

Modellering van stromingen in de vuurhaard van een centrale-ketel

Citation for published version (APA):

Muiters, P. M. G. A., & Lamers, A. P. G. G. (1991). Modellering van stromingen in de vuurhaard van een centrale-ketel. *I2-Procestechnologie*, (1), 40-43.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Modellering van stromingen in de vuurhaard van een centrale-ketel

De temperatuurverdeling en het stromingspatroon in de vuurhaard van een centraleketel worden bepaald door een aantal ontwerp- (geometrie van de vuurhaard) en bedrijfsparameters (brandstofsamenstelling). De vuurhaard is ontworpen voor gas, poederkool, of olieverbranding. De compartimenten voor de toevoer van brandstof en verbrandingslucht bevinden zich in zogenaamde branderkasten. Zowel de plaats als de uitvoering van de branderkasten zijn ontwerpparameters. De ingaande massastromen en de toevoersnelheden van de verschillende brandstoffen en lucht, plus de verdeling ervan over de compartimenten van de branderkast, zijn typische bedrijfsparameters. De samenstelling en de korrelgrootteverdeling van het toegevoerde poederkool zijn ook bedrijfsparameters.

De vuurhaard van een centraleketel wordt vaak uitgevoerd met in de hoeken geplaatste branders. Brandstof en lucht worden in de vuurhaard geblazen volgens de raaklijn aan een denkbeeldige cilinder in het midden van de vuurhaard. Men spreekt daarom dan ook vaak van tangenciaal gestookte ketels (fi-

P. MUIJTERS EN A. LAMERS

Ir. P.M.G.A. Muijters is afgestudeerd aan de Faculteit der Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Momenteel is hij werkzaam als projectleider bij Vekoma te Vlodingen.



Ir. A.P.G.G. Lamers is als universitair docent verbonden aan de Faculteit der Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Hij houdt zich bezig met numerieke stromingsleerberekeningen, in het bijzonder met de modellering van turbulente verbranding.



Om een optimale verbranding in een ketel te kunnen bewerkstelligen is het nodig om meer te weten te komen over de stromingen in de vuurhaard.

Teneinde deze nauwkeurig te kunnen berekenen moeten de rekenresultaten geverifieerd kunnen worden. Voor dit doel zijn een schaalmodel en een rekenmodel ontwikkeld. Een verslag van de voorlopige resultaten.

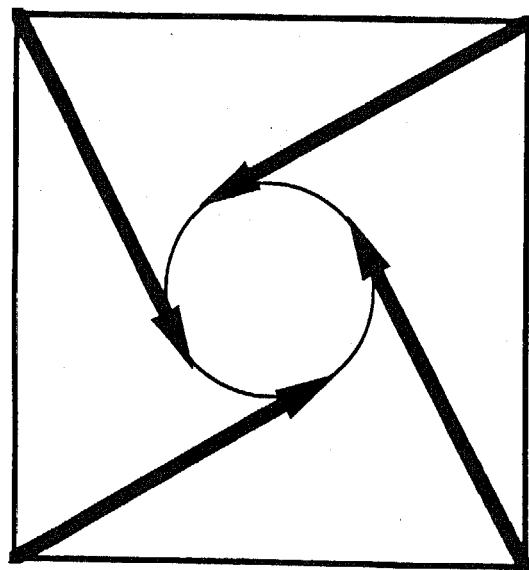


Fig. 1.
Tangenciale stookwijze

guur 1). De stroming wordt gekenmerkt door een hoge turbulentiegraad, zodat een goede menging van brandstof en lucht plaatsvindt. De verbranding verloopt in een spiraalvormige beweging, zodat er een grote warmteafgifte naar de wanden met de verdamperspijpen wordt bereikt. Een voorbeeld van een dergelijke ketel is de centrale-ketel "Waalhaven" in Rotterdam, gebouwd door Koninklijke Maatschappij "de Schelde" te Vlissingen. Zo'n vuurhaard heeft een hoogte van ongeveer 30 m en een dwarsdoorsnede van 10 m bij 11 m (figuur 2). Voor een goed ontwerp van een vuurhaard en een optimale bedrijfsvoering is inzicht in de sa-

menhang tussen bovengenoemde parameters en de invloed ervan op het stromingspatroon van groot belang. Een af en toe geconstateerde asymmetrische temperatuurverdeling van de rookgassen aan de uitree van de vuurhaard van de centrale ketel "Waalhaven" vormde de aanleiding tot het ontwikkelen van een rekenmodel en het bouwen van een schaalmodel.

Berekeningen aan dergelijke vuurhaarden zijn beperkt vanwege het aantal roosterpunten dat nodig is, om details van de stromingsverschijnselen te kunnen berekenen. Tot op heden worden er alleen op zeer be-

perkte schaal stromingsberekeningen uitgevoerd waarbij turbulente verbranding van poederkool in het rekenmodel is meegenomen. Turbulentie, stralingsuitwisseling, verbranding van gas en kooldeeltjes en de interactie tussen turbulentie en verbranding zijn fysische verschijnselen die mathematisch beschreven moeten worden. De interactie tussen de modellen voor de verschillende fysische verschijnselen maakt de berekeningen erg complex. Dit vormt een tweede beperking voor dit soort berekeningen. Een punt dat we niet uit het oog mogen verliezen is het geldigheids-gebied van elk model. Het $k - \epsilon$ model beperkt zich tot isotrope turbulentie en stromingen met hoge Reynolds waarden. Dit model bestaat uit twee transportvergelijkingen, namelijk één voor de turbulente kinetische energie k en één voor de energie dissipatie ϵ plus een relatie voor de turbulente viscositeit η_t als functie van deze twee variabelen. Uit de literatuur is bekend, dat het $k - \epsilon$ model stromingen met een sterke swirl minder goed beschrijft. Om te controleren of het $k - \epsilon$ model voor roterende stromingen in de tangentiaal gestookte vuurhaard voldoet, zijn experimentele gegevens nodig. Voor dit doel is een isotherm schaalmodel gebouwd. Een vergelijking tussen meet- en rekenresultaten zal uitsluitend moeten geven of het $k - \epsilon$ model voor dit type stromingen voldoet. Pas als de vergelijking positief uitvalt, is het zinvol de noodzakelijke andere modellen stapsgewijs aan het isotherme rekenmodel te koppelen.

Het schaalmodel

Verificatie met behulp van een schaalmodel is slechts verantwoord als de geometrie en de stromingseigenschappen niet veranderen ten gevolge van de opschaling. De schalingsprocedure is lastig, omdat niet-isotherme processen gesimuleerd moeten worden in een isotherm schaalmodel met slechts één medium. In de werkelijke vuurhaard zijn twee dichtheden te onderscheiden, namelijk de dichtheid van het brandstof/luicht mengsel bij een gemiddelde temperatuur van ± 800 K (ρ_r) en de dichtheid van de verbrandingsgassen bij een temperatuur van ± 1500 K (ρ_g). De Thring-Newby methode [1] wordt gebruikt om het verbrandingsproces weer te geven in een systeem dat bestaat uit alleen de verbrandingsgassen met dichtheid ρ_g . Een gevolg hiervan is een correctie van de doorsnede van de branderpoorten volgens:

$$A_{Th} = \frac{\rho_r}{\rho_g} A_R \tag{1}$$

Hierin stelt A_r het uittreepoppervlak van de branders en A_{Th} het gecorrigeerde oppervlak volgens de Thring-Newby methode voor. Vergelijking (1) geeft fysisch weer, dat er reeds verbranding heeft plaatsgevonden voordat het brandstof/luicht mengsel

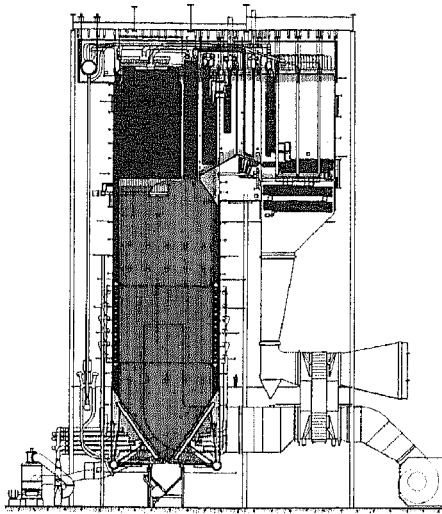


Fig. 2. Zijaanzicht van een tangentiaal gestookte centrale ketel

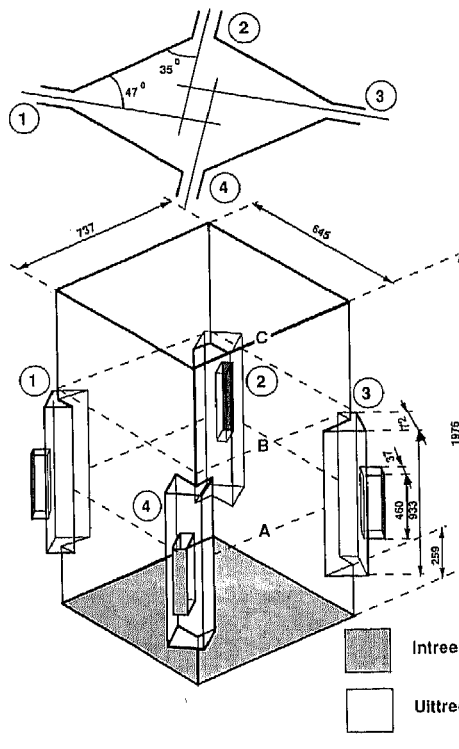
met dichtheid ρ_r de branderpoort verlaat. Anders gezegd: de rookgassen met dichtheid ρ_g verlaten de branderpoorten.

Het nadeel van de Thring-Newby methode is, dat er in de omgeving van de branderpoorten geen kinematische overeenkomst meer bestaat. Dit probleem kan worden ondervangen door de branderpoorten stroomopwaarts te verplaatsen en het uitstroomoppervlak te verkleinen. Bij beide correcties speelt de dichtheidsverhouding ρ_r/ρ_g een rol [3]. Als gevolg van de verkleining van het uitstroomoppervlak zal de totale toegevoerde massastroom te klein worden. Dit tekort kan worden gecompenseerd met een extra massastroom die toegevoerd wordt door de bodem [2].

In de derde stap van de schalingsprocedure worden alle afmetingen met een geometrische schaalfactor verkleind. Daarna worden de verbrandingsgassen met dichtheid ρ_g vervangen door lucht bij omgevingstemperatuur (ρ_a). Omdat de intreesnelheden (70 m/s) voor een praktisch bruikbaar schaalmodel te hoog zijn, worden deze in de laatste fase van het schalen verkleind met een kinematische schaalfactor van 2. Voor waarden van Reynolds groter dan 10000 zijn de optredende stromingspatronen en mengprocessen geen functie meer van Reynolds. De laatste stappen van de schalingsprocedure zijn daarom alleen toegestaan als het Reynolds getal in het schaalmodel groter is dan 10000. De optimale geometrische schaalfactor blijkt nu 15 te zijn.

Fig. 3. Perspectief-tekening van het schaalmodel met de vlakken ten behoeve van de verificatiemetingen (A, B en C) en schematische branderhoekinstelling. (Alle afmetingen zijn in mm).

De brandtoevoersnelheid bedraagt in de werkelijke vuurhaard ca. 69 m/s zodat, met een kinematische schaalfactor van 2, de luichttoevoersnelheid in het schaalmodel circa 34,5 m/s wordt. De toevoersnelheid van de extra luicht aan de onderzijde van het schaalmodel bedraagt 1.05 m/s. De volumestroom luicht per branderpoort en de extra volumestroom luicht aan de onderzijde van het schaalmodel zijn dan 0.596 respectievelijk 0.499 m³/s. De afmetingen van de werkelijke vuurhaard en het schaalmodel (1:15) worden weergegeven in tabel 1. De waarden van de dichtheden van het brandstof/luicht mengsel ρ_r , de verbrandingsgassen ρ_g en voor luicht bij omgevingstemperatuur ρ_a zijn achtereenvolgens: 0.43, 0.22 resp. 1.2 kg/m³. In figuur 3 wordt het schaalmodel in een perspectivische tekening weergegeven. De branderhoeken zijn schematisch weergegeven in het bovenste deel van figuur 3. Voor de branders 1 en 3 bedraagt de branderhoekinstelling 47° en voor de beide andere branders 35°. De geometrie van de astrog van de werkelijke vuurhaard is niet in het schaalmodel opgenomen. Verder zijn in figuur 3 drie vlakken aangegeven, waarin snelheidscomponenten met hittedraad-sensoren gemeten zullen worden. Vlak A bevindt zich ter hoogte van de branderuittree, vlak B boven de branders en vlak C ter hoogte van de uittree van de vuurhaard. In elk vlak worden, in een rooster van 7*7 meetpunten, de drie



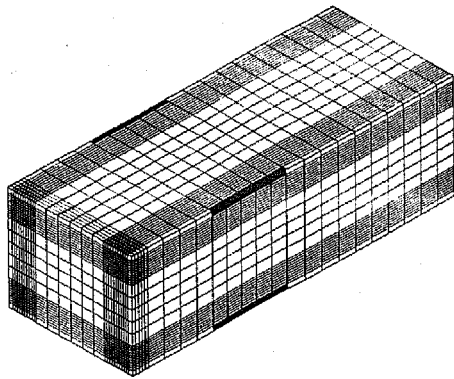


Fig. 4. Het gebruikte rekenrooster (28*27*24) waarbij de branderpoorten zijn aangegeven

tijdgemiddelde snelheidscomponenten en bijbehorende fluctuaties gemeten. Bovendien zal het intreesnelheidsprofiel per branderpoort en van de extra intree aan de onderzijde gemeten worden.

Mathematisch model

De tijdgemiddelde behoudsvergelijkingen voor massa en impuls worden in drie dimensies opgelost. De tijdgemiddelde stationaire behoudsvergelijkingen zijn in onderstaande algemene vorm te schrijven:

$$\frac{\delta(u_i \phi)}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} (\Gamma_\phi \frac{\delta \phi}{\delta x_i}) + S_\phi \quad (2)$$

Hierin is i de coördinaatrichting, u_i de tijdgemiddelde snelheidscomponent in de richting i en ϕ de algemene variabele. De variabelen Γ_ϕ en S_ϕ zijn de uitwisselingscoëfficiënt respectievelijk de bronterm behorende bij de algemene variabele ϕ . De tijdgemiddelde impulsvergelijkingen worden "gesloten" met de behoudsvergelijkingen voor turbulente kinetische energie (k) en energie dissipatie (ϵ). De k - en ϵ -vergelijkingen kunnen op analoge wijze in de vorm van de algemene behoudsvergelijking worden geschreven. Voor de verschillende variabelen ϕ zijn

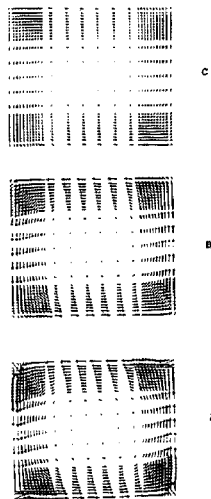


Fig. 5. De berekende horizontale snelheidscomponenten (m/s) in de doorsneden A, B en C

Tabel 1. Belangrijkste afmetingen van vuurhaard en schaalmodel (beide in meters)

Afmetingen [m]	Vuurhaard	Schaalmodel
Branderhoogte	7	0.4595
Branderbreedte	0.3494	0.0374
Vuurhaardhoogte	29.634	1.9756
Vuurhaardlengte	11.058	0.7372
Vuurhaardbreedte	9.681	0.6454

Tabel 2. Variabelen en constanten in de algemene behoudsvergelijking

	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Behoud van massa	1	0	0
Behoud van impuls	u_i	η_{eff}	$-\frac{\delta p}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j} [\eta_{eff} \frac{\delta u_i}{\delta x_j}]$
Turbulente kin. energie k	$\frac{\eta_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$	
Energie Dissipatie ϵ	$\frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \epsilon)$	

de uitwisselingscoëfficiënt en de bijbehorende bronterm in onderstaande tabel weer gegeven.

De turbulente viscositeit η_t is gerelateerd aan de turbulente grootheden k en ϵ volgens:

$$\eta_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

De bronterm G voor de k -vergelijking wordt als volgt geschreven:

$$G = \eta_t \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i}) \frac{\delta u_i}{\delta x_i}] \quad (4)$$

Deze term komt terug in de bronterm van de ϵ -vergelijking. De uitwisselingscoëfficiënt van de k - en ϵ -vergelijking bevat het turbulente getal van Prandtl voor de k - en de ϵ -vergelijking σ_k respectievelijk σ_ϵ . De gebruikte standaardwaarden voor de constanten van het k - ϵ model zijn achtereenvolgens:

$$C_\mu = 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92;$$

$$\sigma_k = 1.0; \sigma_\epsilon = 1.3$$

Om de behoudsvergelijkingen op te lossen moeten randvoorwaarden gespecificeerd worden. Aan de vaste wanden wordt gebruik gemaakt van de standaard wandfuncties. De intreesnelheden en bijbehorende volumestromen lucht zijn bij de beschrijving van het schaalmodel gegeven. De turbulente kinetische energie en de dissipatiesnelheid aan de intreeopeningen zijn in eerste instantie gekozen volgens relaties van Honnery [5]. De berekeningen aan het vuurhaardmodel zijn uitgevoerd met een niet-uniform rooster van 28*27*24 (x, y, z) cellen (figuur 4). Het stromingspakket PHOE-

NICS is gebruikt om de behoudsvergelijkingen drie-dimensionaal op te lossen. De berekeningen zijn uitgevoerd op een Micro/VAX II computer. Convergentie werd na 400 iteratieslagen bereikt. Hiervoor waren ongeveer 20 CPU-uren rekentijd nodig.

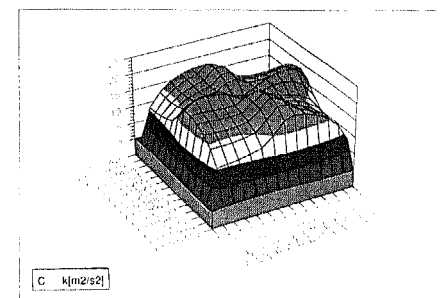
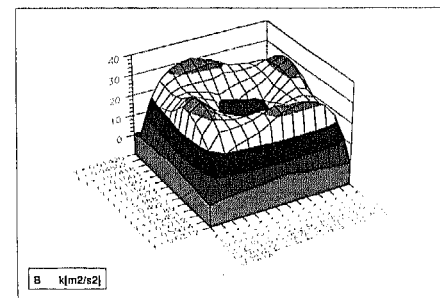
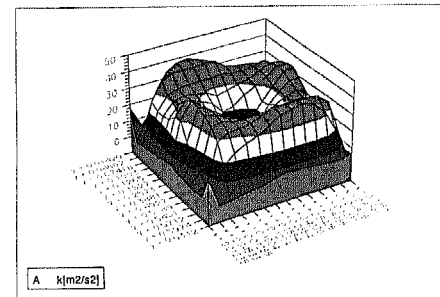


Fig. 6. De berekende verticale snelheidscomponenten (m/s) in de doorsneden A, B en C

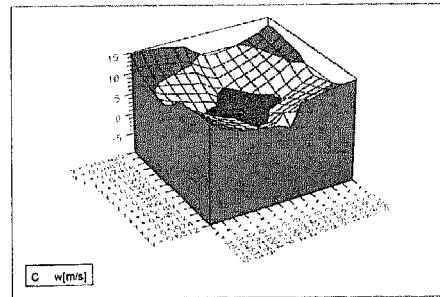
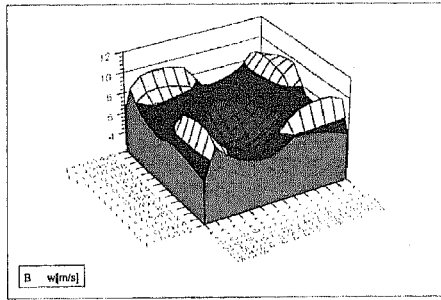
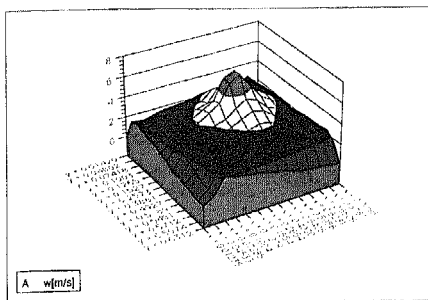


Fig. 7. De berekende turbulente kinetische energie (m^2/s^2) in de doorsneden A, B en C

Berekeningsresultaten

In figuur 5 zijn de horizontale snelheidscomponenten in de horizontale vlakken A, B en C weergegeven. In vlak A, ter hoogte van de branders, is te zien dat de branderstromen afgebogen worden naar de wanden. In het centrum zijn de snelheden erg laag. De intensiteit van de roterende beweging neemt sterk af in stroomafwaartse richting. Het snelheidsprofiel in de tangentiaal gestookte vuurhaard heeft veel overeenkomsten met het stromingsprofiel in een cycloon. In figuur 6 zijn de verticale snelheidscomponenten in de vlakken A, B en C te zien. De snelheidsprofielen in de drie horizontale vlakken verschillen aanzienlijk. In vlak A is de snelheid in het midden maximaal, terwijl in vlak B een golfpatroon met maximale snelheden in de buurt van de hoeken te herkennen is. In vlak C liggen de maximale snelheden dicht bij de wanden en vindt er in het midden van de vuurhaard zelfs terugstroming plaats.

Het verloop van de turbulente kinetische energie in de vlakken A, B en C is weergegeven in figuur 7. In de vlakken A en B vertoont k een maximum in een smal concentrisch gebied in de buurt van de wanden en een minimum in het midden. Aan de vuurhaarduitree is het profiel meer afgevlakt en de maximale waarde is ongeveer met een factor 2 ten opzichte van vlak A afgenomen.

Stapsgewijze uitbreidingen

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het $k-\epsilon$ model dat is gebaseerd op isotrope turbulentie. Als de afwijkingen met de metingen te groot zijn, dan moet het $k-\epsilon$ model vervangen worden door een anisotroop turbulent model. Met name het "Algebraïsch Stress Model" komt dan in aanmerking.

Als gevolg van de sterke dichtheidsfluctuaties in een vlam zullen de tijdgemiddelde behoudsvergelijkingen vervangen moeten worden door dichtheidsgewogen behoudsvergelijkingen, de zogenaamde Favre-gemiddelde vergelijkingen.

Als vereenvoudigd verbrandingsmodel zal in eerste instantie gekozen worden voor een éénstapsreactie-model van een gasvormig mengsel. Zo'n model wordt met een transportvergelijking voor de mengfunctie be-

schreven. De mengfunctievergelijking wordt afgeleid uit de massafractievergelijkingen voor brandstof en zuurstof. Turbulentie beïnvloedt de mengfunctie, zodat ook hier sprake is van een gemiddelde en fluctuerende waarde. De invloed van de fluctuaties van de mengfunctie werkt door op andere scalaire grootheden zoals de dichtheid en massafracties. De invloed kan statistisch, met behulp van een waarschijnlijkheidsdichtheidsfunctie, worden beschreven. Een transportvergelijking voor de fluctuaties van de mengfunctie is af te leiden uit mengfunctievergelijking.

Verder moet de stralingsuitwisseling in de vuurhaard, ook als de verbranding van kooldeeltjes voorlopig buiten beschouwing blijft, met een geschikt model worden beschreven.

Vanwege de enorme afmetingen van zo'n ketel is het erg wenselijk, dat de vuurhaard in verschillende rekenzones verdeeld kan worden. In de laatste fase van de berekeningen moeten deze zones, zonder verlies aan nauwkeurigheid, weer aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Elke stap in het verdere onderzoek zal telkens geverifieerd moeten worden. Deze opbouw geeft de garantie dat het uiteindelijk rekenprogramma volledig op de stromingsberekeningen van een vuurhaard is toegespitst en voldoende nauwkeurig is.

Conclusies

Om de stromings- en verbrandingsverschijnselen van een tangentiaal gestookte vuurhaard te simuleren is op basis van een aangepast Thring-Newby criterium een isotherm schaalmodel (schaal 1:15) gebouwd. De invloed van de verbranding op de stroming wordt in rekening gebracht door af te wijken van de geometrische overeenkomst van de branders. Als gevolg van de aanpassing van het Thring-Newby criterium moet een extra luchtstroom worden toegevoerd door de onderzijde van het model. Bij de numerieke berekeningen is gebruik gemaakt van het $k-\epsilon$ model. Het berekende stromingspatroon vertoont een spiraalvormige beweging. Voor verificatie van het reken-

model moeten de nog te meten snelheidscomponenten in het schaalmodel vergeleken worden met de berekeningen. Pas dan zal blijken of het $k-\epsilon$ model in staat is om dit type stromingen te beschrijven. Het rekenmodel zal daarna stapsgewijs en met tussentijdse verificatie worden uitgebreid naar een turbulent verbrandingsmodel, waarna ook de niet-isotherme processen in de vuurhaard van een centrale-ketel beschreven kunnen worden.

Dankwoord

De auteurs zijn de afdeling ketelbouw van Kon. Mij. "de Schelde" erkentelijk voor ondersteuning van dit werk.

Literatuur

1. Johnstone, R.E., Thring, M.W., Pilot plants, models and scale-up methods in Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York, (1957).
2. Zelkowsky, J., Die isotherme Modellierung der Strömung in Brennräumen von Staubkesseln mit Eckbrennern, Mitteilungen der VGB, heft 104, p. 335-344.
3. Muijters, P.M.G.A., Numerical analysis of the flow, combustion and heat transfer in a tangentially fired furnace - An introductory isothermal model, Master Thesis, WOC - WET 90.019 TU Eindhoven, (august 1990).
4. Muijters, P.M.G.A., Driedimensionale isotherme stromingsberekeningen aan de vuurhaard van centrale-ketel "Waalhaven", stageverslag WOP-WET 89.029, TU Eindhoven, (december 1989).
5. Honnery, D.R., Kent, J.H., Furnace flow modeling: physical and computational, Journal of the Institute of Energy, nr. 9, p. 169-177, (1989).