota on vaihdettu diskreetointimenetelmäksi QUICK. k-e-malli, poltin 49.*

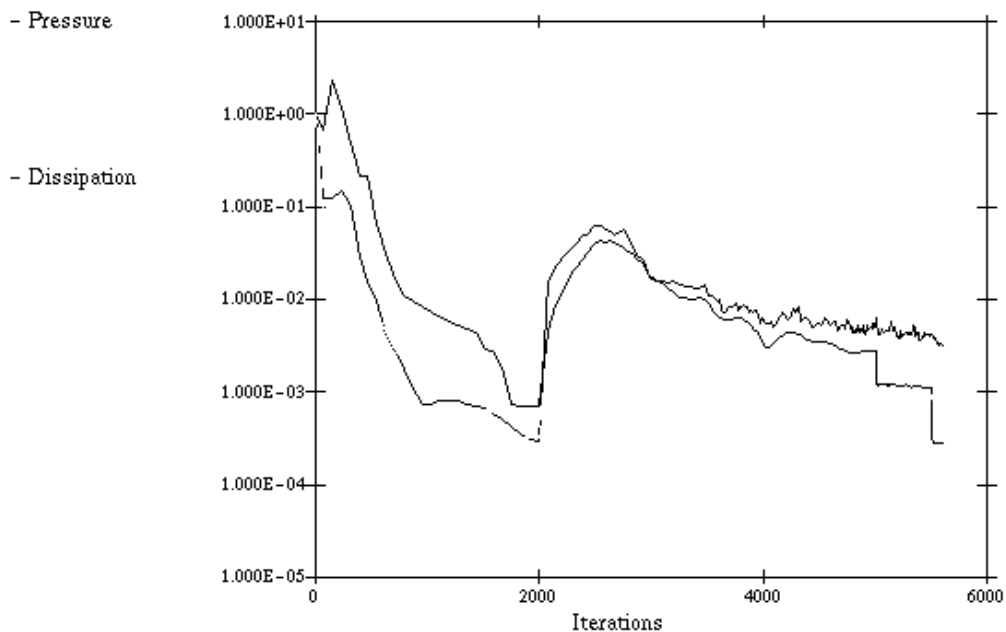
RNG-mallilla laskenta aloitetaan alusta käyttäen aluksi hybrididiskreetointia ja sen jälkeen QUICKiä. Käytettävät alirelaksaatiokertoimet esitetään taulukoissa 22 ja 23. Laskenta etenee ilman suurempia vaikeuksia Laskennan residuaalien kehitys esitetään kuvassa 41.

*Taulukko 22. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskreetointi hybridi-menetelmällä. RNG-k-e-malli, poltin 49.*

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
1–200	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
201–400	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
1–1500	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2
1501–1600	0,35	0,35	0,4	0,2	0,2	0,2
1601–1700	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2
1701–2000	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2

Taulukko 23. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. RNG-k-e-malli, poltin 49.

Iteraatio	u,v	w	p	k	$\epsilon$	visk
2001–5000	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
5001–5500	0,1	0,1	0,3	0,15	0,15	0,2
5501–5600	0,05	0,05	0,3	0,15	0,15	0,2



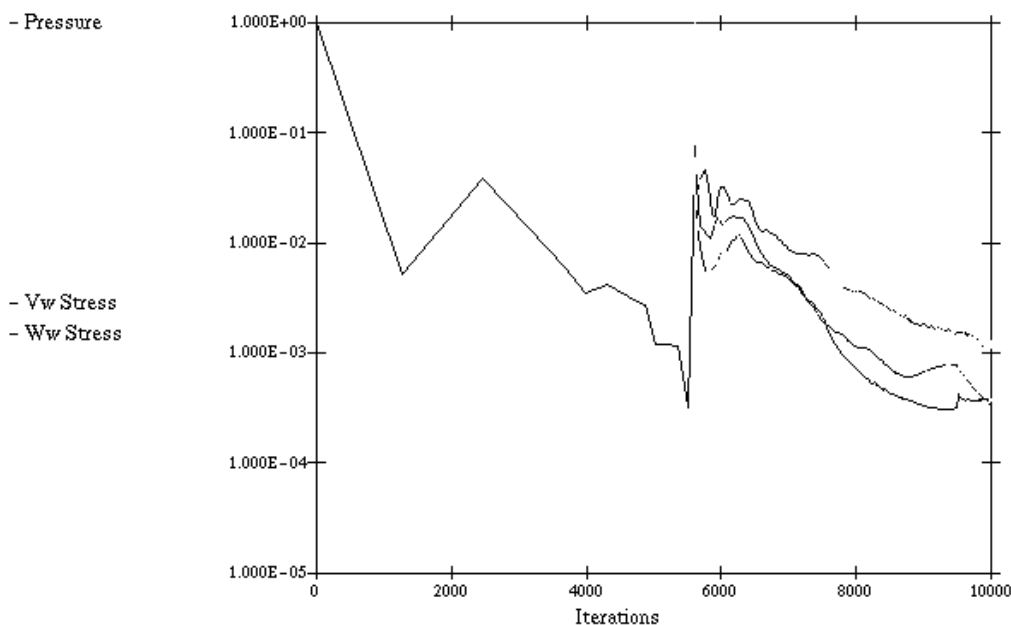
Kuva 41. Residuaalit 5 600 iteraatiokierroksen aikana. Kohdassa 3 000 iteraatiota on vaihdettu QUICK-diskretointi. Residuaalien muutokset laskennan loppupuolella johtuvat alirelaksaatiokertoimien muuttamisesta. Poltin 49, RNG-k-e-malli.

RSM-laskut aloitetaan RNG-mallilla saadusta tuloksesta 5 600 iteraation kohdalta. Kaikille suureille käytetään heti QUICK-diskretointia. Laskentaa jatketaan kaikkiaan 10 000 iteraatiokierroksen kohdalle. Käytettävät alirelaksaatiokertoimet selviävät taulukosta 24. Laskennan residuaalien kehitys esitetään kuvassa 42.



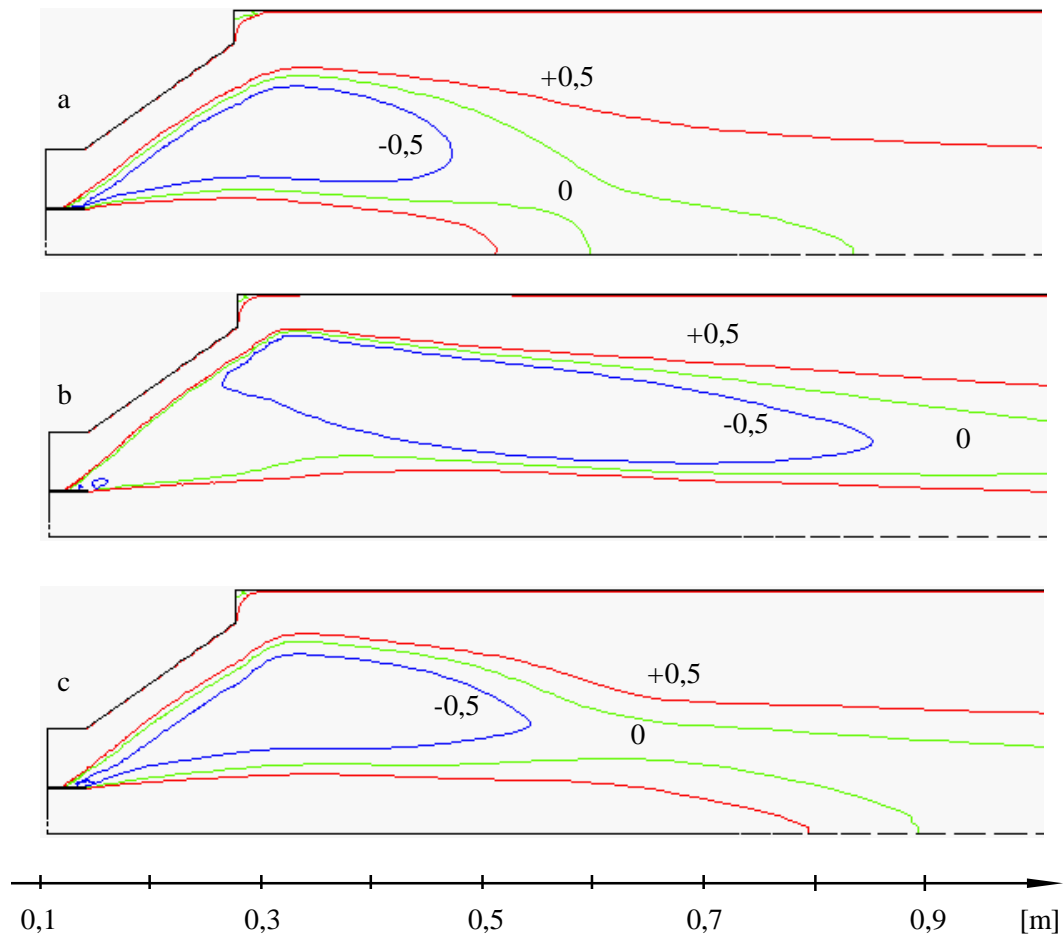
Taulukko 24. Iteraation aikana käytetyt lineaarisen alirelaksoinnin kertoimien arvot. Diskretointi QUICK-menetelmällä. RSM-malli, poltin 49.

Iteraatio	u,v	w	p	$\overline{u'v'}$	$\epsilon$	visk
5601–6000	0,15	0,15	0,3	0,2	0,2	0,2
6001–8000	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2
8001–9500	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2
9501–10000	0,12	0,12	0,3	0,2	0,2	0,2



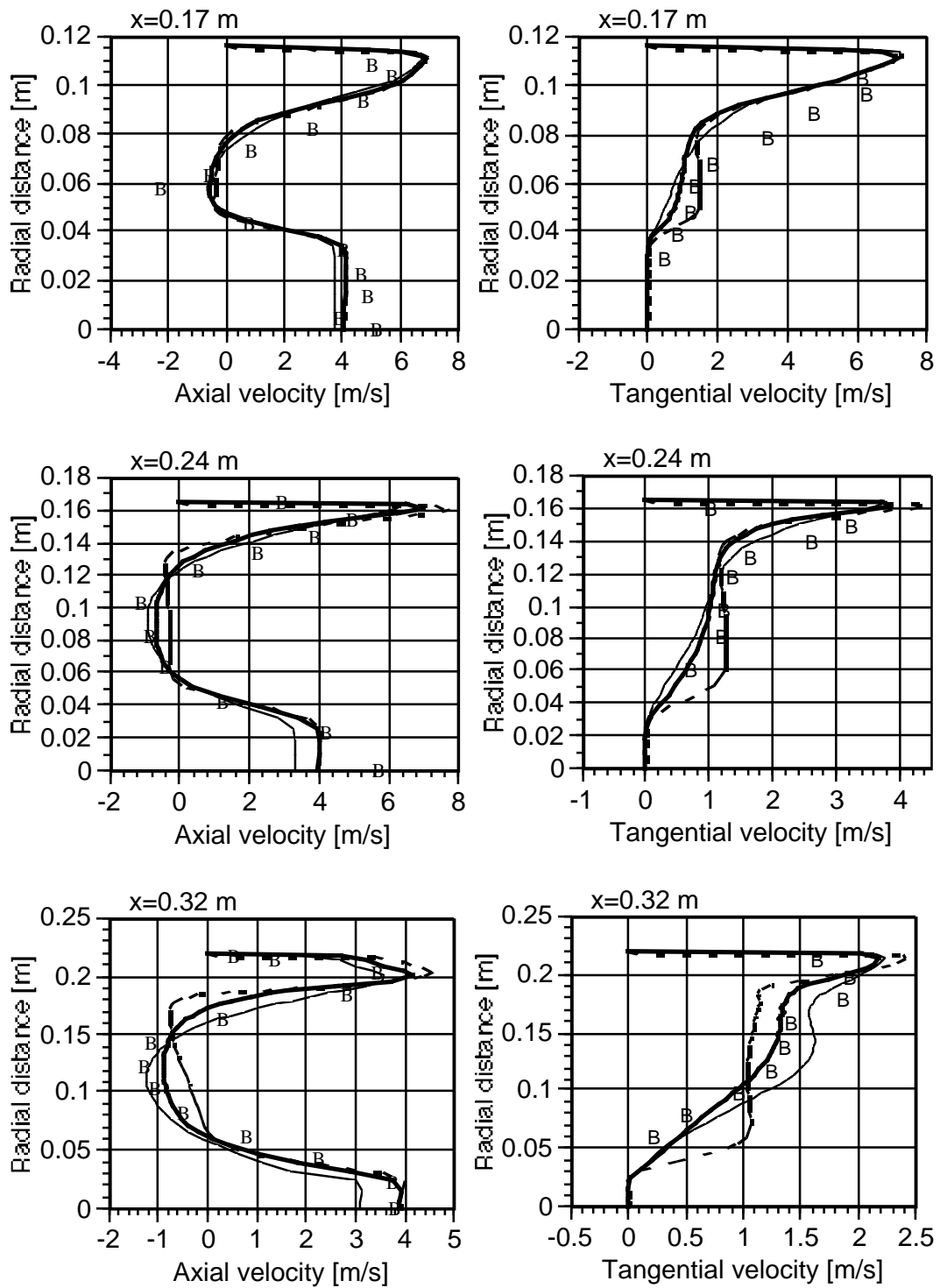
Kuva 42. Residuaalien muutos ja 10 000 iteraatiokierroksen aikana. Alkuosa kohtaan 5 600 iteraatiota on laskettu RNG-mallilla. Kohdasta 5 600 alkaen käytetään Reynoldsin jännitysmallia. RSM-malli, poltin 49.

Paluuvirtausalueen suuruus nähdään kuvasta 43, jossa esitetään aksiaalipeuden U tasa-arvokäyrät nolla sekä vertailun vuoksi arvot  $+0,5$  m/s ja  $-0,5$  m/s. Kuvia voidaan verrata liitteen 2 kuvaan 4d, jossa esitetään koetulosten perusteella piirretyt vastavat käyrät. k-e- ja RSM-malleilla lasketut paluuvirtausalueet ovat suunnilleen oikean kokoiset, joskin ne ulottuvat keskilinjalle, mitä koetuloksissa ei nähdä. RNG-malli antaa liian pitkän paluuvirtausalueen, mutta se on irti keskilinjalta kuten koetulosten mukaan esitetään.

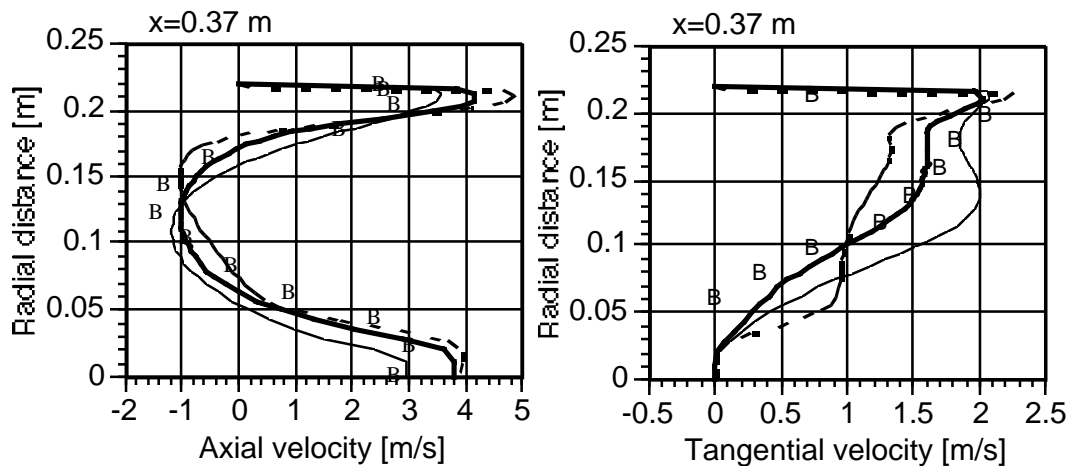


Kuva 43. Aksiaalinopeuden arvot  $-0,5$  m/s,  $0$  m/s ja  $+0,5$  m/s. a) k-e-malli, b) RNG-k-e-malli ja c) Reynoldsin jännitysmalli. Poltin 49.

Nopeusprofiilit esitetään kuvassa 44, jossa olevat mittaustulokset on otettu lähteestä [1]. Aksiaalinopeuden profiili on kaikilla malleilla lähes saman muotoinen. Ainoastaan RNG-mallin antamalla nopeusprofiililla on kohdissa  $x = 0,24$  m ja  $x = 0,32$  m hieman muista poikkeava muoto. k-e-mallin antama nopeus keskilinjalla on hieman pienempi kuin muilla malleilla. Lasketut arvot seuraavat varsin hyvin mittaustuloksia sekä profiilin muodon että ääriarvojen suhteen. Tangentiaalinopeudet kuvataan näillä malleilla samoin melko hyvin. Pitemmällä polttokammiossa k-e- ja RNG-mallien tangentiaalinopeusjakautumat poikkeavat kumpikin taholleen ( $x = 0.32$  m,  $x = 0.37$  m).

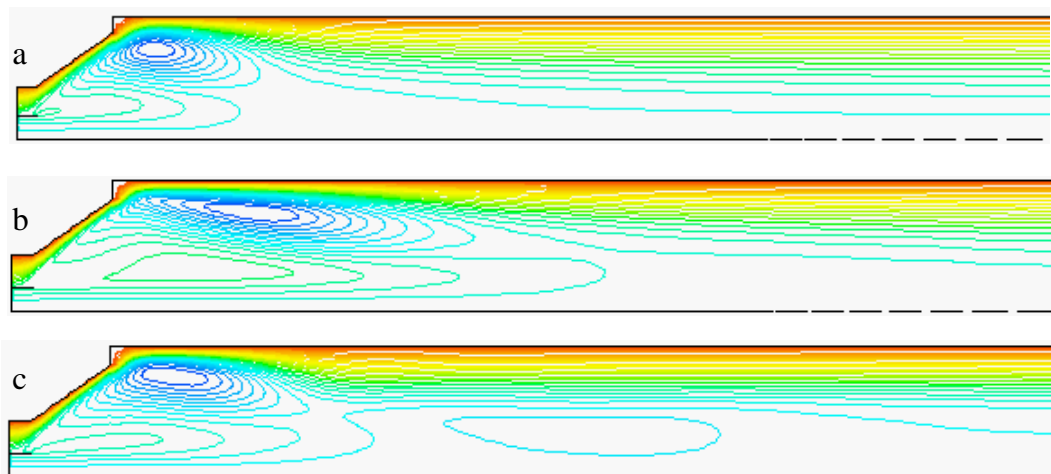


Kuva 44. Aksiaali- ja tangentialinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B), jotka ovat lähteestä [1]. Turbulenssimallit ovat  $k-\epsilon$  (—), RNG- $k-\epsilon$  (- -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (- · -). Poltin 49. (jatkuu)



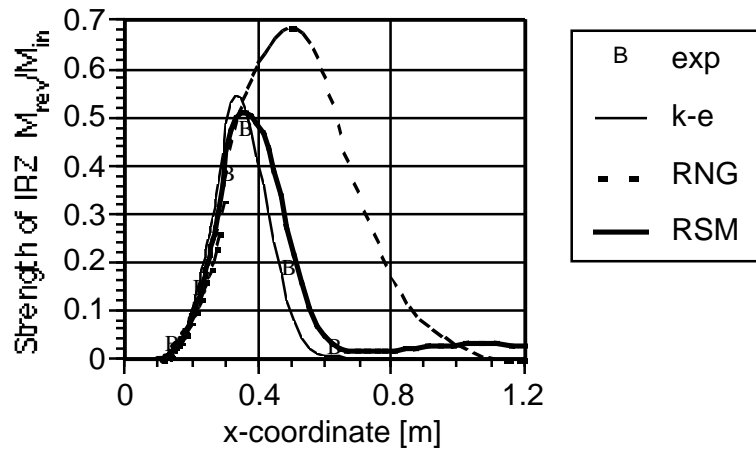
Kuva 44. Aksiaali- ja tangentiaalinopeuden jakautumat eri kohdissa polttokammiota kolmella turbulenssimallilla laskettuna. Laskettuja tuloksia verrataan mittaustuloksiin (B), jotka ovat lähteestä [1]. Turbulenssimallit ovat k-e (—), RNG-k-e (- -) ja Reynoldsin jännitysmalli (RSM) (—). Poltin 49.

Kuvassa 45 esitetään virtafunktion tasa-arvokäyrät kullakin turbulenssimallilla laskettuna. Kaikki menetelmät antavat kvalitatiivisesti samanlaisen virtauskentän. k-e-mallin antama kenttä on kohtalaisen hyvä yleisesti, mutta RNG- ja RSM-laskenta antavat paluuvirtausalueen etuosan pyörteet hieman tarkemmin. RNG-mallin pyörteen loppuosaa on liian pitkä ja RSM-malli antaa kauemmas polttokammioon toisen voimakkuudeltaan pienemmän vastakkaisuuntaisen pyörteen, jota ei näy mittaustuloksissa.



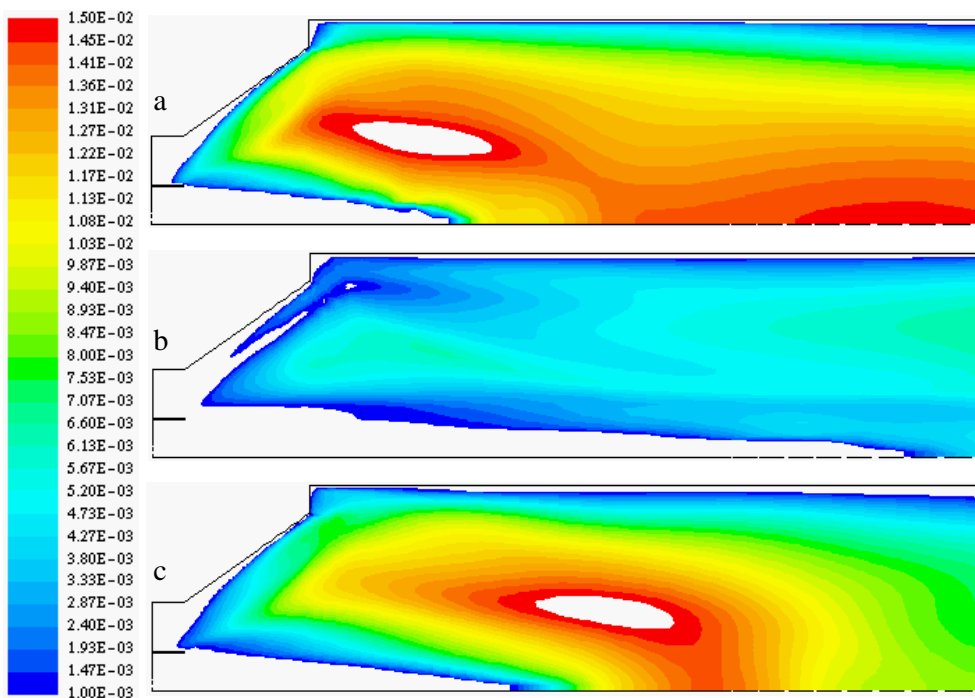
Kuva 45. Virtafunktion tasa-arvokäyrät polttimelle 49. a) k-e-malli, b) RNG-k-e-malli, c) Reynoldsin jännitysmalli.

Kuvassa 46 esitetään paluuvirtausalueen voimakkuuden jakautuma pitkin polttokammion keskilinjaa. k-e- ja RSM-mallit kuvaavat paluuvirtausalueen voimakkuuden ja paikan melko hyvin, kun taas RNG-mallin ennustama maksimivoimakkuus on liian suuri ja maksimin paikka on liian kaukana polttokammiossa.

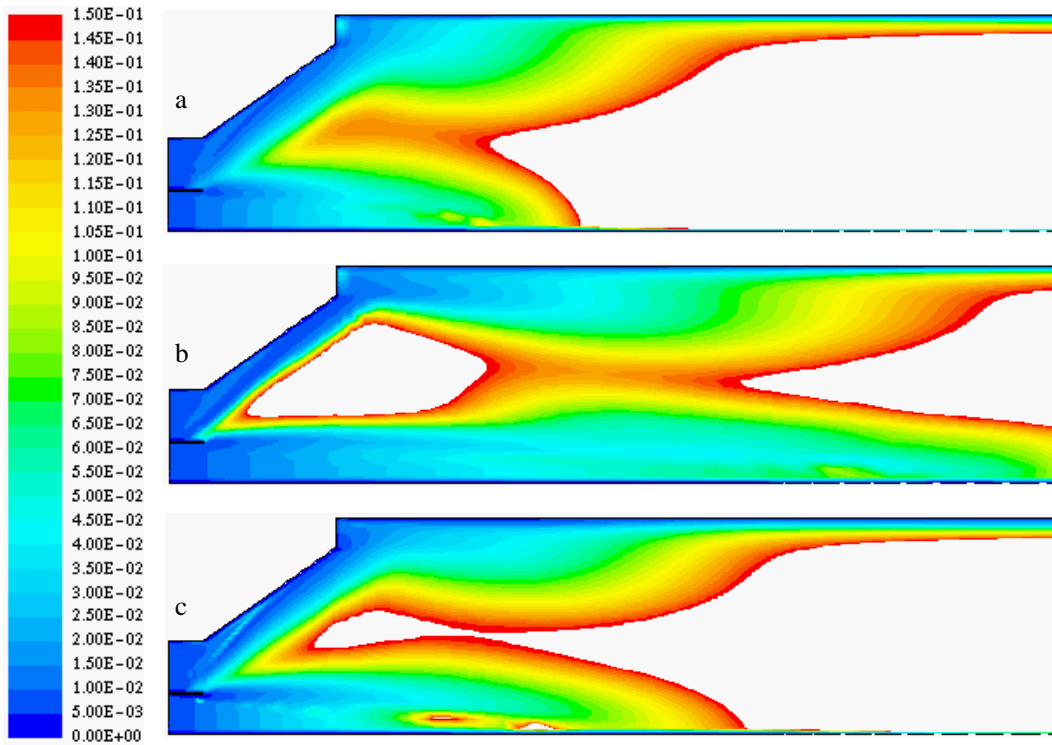


Kuva 46. Paluuvirtausalueen voimakkuus (IRZ) eri turbulenssimalleilla laskettuna. Koetulokset ovat lähteestä [1]. Poltin 49.

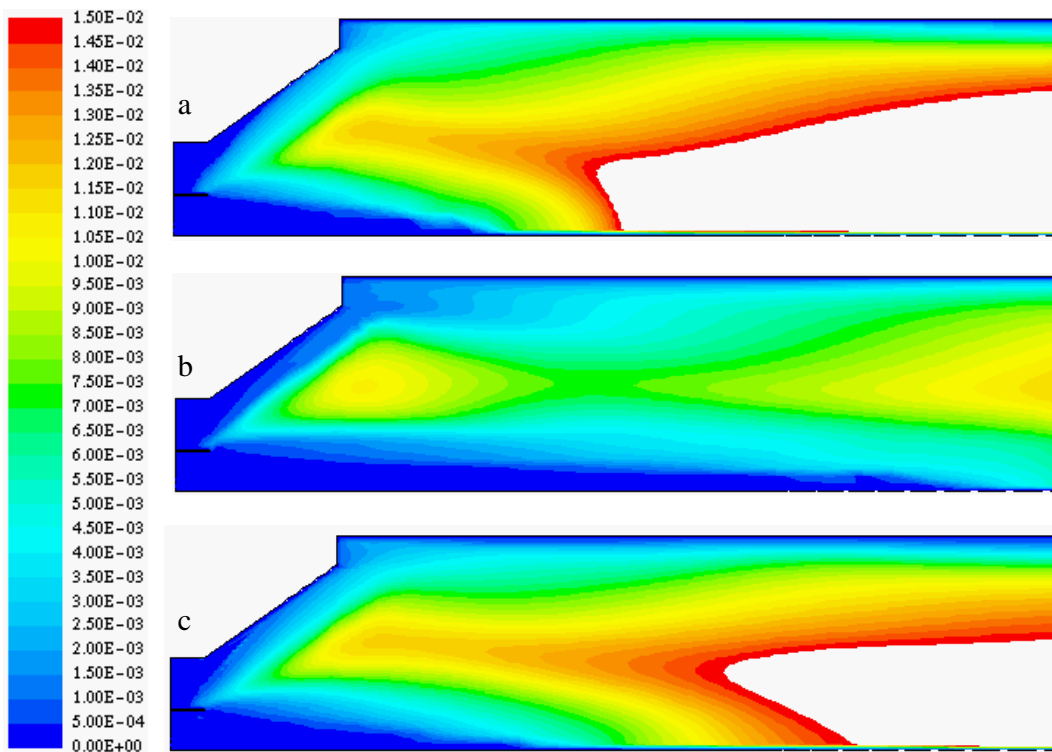
Kuvassa 47 esitetään kullakin turbulenssimallilla laskettu turbulentsin viskositeetin jakautuma. RNG-mallin antama taso on jälleen pienin sekä kentän muoto eroaa muista laskentatuloksista. k-e- ja Reynoldsin jännitysmalli antavat tasoltaan ja muodoltaan samantyyppisen kentän. Kuvissa 48 ja 49 esitetään turbulenssin aika- ja pituusskaala kullakin mallilla laskettuna. Näissä näkyy vastaavat erot kuin viskositeetin kentissä.



Kuva 47. Turbulenttinen viskositeetti eri malleilla laskettuna. Arvot on piirretty välillä  $0,001-0,015$  kg/ms. Koko alueen arvot esitetään suluissa kunkin tapauksen kohdalla. a) k-e-malli ( $5,9 \cdot 10^{-5}-1,56 \cdot 10^{-2}$ ), b) RNG-k-e-malli ( $3,1 \cdot 10^{-5}-9,2 \cdot 10^{-3}$ ), c) RSM-malli ( $4,2 \cdot 10^{-5}-1,54 \cdot 10^{-2}$ ). Poltin 49.



Kuva 48. Turbulenssin aikaskaala välillä 0–0,15 s. Koko alueen arvot ovat välillä a) 0–1,6 s k-e-malli, b) 0–1,1 s RNG-k-e-malli, c) 0–1,8 s, RSM-malli. Poltin 49.



Kuva 49. Turbulenssin pituuskaala välillä 0–0,015 m. Koko alueen arvot ovat välillä a) 0–0,027 m k-e-malli, b) 0–0,022 m RNG-k-e-malli, c) 0–0,026 m, RSM-malli. Poltin 49.

## 10 YHTEENVETO

Työssä on laskettu Fluent-ohjelmistoa käyttäen neljän muodoltaan erilaisen polttimen lähialueen virtaus- ja turbulenssikenttää. Laskentaan on käytetty kolmea eri turbulenssimallia, joiden antamia tuloksia verrataan toisiinsa.

Polttimen 7 kammion halkaisija on kohtalaisen suuri ja pyörimisluku suuri. Tässä tapauksessa mikään käytetyistä malleista ei anna edes tyydyttäväksi arvioitavaa tulosta. Menetelmät antavat keskenään erilaisia virtauskenttiä eikä mikään niistä sovi kunnolla yhteen mittaustulosten kanssa. Paluuvirtauksen voimakkuuden arviointi epäonnistuu kaikilla menetelmillä.

Polttimen 10 kammion läpimitta on suurin nyt käsiteltävistä tapauksista. Muuten reunaehdot ovat samat kuin polttimella 7. Kaikki menetelmät antavat keskenään samantyyppisen virtauskentän, joka on melko hyvin sopusoinnussa mittaustulosten kanssa. Reynoldsin jännitysmalli kuvaa parhaiten paluuvirtauspyörteen voimakkuuden ja paikan.

Polttimen 11 kammion halkaisija on sama kuin polttimella 49. Pyörimisluku on pienin näistä tapauksista. Kaikki menetelmät kuvaavat paluuvirtauksen pääpiirteissään samalla tavalla. Paluuvirtausalueen alkuosassa RNG-mallilla laskettu nopeusjakautuma sopii erinomaisesti yhteen koetulosten kanssa. Pyörteen pituus tulee tällä kuitenkin liian suureksi. k-e-malli kuvaa parhaiten paluuvirtauksen paikan ja voimakkuuden, joskin paluuvirtausnopeuden maksimiarvo keskilinjalla on liian suuri.

Polttimen 49 on ainoa, jossa on primääri-ilmaputki polttinsuuttimen keskellä. Pyörimisluku on joukon suurin. Lasketut virtauskentät ovat keskenään samantapaiset ja polttokammion alkuosalla nopeusprofiilit sopivat hyvin koetuloksiin (loppuosasta ei ole mittaustietoja). k-e- ja Reynoldsin jännitysmallit kuvaavat paluuvirtauksen voimakkuuden erittäin hyvin koetuloksia vastaavasti. RNG-malli antaa liian pitkän ja voimakkaan paluuvirtausalueen.

Polttimilla 10, 11 ja 49 tulokset ovat tyydyttäviä, joiltakin osin hyviä. Menetelmät antavat yleensä keskenään yhteensopivia tuloksia. Ainoastaan polttimelle 7 ei saatu edes tyydyttävää tulosta verrattaessa laskentaa koetuloksiin. Lisäksi eri menetelmät antoivat polttimen 7 tapauksessa keskenään hyvin erilaisia virtauskenttiä.

Verrattaessa laskettuja tapauksia IFRF:n raportissa [1] esitettyihin, voidaan suurimmaksi eroksi mainita se, että k-e-mallilla on tässä saatu huomattavasti paremmin kokeita vastaavat nopeusprofiilit kuin em. raportissa. Tähän luultavimmin vaikuttaa tiheämmän BFC-verkon käyttö suorakulmaisen sylinterikoordinaatistossa määritellyn verkon sijasta. Tämä tukee lähteessä [1] esitettyä päätelmää riittävän tiheän ja hyvin asetetun laskentaverkon vaikutuksesta ratkaisuun. Samaten lähteessä [3] todettiin, että BFC-verkolla saadaan selvästi suorakulmaista verkkoa vähemmällä laskentakoppien määrällä riittävän tiheä

verkko polttimen kartiomaiselle alueelle. Vaikka k-e-mallilla saadaankin virtauksen yleislinjat oikein, ovat nopeusprofiilien yksityiskohdissa sekä RNG-että Reynoldsin jännitysmalli yleensä parempia paluuvirtausalueen alkuosalla.

Vertailua eri mallien kesken hankaloittaa käytetty poistoaukon reunaehdon määrittely, joka tarkoituksellisesti pidettiin samana kuin lähteiden [1] ja [3] laskuissa. Käytetty OUTFLOW-reunaehto sallii sen, että ulosvirtausreunalla paine asettuu ratkaisun mukaan. Tällöin eri menetelmillä saadaan reunalle muodoltaan erilainen painejakautuma ja voidaan asettaa epäilyksen alaiseksi, onko kyseessä enää sama tehtävä. Lisäksi joissakin tapauksissa virtaus kääntyy osalta reunaa sisäänpäin, jolloin reunaehto ei ole enää hyvin määritelty. Tämä haittaa etenkin Reynoldsin jännitysmallilla laskettua virtauskenttää. Usein ulosvirtausreunaan ei ole tarvetta kiinnittää kovin suurta huomiota, koska mahdolliset häiriöt etenevät pois laskenta-alueesta virtauksen mukana. Tässä tapauksessa kuitenkin pyörivä virtauskenttä on luonteeltaan sellainen, että suurella pyörimisluvulla häiriöt etenevät ylävirran suuntaan ja saattavat vaikuttaa oleellisesti koko alueen virtaukseen. Polttimen 7 yhteydessä koetut vaikeudet saattavat johtua ainakin osittain ulosvirtauksen reunaehtojesen asettamisen epämääräisyydestä. Ulosvirtausreunaehdoton ei ole aikaisemmissa raporteissa [1] ja [3] kiinnitetty suurta huomiota.

Laskenta-aika kasvaa selvästi, joskaan ei dramaattisesti, kun siirrytään korkeamman kertaluvun diskretoinnin ja monimutkaisempien turbulenssimallien käyttöön. Reynoldsin jännitysmallin kanssa saattaa joutua työskentelemään huomattavan paljon löytääkseen sopivat iteraatioparametrit konvergoituneen tuloksen saamiseksi. Korkeamman kertaluvun diskretointimenetelmistä toisen kertaluvun upwind osoittautui selvästi stabiilimmaksi kuin QUICK, vaikka jälkimmäistä pyrittiin käyttämään samoin kuin lähteen [1] laskennassa oli tehty.

Joissakin tapauksissa RNG-k-e-malli kuvaa virtauskentän selvästi tavallista k-e-mallia paremmin. Tangentiaalinopeuden jakautuma on useimmiten selvästi parempi. RNG-mallia ei kuitenkaan tämän perusteella voi pitää suoraviivaisena parannuksena tavalliseen k-e-malliin verrattuna. Jostain syystä RNG-mallin antama turbulenssin viskositeetin taso on selvästi alhaisempi kuin muilla malleilla. Mahdollisesti tämän takia mallin laskema paluuvirtausalue on säännönmukaisesti liian pitkä.

Reynoldsin jännitysmallin käyttö ei ole yhtä suoraviivaisen yksinkertaista kuin kaksiyhtälömallien käyttö. Konvergoituneen tuloksen saaminen on työläämpää. Lisäksi lopputulos ei ainakaan tämän kokeilun perusteella aina ole välttämättä parempi. Tässä vertailua kuitenkin haittaa edellä mainittu reunaehdon epämääräinen asettelu, joka vaikuttaa eniten Reynoldsin jännitysmallilla tehtyihin laskuihin. Ainakin osa konvergenssiongelmissa johtuneen ulosmenoreunan huonosti sopivasta reunaehdosta.

Yleinen virtauskuvio on kolmella polttimella hyvä tai kohtalainen kaikilla malleilla. Yhden polttimen kohdalla kaikki mallit epäonnistuivat. Yhtä selkeää eroa eri menetelmien välillä ei havaittu kuin IFRF:n aikanaan laskemissa



tapauksissa, joissa k-e-mallilla saatiin selvästi huonoin tulos. On kuitenkin huomattava, että tässä on laskettu vain neljä erilaista geometriaa, kun IFRF:n raportissa niitä oli 15.

Aikaisemmissa IFRF:n laskentatuloksissa [1] todettiin päätelmänä, että kertoimen  $R_f/A$  ollessa pienempi kuin 3 on turbulenssimallin valinta vähemmän kriittistä. Samaten heidän päätelmänsä oli, että on oleellista käyttää epäisotrooppista turbulenssimallia etenkin parametrin  $R_f/A$  ollessa suuri. Nyt lasketut tulokset ovat osittain ristiriidassa tämän kanssa. Polttimella 7, jossa parametri on 3,36, kaikilla turbulenssimalleilla lasketut tulokset olivat huonoja. Polttimella 10, jossa parametri on 5,05, kaikilla menetelmillä saatiin aksiaalinopeuden arvot hyvin takaisinvirtausalueen alkupuolelta, josta on olemassa mittaustuloksia. Tämä saattaisi viitata pikemminkin laskentaverkon kuin turbulenssimallin valinnan merkitykseen.

## 11 LÄHDELUETTELO

1. Visser, M., Boysan, F. & Weber, R. Computations of isothermal swirling vortices in the near burner zone. Report on the MMF 1–1 investigation. Research Report F 336/a/9. International Flame Research Foundation. IJmuiden, June 1987. 30 s. + liitteitä n. 90 s.
2. Schmid, C., Bortz, S. & Weber, R. Further experimental studies on isothermal, expanding swirling flows with application to swirl burner design. Results on the NFA 2–2 investigations. Research Report F 259/a/4. International Flame Research Foundation. IJmuiden, September 1987. 18 s. liitteitä n. 40 s.
3. Breussin, F., Peters, A. A. F. & Weber, R. Assessment of k-e, RNG-k-e, ASM and RSM turbulence models. Mathematical modelling of a highly confined swirling flow. IFRF Doc No G00/y/5. International Flame Research Foundation. IJmuiden, September 1994. 17 s. liitteitä 31 s.
4. Huhtanen, R. Turbulenttisen virtauksen perusyhtälöt. Teknillinen korkeakoulu, Tietotekniikan osasto, Mekaniikan laboratorio 1992 | 32, Otaniemi 1992. 32 s. liitteet 9 s.
5. Fluent User's Guide. Volumes 1–4. Version 4.3, March 1995. Fluent Inc. Lebanon, New Hampshire 1995.
6. Ahlstedt, H. Evaluation of three turbulence models in the prediction of confined swirling flow field. Tampere University of Technology, Energy and Process Engineering. Report 117. Tampere 1996. 69 s.

## REUNAEHDOT

Alla olevissa taulukoissa annetaan kunkin tapauksen laskemisessa käytetyt reunaehdot. Sisään tulevalle virtaukselle määritellään  $k$ - $\varepsilon$ - ja RNG- $k$ - $\varepsilon$ -malleille aksiaali- ja tangentiaalinopeudet ( $U$  ja  $W$ ) sekä turbulenssin kineettinen energia  $k$  ja vaimeneminen  $\varepsilon$  poltinaukossa säteen  $r$  funktiona. Reynoldsin jännityksille asetetaan arvot kaikille kuudelle komponentille. Reunaehdot saadaan lähteestä [1].

Reunaehdot esitetään joko vakioarvona tai määritellään paloittain lineaarisesti.

Tapauksissa 7 ja 10 laskentaverkko alkaa kohdasta  $x = 0,0$  m ja reunaehdoja sovelletaan tässä kohdassa. Tapauksissa 11 ja 49 laskenta aloitetaan vasta kohdasta  $x = 0,105$  m, jossa kokeissa on ollut ensimmäinen mittauslinja. Etäisyyden referoinnissa käytetään alkuperäistä origoa aivan kuten tapauksissa 7 ja 10.

## TAPPAUS 7

Tapauksen 7 laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,0$  m. Sovellettavat reunaehdot esitetään taulukossa 1.

*Taulukko 1. Tapaukseen 7 sovellettavat sisäänvirtausnopeuden ja turbulenssisuureiden reunaehdot.*

$r$ [m]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$k$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
0	5	0	0,1	0,75
0,095	5	13	0,1	0,75

Reynoldsin jännityksille asetetaan  $\overline{u'u'} = \overline{v'v'} = \overline{w'w'} = \frac{2}{3} k$  .

## TAPAUS 10

Tapauksen 10 laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,0$  m Sovellettava reunehdot esitetään taulukossa 2.

*Taulukko 2. Tapaukseen 10 sovellettavat virtausnopeuden ja turbulenssi-suureiden reunehdot.*

$r$ [m]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$k$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
0	5	0	0,1	1,8
0,095	5	11	0,1	1,8

Reynoldsin jännityksille asetetaan  $\overline{u'u'} = \overline{v'v'} = \overline{w'w'} = \frac{2}{3} k$  .

## TAPAUS 11

Tapauksen 11 laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,105$  m. Tämän tapauksen reunaehdot saadaan lähteestä [2]. Lähteessä [1] olevat tiedot eroavat näistä ainakin turbulenssin vaimenemisen osalta. Taulukossa 3 esitetään  $k$ - $\varepsilon$ - ja RNG- $k$ - $\varepsilon$ -mallin tarvitsemat reunaehdot.

*Taulukko 3. Tapaukseen 11 sovellettavat virtausnopeuden ja turbulenssi-suureiden reunehdot.*

$r$ [m]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$k$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
0	4,4554	0,0	0,0445	0,232
0,012	–	–	0,081	0,5696
0,084	–	–	0,154	1,506
0,09	5,0	7,1	–	–
0,093	–	–	1,961	67,85
0,095	0,0	0,0	0,0	0,0

Reynoldsin jännityksille saadaan lähteestä [2] jakautumat, jotka esitetään taulukossa 4.

*Taulukko 4. Reynoldsin jännitysten reunehdot tapauksessa 11.*

$r$ [m]	$\overline{u'u'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\overline{v'v'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\overline{w'w'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
0	0,0	0,0	0,0
0,00393	0,0592	0,0359	0,0304
0,0786	0,1	0,13	0,0993
0,094	0,661	0,696	0,663
0,095	0,0	0,0	0,0

$r$ [m]	$\overline{u'v'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
0	0,0
0,00786	-0,0021
0,00825	-0,0029
0,0904	0,0736
0,095	0,0

$r$ [m]	$\overline{v'w'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
0	0,0
0,00393	0,0719
0,0746	0,109
0,0864	0,13
0,095	0,0

Reynoldsin jännitykselle  $\overline{u'w'}$  asetetaan vakioarvo nolla koko reunalla.

Muita sisäänvirtauksen arvoja [2]:

Tiheys  $\rho = 1,17089 \text{ kg/m}^3$ . Viskositeetti  $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$

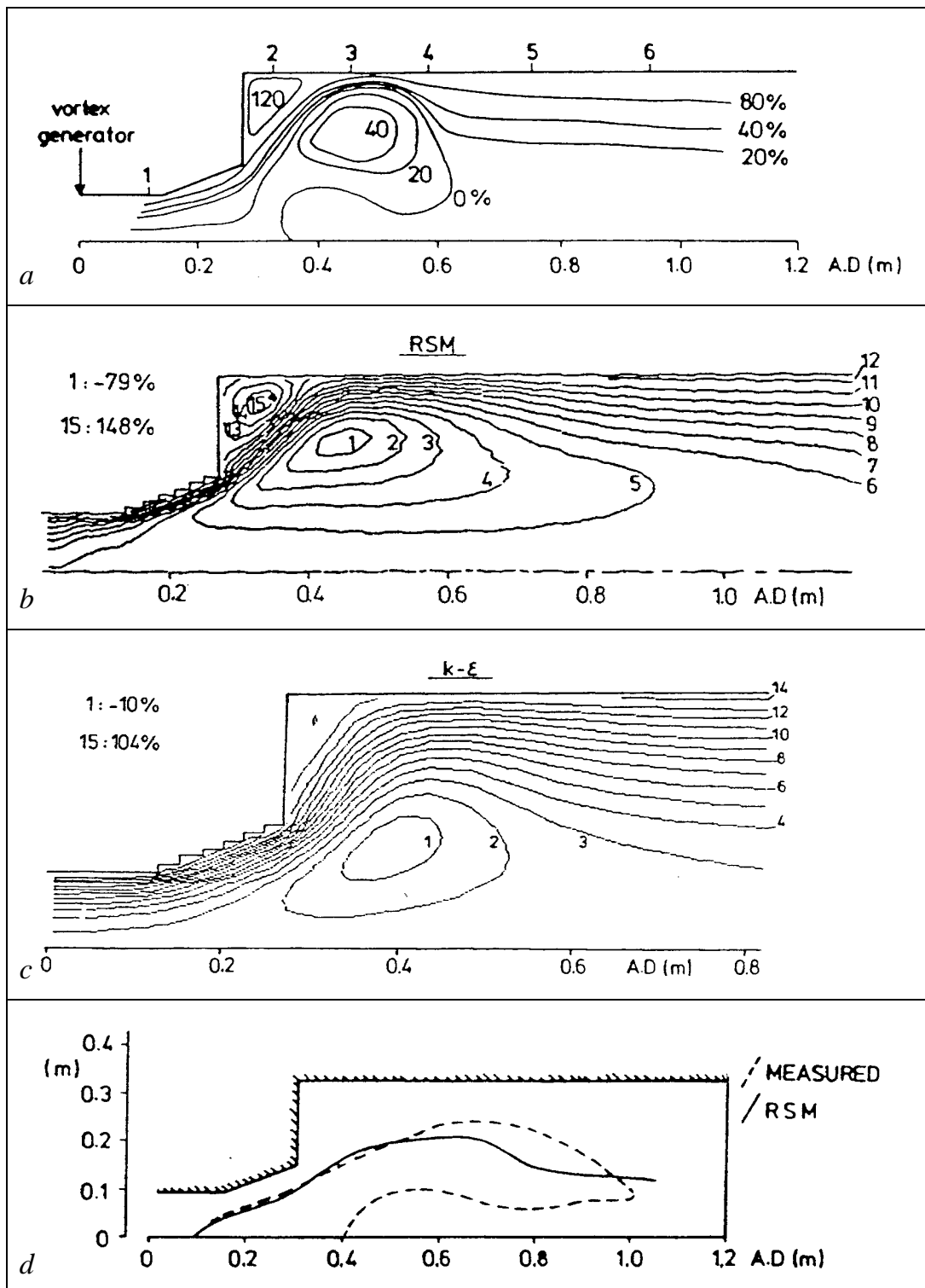
#### TAPAUS 49

Tapauksen 49 laskenta aloitetaan kohdasta  $x = 0,105 \text{ m}$ . Taulukossa 5 esitetään käytetyt reunehdot.

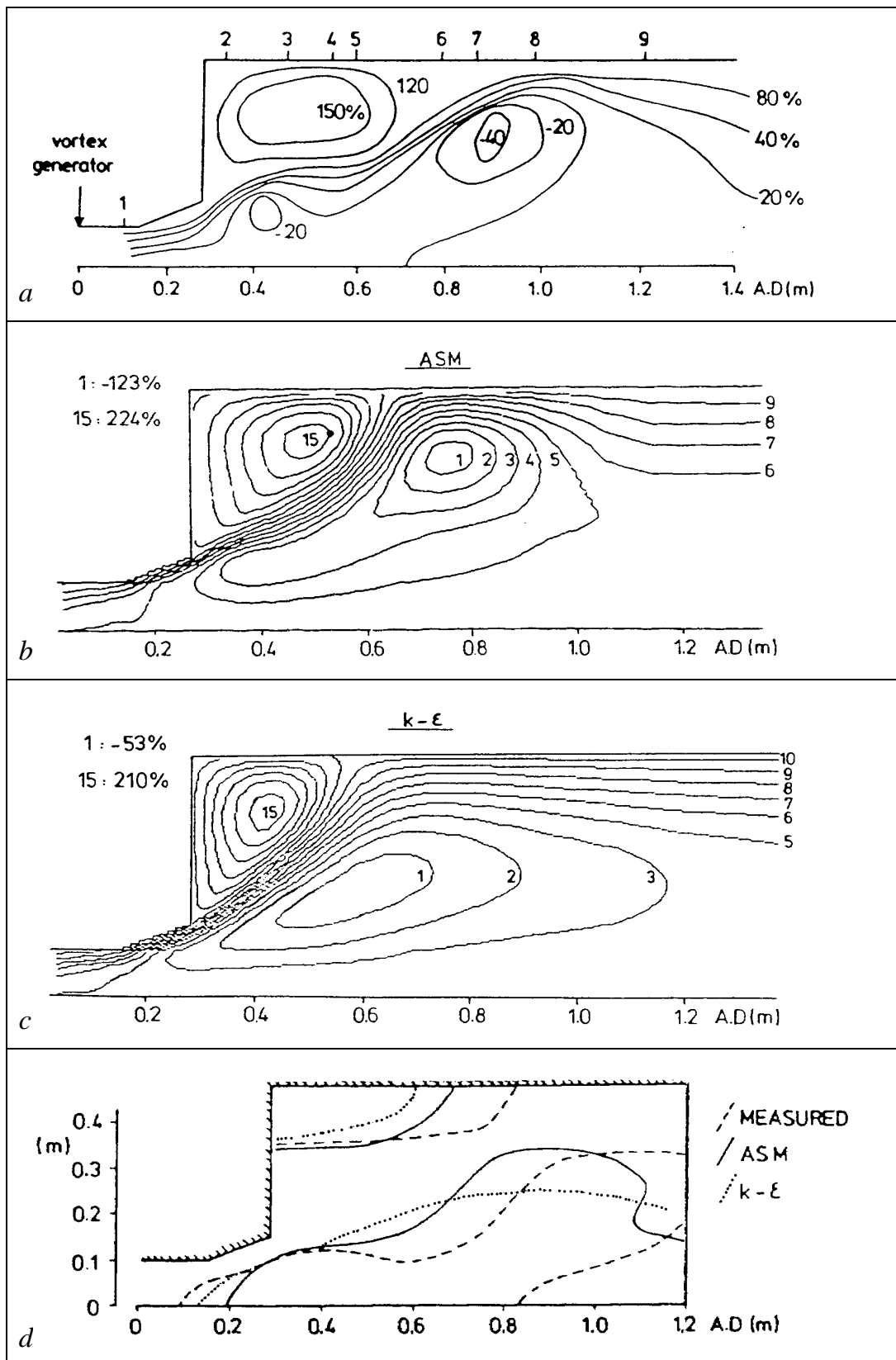
*Taulukko 5. Tapauksen 49 laskennassa käytetyt virtausnopeuden ja turbulenssin reunehdot.*

$r \text{ [m]}$	$U \text{ [m/s]}$	$W \text{ [m/s]}$	$k \text{ [m}^2\text{/s}^2\text{]}$	$\varepsilon \text{ [m}^2\text{/s}^3\text{]}$
0	4	0	0,1	19
0,04	4	0	0,1	19
0,04-0,042	väliseinä			
0,042	2,6	4,3	0,1	19
0,05	3,6	5,8	–	–
0,06	4,4	7,4	–	–
0,07	4,6	8,4	–	–
0,08	4,4	9,1	–	–
0,09	4,1	9,5	–	–
0,095	5	9,6	0,1	19

Reynoldsin jännityksille asetetaan  $\overline{u'u'} = \overline{v'v'} = \overline{w'w'} = \frac{2}{3} k$ .

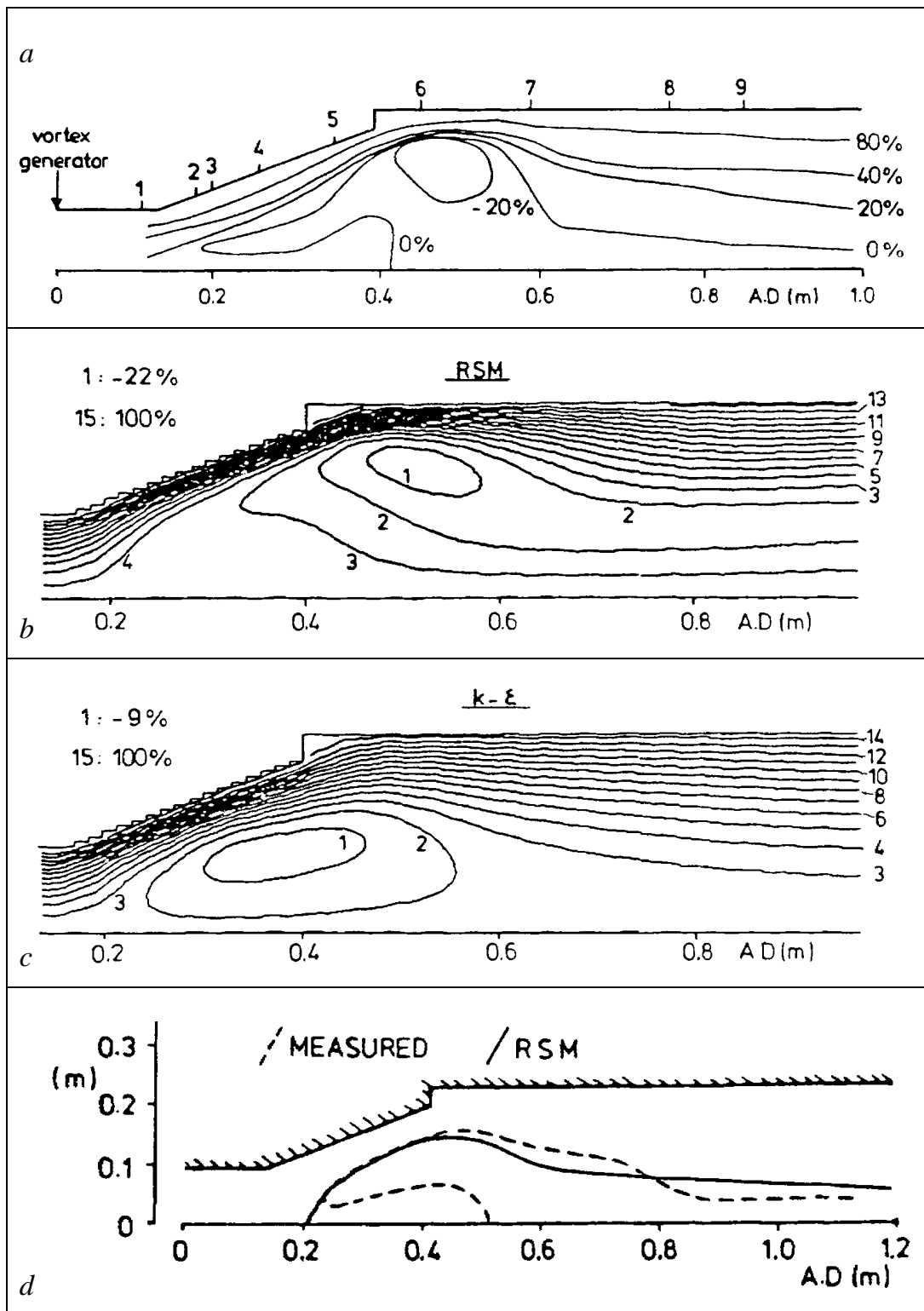


**Kuva 1.** a) Mittaustietojen perusteella piirretty, b) Reynoldsin jännitysmallilla laskettu sekä c) k-ε-mallilla laskettu virtaviivakuvio. d) Aksiaalinopeuden  $U = 0 \text{ m/s}$  tasa-arvokäyrät. Tapaus 7 lähteen [1] mukaan.

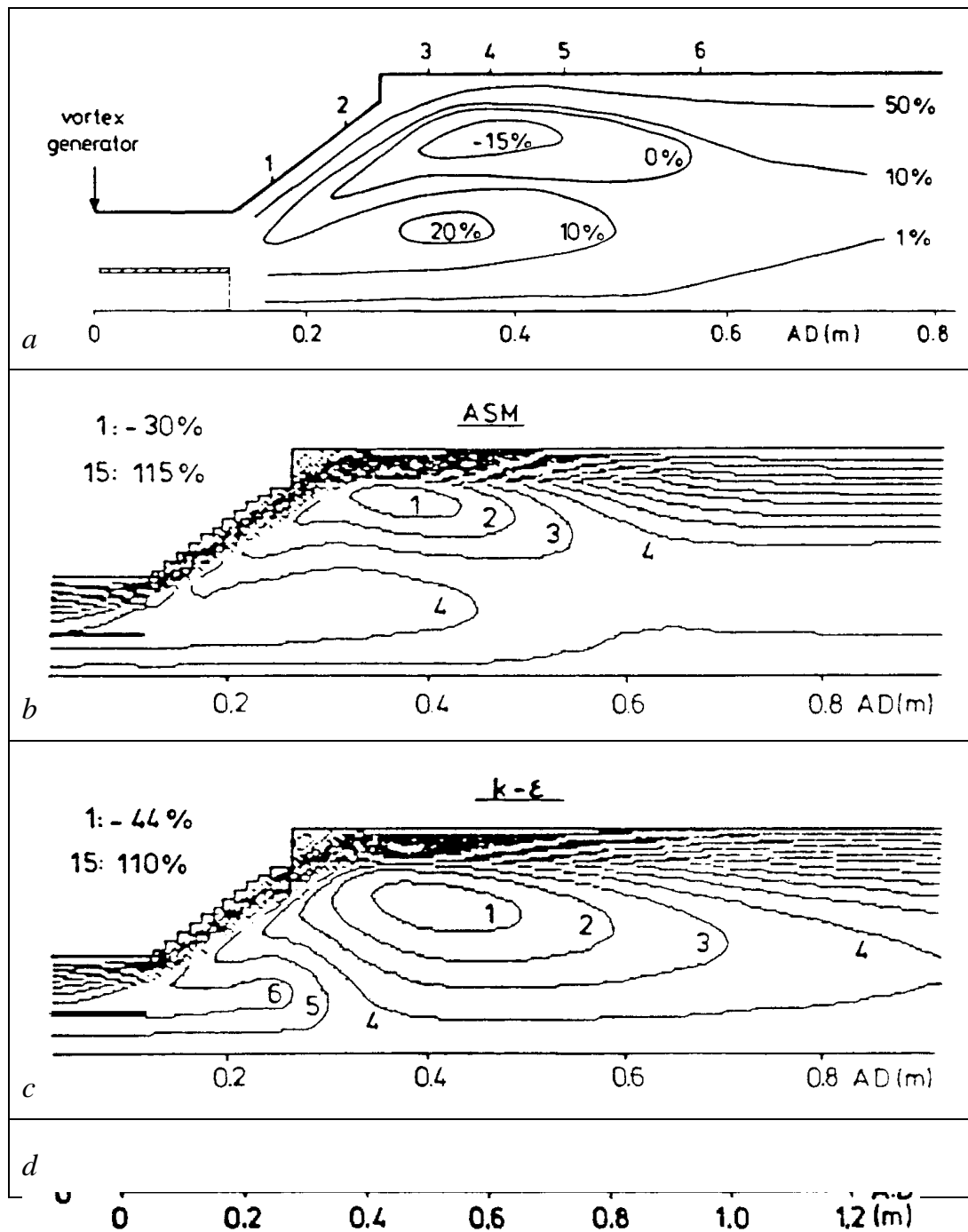


**Kuva 2.** a) Mittaustietojen perusteella piirretty, b) algebrallisella Reynoldsin jännitysmallilla laskettu sekä c)  $k-\epsilon$ -mallilla laskettu virtaviivakuvio. d) Aksiaalinopeuden  $U = 0$  m/s tasa-arvokäyrät. Tapaus 10 lähteen [1] mukaan.





**Kuva 3.** a) Mittaustietojen perusteella piirretty, b) Reynoldsin jännitysmallilla laskettu sekä c)  $k-\epsilon$ -mallilla laskettu virtaviivakuvio. d) Aksiaalinopeuden  $U = 0$  m/s tasa-arvokäyrät. Tapaus 11 lähteen [1] mukaan.



**Figure 1**

**Kuva 4.** a) Mittaustietojen perusteella piirretty, b) algebrallisella Reynoldsin jännitysmallilla laskettu sekä c) k-ε-mallilla laskettu virtaviivakuvio. d) Aksiaalinopeuden  $U = 0$  m/s tasa-arvokäyrät. Tapaus 49 lähteen [1] mukaan.

---

**LIITTEIDEN 1 JA 2 LÄHDELUETTELO**

- 1 Visser, M., Boysan, F. & Weber, R. Computations of isothermal swirling vortices in the near burner zone. Report on the MMF 1-1 investigation. Research Report F 336/a/9. International Flame Research Foundation. IJmuiden, June 1987. 30 s. + liitteitä n. 90 s.
- 2 Breussin, F., Peters, A. A. F. & Weber, R. Assessment of k- $\epsilon$ , RNG-k- $\epsilon$ , ASM and RSM turbulence models. Mathematical modelling of a highly confined swirling flow. IFRF Doc No G00/y/5. International Flame Research Foundation. IJmuiden, September 1994. 17 s. liitteitä 31 s.