

Betrouwbaarheid van CFD-modellen

Kenniskbank Bouwfysica

Auteur: ir. Ruud van Herpen

1 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) is een hulpmiddel waarmee gedetailleerde stromingsberekeningen numeriek op de computer worden gemaakt. Hoewel de naam doet vermoeden dat het om vloeistofstromingen gaat, kunnen ook gasstromingen op deze wijze inzichtelijk worden gemaakt. Gassen en vloeistoffen gedragen zich op dezelfde wijze, al zijn de eigenschappen van het stromingsmedium natuurlijk wel verschillend.

Het is dus ook mogelijk om luchtstromingen en lucht/rookstromingen met behulp van CFD inzichtelijk te maken. Daarmee is de convectieve verspreiding van verontreinigingen en temperatuur bekend. Op elk willekeurig punt in het volume kan daardoor de temperatuur, rookdichtheid, zichtlengte en verontreinigingsconcentratie worden bepaald.

2 Stromingsmodellen

CFD is het meest geavanceerde stromingsmodel. In andere stromingsmodellen (eenzone, tweezone of meerzone luchtstroommodellen) zijn de beschouwde volumens (zones) homogeen gemengd verondersteld. Wat er binnen de zones gebeurt, kan niet worden bepaald; de zones zijn "black boxes". Dat maakt deze stromingsmodellen wel eenvoudiger. In feite wordt voor elke zone alleen gezorgd voor een massabalans: er is evenwicht tussen de inkomende massastroom, de uitgaande massastroom en de massaproductie binnen een zone.

In CFD wordt het ruimtevolume opgedeeld in kleine volume-elementen. Deze volume-elementen zijn niet begrensd door constructies, zodat veel meer grootheden in beschouwing moeten worden genomen. Dit betekent dat de volgende behoudswetten moeten zijn verzekerd in elk volume-elementje:

- behoud van massa;
- behoud van energie;
- behoud van impulsie;
- behoud van impulsiemoment.

Daarnaast worden er scalaire grootheden toegevoegd, zoals een turbulentiemodel voor kleine wervels (k - ϵ model) en deeltjesverontreinigingen. Het CFD-stromingsmodel (ook wel hydrodynamisch model genaamd) is dus complex. Er ontstaat een ingewikkeld stelsel vergelijkingen dat voor elke tijdstap opgelost moet worden. CFD vergt dus de nodige rekenkracht.

3 Toegevoegde modellen

Aan het bovenbeschreven hydrodynamische basismodel kunnen diverse modellen worden toegevoegd. Vooral in brandsituaties bestaat de behoefte om andere modellen aan het hydrodynamische model toe te voegen of erin te integreren:

- verbrandingsmodel;

- thermodynamisch model voor vaste constructies grenzend aan het stromingsmedium;
- stralingsoverdrachtsmodel.

3.1 Verbrandingsmodel

Het verbrandingsmodel kan eenvoudig zijn; op basis van massaloze thermische deeltjes die bij de brandhaard (bron) vrijkomen. Het brandvermogensscenario moet daarbij worden opgelegd. Ventilatiebeheerste branden kunnen dan in principe niet worden berekend.

In een meer geavanceerd verbrandingsmodel wordt gebruik gemaakt van de optredende chemische reactie bij de brand. Het model is dan brandstofafhankelijk, waarbij voor elke brandstof de "mixture fraction" vastligt in de "state relations". Als principe wordt daarbij vrijwel altijd "mixed is burnt" gehanteerd, een oneindig snelle chemische reactie dus.

Ventilatiebeheerste branden kunnen hierbij doorgaans wel worden gesimuleerd voor wat betreft het brandvermogen, maar vaak niet voor wat betreft de verbrandingsproducten. Ook het geavanceerde model is dus nog een vrij simplistische benadering van de werkelijkheid. Belangrijkste nadeel van het geavanceerde model is dat de aard, plaats en hoeveelheid van elke aanwezige brandstof bekend moet zijn. Dit is in de praktijk niet vaak mogelijk.

3.2 Thermodynamisch model voor constructies

Het is mogelijk om het warmtetransport door geleiding en buffering in de vaste constructies, die grenzen aan het stromingsmedium, in de CFD-berekeningen mee te nemen. Dit betekent vaak wel een aanzienlijke verfijning van het rekenraster. Daarnaast bezitten veel CFD-pakketten nogal wat beperkingen voor dit thermodynamisch model. Een veel voorkomende beperking is bij voorbeeld dat de materiaaleigenschappen van de constructies als temperatuurafhankelijke parameters worden gezien, terwijl dit in werkelijkheid niet het geval is.

Om die reden wordt voor de aan het stromingsmedium grenzende constructies vaak een separaat thermodynamisch model gebruikt. De uitkomsten van de CFD-berekening (hydraulisch model) worden dan als randvoorwaarden aan dit thermodynamisch model opgelegd. Vaak worden ook niet alle constructies in dit thermodynamisch model opgenomen, maar alleen die constructies die relevant of maatgevend zijn.

3.3 Stralingsmodel

Het brandvermogen bij de brandhaard wordt niet geheel convectief (dus door luchtstroming) afgevoerd. Bij hogere brandtemperaturen speelt ook het warmtestralingstransport een belangrijke rol. Warmtestraling is onafhankelijk van het stromingsmedium. Zichtbelemmering kan echter wel een rol spelen. Wanneer de rookdichtheid groter wordt, wordt de straling steeds meer afgevangen door de rookdeeltjes, waardoor (indirect) de convectieve afvoer weer in belang toeneemt.

Over het algemeen kan bij een goed zichtbare (dus relatief rookvrije) brandhaard worden uitgegaan van een verhouding tussen convectieve warmteoverdracht en stralingsoverdracht van 2:1. Tweederde van het brandvermogen wordt dus convectief afgevoerd, eenderde van het brandvermogen wordt door straling afgevoerd.

4 Aandachtspunten

4.1 Validatie

Van een goed CFD-pakket mag worden verwacht dat dit is gevalideerd aan praktijkmetingen. Hierbij kunnen de volgende vragen worden gesteld:

- Hoe is het model gevalideerd (aan andere modellen, aan theoretische proeven, aan praktijkproeven of onder praktijkomstandigheden)?
- Wat is het toepassingsgebied van het model (tot hoe ver reikt de validatie)?
- Met welke onderbouwing wordt het toepassingsgebied eventueel opgerekt?

4.2 Aandachtspunten bij randvoorwaarden, uitgangspunten en rekenresultaten

Randvoorwaarden en uitgangspunten bepalen in grote mate de waarde van het CFD-model. In de bijlagen zijn de belangrijkste randvoorwaarden en uitgangspunten gerangschikt weergegeven. Onderstaand volgt een overzicht van enkele aandachtspunten in dit verband.

- *CFD is geschikt voor bouwkundig begrensde modellen*

Bij modellen die door bouwkundige constructies zijn begrensd zijn randvoorwaarden meestal vrij eenduidig te definiëren. Bij modellen die niet door constructies begrensd zijn, zoals stedenbouwkundige modellen, is een grote variatie in randcondities mogelijk. Randcondities die het stromingspatroon beïnvloeden moeten worden vermeden en juist dit is bij dergelijke niet-begrensde modellen vrijwel niet mogelijk.

- *Randvoorwaarden bij openingen in de bouwkundige begrenzing*

Bij openingen in de bouwkundige begrenzing treedt een vergelijkbaar probleem met niet bouwkundig begrensde modellen op. Welke randvoorwaarden moeten in de opening worden opgelegd?

Stel dat het een opening betreft voor natuurlijke ventilatie. Wanneer de windinvloed hierop wordt beschouwd, kan een windsnelheid of windsnelheidsprofiel in de opening worden opgegeven. Dit is echter een vectorgrootte, waarmee een impuls wordt geïntroduceerd in de opening. Een dergelijke impuls beïnvloedt het stromingsprofiel in de ruimte. Het is vaak veel beter om een winddrukcoëfficiënt op te geven, dus een drukverschil over de opening op te leggen. Dit is geen vectorgrootte en er wordt dus geen impuls geïntroduceerd. Het stromingsprofiel wordt dan niet beïnvloed.

- *Rastergrootte*

De rastergrootte bepaalt de nauwkeurigheid van de berekening. Bij een grof raster kunnen wervelingen niet goed worden berekend. In bouwkundige toepassingen moet op een rastergrootte van 0,3 meter worden gerekend. Kleinere rasterafmetingen kunnen (plaatselijk) noodzakelijk zijn wanneer voorzieningen in het model worden meegenomen met kleine afmetingen, zoals ventilatieroosters en (stuwkracht- of impuls-)ventilatoren.

- *Turbulentiemodel voor kleine wervels*

Kleine luchtwervelingen die ontstaan bij luchtstroming langs oppervlakken kunnen niet goed met de behoudswetten worden berekend. Hiervoor zou langs de bouwkundige begrenzingen ook een zeer fijn raster noodzakelijk zijn. Omdat deze kleine luchtwervelingen geen invloed op

het stromingsprofiel uitvoeren wordt hiervoor meestal een scalair turbulentiemodel gebruikt, doorgaans het k- ϵ model. Wanneer geen turbulentiemodel wordt gebruikt, is de stroming langs oppervlakken te laminair en ontbreekt ook de thermische grenslaag (voor de afgifte van convectieve warmte aan belendende constructies). De warmte-overdracht is dan te groot. Dus zeker bij hogere temperaturen is een turbulentiemodel noodzakelijk!

- *Turbulentie-intensiteit bij de brandhaard*

De turbulentie-intensiteit bij de brandhaard bepaalt de snelheid waarmee omgevingslucht wordt ingemengd bij de bron. Bij veel algemene CFD-pakketten is dit een variabele die niet kan worden opgegeven of moeilijk vast te stellen is. Bij CFD-pakketten die vooral op simulaties met brand gericht zijn is dit vaak voorgedefinieerd. Dit laatste heeft de voorkeur, omdat de manipulatiemogelijkheden door de gebruiker hiermee beperkt zijn.

- *Verbrandingsmodel versus brandvermogensscenario*

Een brandvermogensscenario houdt in principe geen rekening met ventilatiebeheerste branden (tenzij hiermee in het opgelegde brandvermogen op een of andere wijze rekening is gehouden). Een verbrandingsmodel kan wel een ventilatiebeheerste brand simuleren. Er treedt echter in alle gevallen volledige verbranding op. De verbrandingsgassen die in de ruimte verspreiden bevatten dus geen brandbare componenten meer. Het gevolg is dat bij uitstroming van de verbrandingsgassen uit de ruimte geen verdere verbranding van deze gassen meer optreedt. Dit is normaal bij ventilatiebeheerste branden, waarbij onvolledige verbranding optreedt wel het geval. Uitslaande vlammen zijn daarvan het gevolg. Deze treden in CFD-modellen echter niet op.

- *WBO-bepaling met CFD niet mogelijk*

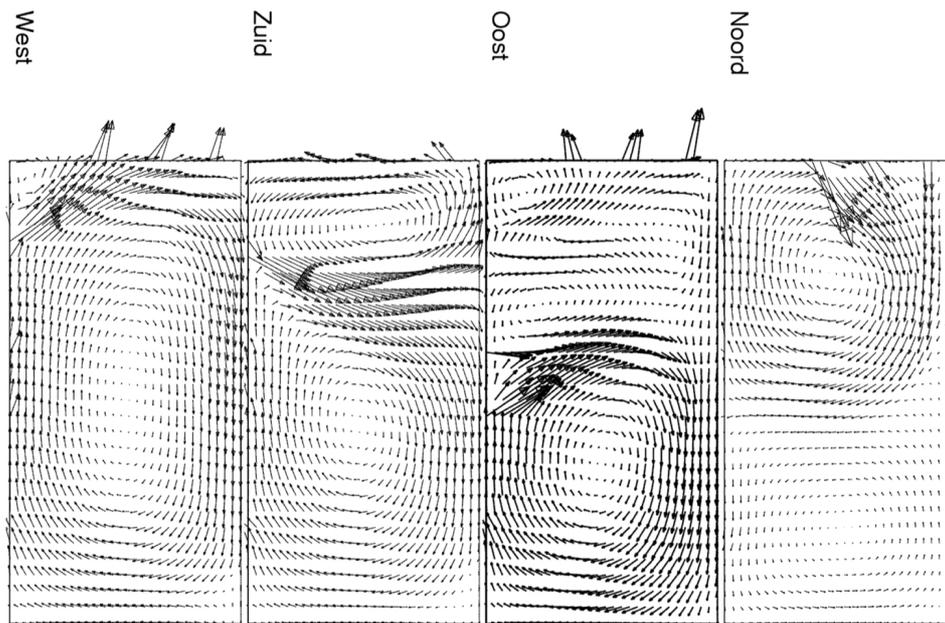
Omdat in een CFD-model geen uitslaande vlammen voorkomen, is een goede WBO-bepaling (weerstand tegen brandoverslag) met CFD niet mogelijk. Immers, de stralingscomponent van de uitslaande vlammen speelt in de WBO-bepaling een grote rol.

- *Temperatuurverdeling en rookdichtheidsverdeling ten gevolge van luchtstromingen*

De uitkomst van CFD-berekeningen wordt vaak gepresenteerd in snelheidsvectoren. Dit geeft een goed inzicht in het stromingspatroon. Met kleur wordt de temperatuurverdeling inzichtelijk gemaakt (blauw=koud; rood=heet). Wanneer de rookdichtheidsverdeling in een brandsituatie niet is berekend, wordt weleens gesteld dat deze analogie vertoond met de temperatuurverdeling. Dit gaat slechts ten dele op; er kan alleen overeenkomst zijn wanneer voor beide grootheden (temperatuur en rookdichtheid) het stromingstransport bepalend is. Voor de rookdichtheid is dat altijd het geval. Voor de temperatuur is dat alleen het geval als de verblijfstijd van de rook in de ruimte zo kort is dat deze niet kan afkoelen (convectie en straling) aan de omhullende constructies. In de volgende situaties is dit niet het geval:

- Weinig stromingstransport (dus weinig ventilatie in relatie tot de thermische traagheid van de omhullende constructies)
- Een vrij lage ventilatie-efficiëntie (dus geen verdringingsventilatie $\eta=1$, maar homogene opmenging $\eta=0,5$, of kortsluitstroming $\eta=0$)
- Optreden van grote wervels in de ruimte (in de wervels is de ventilatie-efficiëntie vrijwel nihil $\eta=0$)

In de bovenstaande situaties zal na verloop van tijd de rookdichtheid een ander (pessimistischer) beeld geven dan de temperatuurverdeling. In andere situaties kan er overeenkomst zijn tussen de rookdichtheidsverdeling en de temperatuurverdeling.



Figuur 1. Twee-dimensionaal stromingspatroon in de plattegrond van een natuurlijk geventileerde ruimte bij verschillende windrichtingen (variërend van west tot noord). Hier treden grote wervels op. In geval van brand komen de verdeling van de rookdichtheid en de temperatuur dus niet met elkaar overeen.

Bijlage 1 Randvoorwaarden

RANDVOORWAARDEN (omgevingsgebonden)

Hydrodynamisch model:

Stromingseigenschappen medium (soortelijke massa, soortelijke warmte, viscositeit)

Stromingseigenschappen vaste begrenzingen (ruwheid)

Opgelegde (omgevings)temperaturen

Opgelegde (omgevings)drukken

Opgelegde massastromen van/naar de omgeving

Opgelegde snelheden van/naar de omgeving (grootte en richting)

Deeltjesproductie en situering bron (o.a. afh. brandscenario)

Warmteproductie en situering bron (o.a. afh. brandscenario)

Thermodynamisch model:

Opgelegde temperaturen en vermogens

Begintemperaturen

Verbrandingsmodel:

Opgelegd verbrandingsmodel:

Beschouwde brandscenario's met bijbehorende vermogens (verschillende worst-case scenario's)

Stationair (in geval van brand in nevenruimte) of niet-stationair (in geval van de brandruimte)

Referentie vermogensdichtheid

Tijdconstante (0, 90, 150, 300, 600 s)

Rookpotentieel (gemiddeld)

Verbrandingswaarde brandstof (gemiddeld)

Turbulentie-intensiteit in de brandhaard

Geavanceerd verbrandingsmodel:

Brandstoffen: samenstelling en hoeveelheden

Verbrandingsproducten: samenstelling en hoeveelheden (volledige verbranding of ook onvolledige verbranding)

State relations (mixture fractions)

Mixed is burnt, of een ander verbrandingsprincipe

Verbrandingsenthalpie per brandstof

Rookpotentieel per brandstof

Bijlage 2 Uitgangspunten

UITGANGSPUNTEN (modelgebonden)

Hydrodynamisch model:

Rastervorm (orthogonaal, tetraeders, willekeurig)

Rasterafmetingen (grootte)

Discretisering van het ontwerp

Positie van voorzieningen

Turbulentiemodel (LES-techniek)

Thermodynamisch model:

Stralingsoverdracht opgenomen in het thermodynamisch model?

Rastervorm, rasterafmetingen en discretisering van het ontwerp

Materialisering en afmetingen van constructies

Materiaaleigenschappen (warmtegeleidingscoëfficiënt, soortelijke masse en soortelijke warmte) en eventuele temperatuurafhankelijkheid

Verbrandingsmodel:

Verhouding convectieve/stralingsafgifte (indien in het thermodynamisch model geen stralingsoverdracht is opgenomen)

Modellering vlammen en brandbare gassen (mixture fraction en state-relations)

Verbrandingsprincipe (mixt is burnt: volledige verbranding; of een geavanceerdere benadering)

Bijlage 3 Technisch inlegvel numerieke simulatie

model	algemene gegevens van het model				
omvang gemodelleerd gebied					
kerngebied					
afmetingen model					
begrenzing model					
onderzochte configuraties					
randvoorwaarden	gebruikte randcondities				
bouwkundige begrenzing	<input type="checkbox"/> adiabatisch <input type="checkbox"/> thermodynamisch model starttemperatuur: materiaaleigenschappen:				
	begrenzing	λ	ρ	c	ϵ
	1.				
	2.				
3.					
niet-bouwkundige begrenzing	omgevingstemperatuur: stromingsparameters:				
	opening	snelheid	volumestroom m	drukverschil	
	1.				
	2.				
3.					
Simulatie duur tijdstap grootte					
uitgangspunten	gebruikte uitgangspunten				
Bouwkundige begrenzing	materialen en oppervlakten:				
	materiaal		oppervlakte [m ²]		
	1.				
	2.				
3.					
niet-bouwkundige begrenzing	openingen en oppervlakten:				
	opening		oppervlakte [m ²]		
	1.				
	2.				
3.					
overig					

hydrodynamisch model	specifieke gegevens van hydrodynamisch model
programmatuur	<input type="checkbox"/> FVM (eindige volume methode) <input type="checkbox"/> FEM (eindige elementen methode) <input type="checkbox"/> anders programmatuur: versie:
algemeen	<input type="checkbox"/> LES rekentechniek <input type="checkbox"/> DNS rekentechniek <input type="checkbox"/> tweedimensionaal <input type="checkbox"/> driedimensionaal <input type="checkbox"/> stationaire condities <input type="checkbox"/> dynamische condities <input type="checkbox"/> convectie <input type="checkbox"/> straling <input type="checkbox"/> geleiding <input type="checkbox"/> passieve scalars <input type="checkbox"/> actieve scalars overig:
rekenrooster	type rooster: kleinste volume-element (kerngebied): grootste volume-element: nauwkeurigheid getest door roosterverfijning:
turbulentiemodellering	
convectieve differentieschema's	snelheidscomponenten: turbulentiegrootheden: scalaire variabelen:
thermodynamisch model	specifieke gegevens van thermodynamisch model
programmatuur	<input type="checkbox"/> FVM (eindige volume methode) <input type="checkbox"/> FEM (eindige elementen methode) <input type="checkbox"/> anders programmatuur versie
rekenrooster	type rooster: kleinste volume-element (kerngebied): grootste volume-element: nauwkeurigheid getest door roosterverfijning:
convectieve differentieschema's	warmtestroom: overige variabelen:

verbrandingsmodel	specifieke gegevens van verbrandingsmodel		
algemeen	<input type="checkbox"/> vermogensscenario <input type="checkbox"/> geavanceerd verbrandingsmodel <input type="checkbox"/> stationair <input type="checkbox"/> dynamisch <input type="checkbox"/> brandstofbeheerst <input type="checkbox"/> zuurstofbeheerst		
	brandstoffen: <input type="checkbox"/> mixt = burnt <input type="checkbox"/> anders		
	materiaal	verbrandingswaarde [MJ/kg]	rookpotentieel [m ² /kg]
	1.		
	2.		
	3.		
turbulentie-intensiteit brandhaard	modellering:		
overig			