

CFD-modellen voor brandsituaties

Kennisbank 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

2.1 Algemeen (hydrodynamisch)

CFD is het meest geavanceerde stromingsmodel. In andere stromingsmodellen (eenzone, tweezone of meerzone luchtstroommodellen) zijn de beschouwde volumina (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 massaverandering (productie en buffering) binnen een zone. Datzelfde geldt ook voor de energie: er is evenwicht tussen de inkomende energiestroom, de uitgaande energiestroom en de energieverandering (productie en buffering) 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 en impulsmoment in alle richtingen;

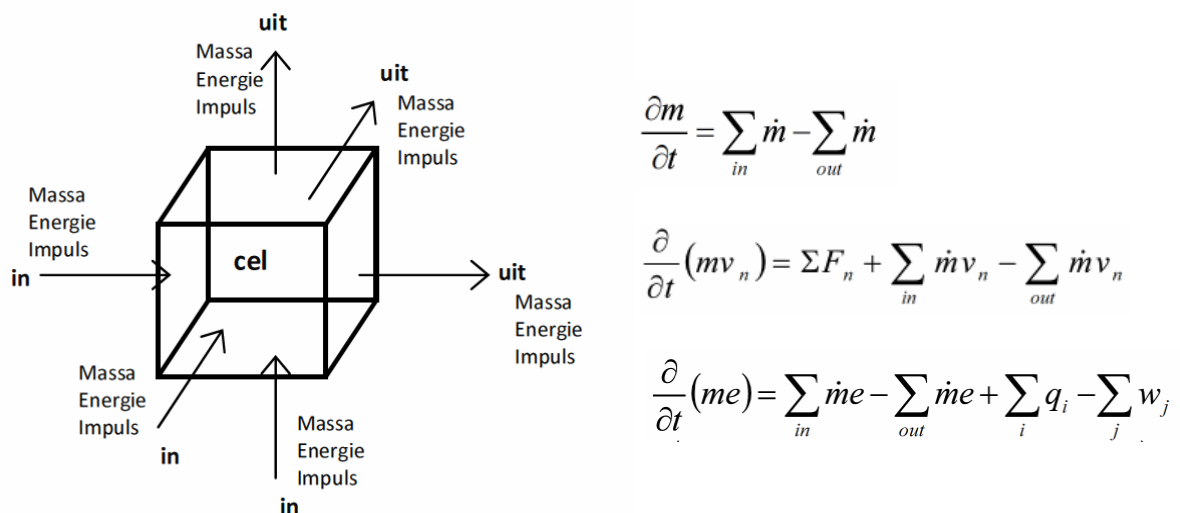
Het CFD-stromingsmodel (ook wel hydrodynamisch model genaamd) is dus complex. Er ontstaat een ingewikkeld stelsel vergelijkingen dat voor elke tijdstap opgelost moet worden. CFD vergt de nodige rekenkracht.

Deze stromingsvergelijkingen werden meer dan anderhalve eeuw geleden opgesteld door Navier en vervolgens Stokes. Als uitgangspunt namen zij de stroming in een theoretisch oneindig klein volumecelletje van de ruimte. Op deze stroming pasten zij de bovengenoemde klassieke behoudswetten uit de mechanica en thermodynamica toe. Voor een dynamische situatie laat dit zich als volgt vertalen:

- Het verschil tussen de massa die in de cel stroomt en de massa die er weer uitstroomt is gelijk aan de toename van de massa in de cel verminderd met de productie van massa in de cel.
- Het verschil tussen de kracht die de cel ondervindt en die ze weer uitoefent op de naastgelegen cellen is gelijk aan de kracht die nodig is om de cel te versnellen verminderd met de kracht in de cel tengevolge van dichtheidsverschillen.
- Het verschil van de energie die in de cel stroomt en de energie die er weer uitstroomt is gelijk aan de toename van de energie in de cel verminderd met de energie die (bijvoorbeeld door verbranding) in de cel vrijkomt.

Navier en Stokes stelden de vergelijkingen op voor de snelheden, de druk en de temperatuur van de stroming van het medium (gas of vloeistof). Daarnaast gaven zij aan welke relaties er bestonden tussen enerzijds de dichtheid en viscositeit (stroperigheid) van het medium en anderzijds de snelheid, druk en temperatuur van het medium. Dit leidde tot een set transportvergelijkingen waarmee in principe alle stromingen kunnen worden berekend. Maar in de praktijk bleken de vergelijkingen dermate complex dat deze zonder computer slechts voor een beperkt aantal type stromingen waren op te lossen.

De meeste CFD software is gebaseerd op de eindige volume methode. Deze methode gaat uit van de behoudswetten uit de mechanica en thermodynamica en past deze toe op de stroming in een klein volumecelletje. Het celletje is echter niet oneindig klein, maar bezit eindige afmetingen. Onder de aanname dat de stroming - en vloeistofeigenschappen binnen het celletje homogeen zijn, kunnen algebraïsche vergelijkingen worden afgeleid voor de snelheidscomponenten, de druk, de temperatuur en eventuele andere eigenschappen van de stroming. De eigenschappen binnen de cel zijn hierbij alleen nog afhankelijk van de eigenschappen in de buurcellen. In figuur 1 wordt een vereenvoudigde weergave van zo'n cel weergegeven



Figuur 1: Vereenvoudigde weergave behoudswetten. Samen met het oppervlak van de celwanden bepalen deze parameters de convectieve warmtestroom en de warmtegeleiding in - en uit de cel.

Tijdens een CFD simulatie wordt de gehele ruimte opgedeeld in aan elkaar grenzende volumecellen: het zogenaamde rekenrooster of 'mesh'. De gebruiker bepaalt hierbij de grootte en vorm van de cellen. Vervolgens worden alle algebraïsche vergelijkingen voor alle cellen afgeleid. Het mag daarbij duidelijk zijn dat de realiteit steeds beter zal worden benaderd naarmate steeds kleinere celletjes worden gebruikt. De gebruiker, die verantwoordelijk is voor het rekenrooster, heeft hier dus grote invloed op. In de praktijk worden afhankelijk van de toepassing de rekenroosters opgedeeld in een rastergrootte van 0,1 tot 0,3 meter.

Zo ontstaan er honderdduizenden algebraïsche vergelijkingen voor zes tot acht op te lossen variabelen, waarbij de coëfficiënten van deze vergelijkingen weer afhangen van de waarde van die variabelen. Het oplossen van deze vergelijkingen is dan ook een complex proces. De berekening van een dynamische stroming gebeurt in kleine tijdstappen, waarbij de oplossing van de vorige tijdstap als beginsituatie voor de berekening van de volgende tijdstap wordt gebruikt. Binnen een tijdstap wordt veelal een iteratieve oplosprocedure gevolgd. Vanuit de beginsituatie worden de coëfficiënten van alle vergelijkingen berekend en worden vervolgens alle vergelijkingen opgelost. Na deze stap worden alle coëfficiënten herberekend voor de veranderde situatie en worden de vergelijkingen opnieuw opgelost. De iteraties gaan net zo lang door tot de coëfficiënten en de oplossing bij benadering onveranderd blijven, d.w.z. tot een geconvergeerde oplossing binnen de tijdstap is bereikt.

Een alternatief is de expliciete tijdstap methode. Hierbij wordt verondersteld dat de nieuwe eigenschappen in een cel alleen afhangen van de oude (in de vorige tijdstap berekende) eigenschappen in die cel en zijn buurcellen. Een iteratieve procedure met alle daaraan verbonden nadelen is dan overbodig. De enige beperking is de grootte van de tijdstap, omdat een te grote tijdstap numerieke instabiliteit tot gevolg heeft. In de praktijk kan dit tot lange rekentijden leiden. De methode wordt o.a. toegepast in het CFD programma FDS (Fire Dynamics Simulator) van NIST (National Institute of Standards and Technology, US). Dit CFD programma is met name bedoeld voor brandsimulaties en de rookverspreiding die daarbij optreedt.

2.2 Turbulentie

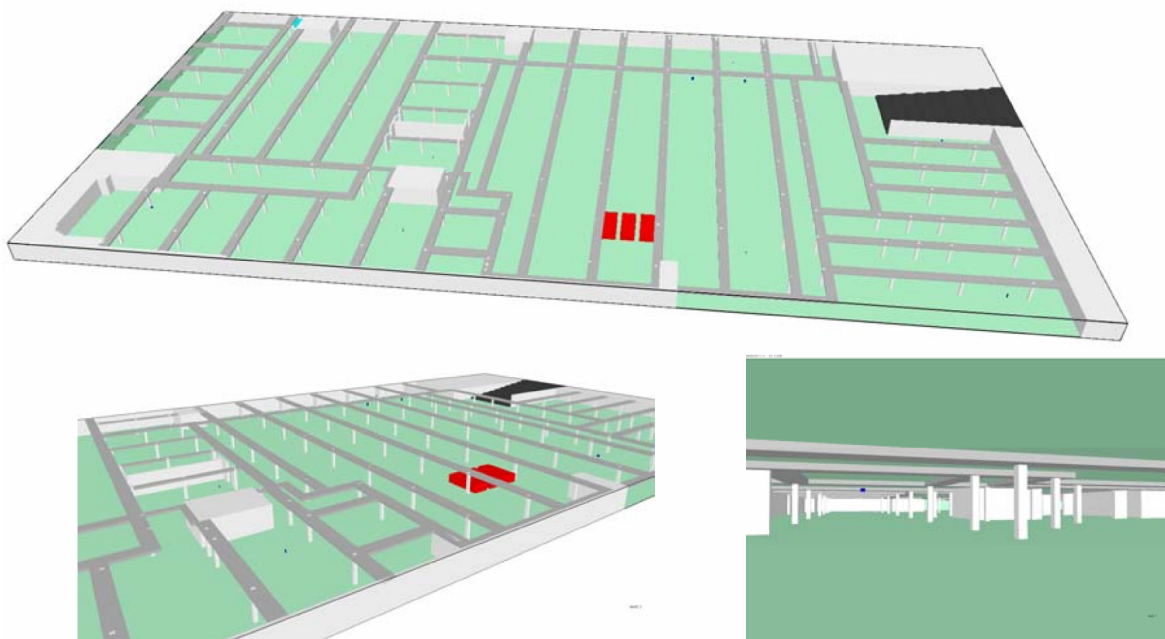
Ondanks de huidige snelle computers en efficiënte oplosmethoden, blijkt het veelal onmogelijk om de stromingen die in de praktijk voorkomen direct uit de Navier Stokes vergelijkingen op te lossen. Dit wordt veroorzaakt door het optreden van turbulentie, een fenomeen dat reeds in de 16de eeuw door Leonardo da Vinci bestudeerd werd. In een turbulente stroming fluctueren de stromingseigenschappen zoals snelheid, druk en temperatuur onregelmatig in ruimte en tijd. Dit is zelfs het geval wanneer de externe condities constant zijn, zoals in een relatief eenvoudige buisstroming. De fundamenteel aanwezige interne instabiliteit van de stroming, die bij hogere snelheden niet meer gedempt kan worden door de viscositeit (stroperigheid) van het stromingsmedium is hieraan debet. Daardoor ontstaan zogenaamde eddies, turbulente wervels. Om alle fluctuaties in ruimte en tijd te simuleren zouden zeer kleine volumecellen en zeer kleine tijdstappen nodig zijn, wat met de huidige computers tot onaanvaardbaar lange rekentijden zou leiden.

Gelukkig kan turbulentie in statistische termen worden beschreven, zoals het tijdsgemiddelde en de standaarddeviatie van de turbulentie. Deze statistische grootheden kunnen wel afzonderlijk worden opgelost, zij het met enigszins aangepaste vergelijkingen waarbij het gebruik van experimenteel bepaalde functies en universele turbulentieconstanten niet wordt geschuwd. Zo zijn er in de loop der jaren vele turbulentiemodellen ontwikkeld. Een veel

toegepast model voor "engineering" doeleinden is het $k - \epsilon$ model. Dit model brengt de extra menging ten gevolge van turbulentie in rekening met een zogenaamde "eddy viscosity" aan het stromingsmedium toe te voegen. Hoe groot die is hangt af van twee turbulentiegrootheden, namelijk k en ϵ die een maat zijn voor respectievelijk de energie van de turbulente fluctuaties en de snelheid waarmee deze fluctuaties gedempt worden. Op hun beurt worden k en ϵ elk weer met een transportvergelijking beschreven.

Bovenstaand beschreven turbulentiemodellering wordt ook wel aangeduid met RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Een alternatieve methode die sinds enkele jaren voor de simulatie van branden kan worden gebruikt is LES (Large Eddy Simulation). Bij deze methode worden de grotere, tragere turbulente wervels ('eddies') direct uit de Navier Stokes vergelijkingen opgelost en worden alleen de kleinere wervels statistisch beschouwd of blijven geheel buiten beschouwing. Voor LES gebaseerde modellen zijn in principe kleinere volumecellen nodig dan voor RANS gebaseerde modellen, wat tot langere rekentijden zal leiden. Hier staat tegenover dat de modellen fundamenteeler van aard zijn en daardoor in potentie nauwkeuriger.

In situaties waarin met name gedwongen convectie langs begrenzingen voorkomt (geforceerde stroming ten gevolge van wind, mechanische kracht of brand) volstaat het om alleen met grotere wervels rekening te houden. Een LES gebaseerd model is hiervoor dus geschikt. In situaties waarin met name vrije convectie lang begrenzingen voorkomt is een turbulentiemodellering voor de grenslaag van belang. Dan is een RANS gebaseerd model meer geschikt.



Figuur 2: Voorbeeld van een CFD-model. In dit geval is de geometrie van een parkeergarage gemodelleerd in FDS (bron: Adviesburo Nieman)

3 Toegevoegde modellen

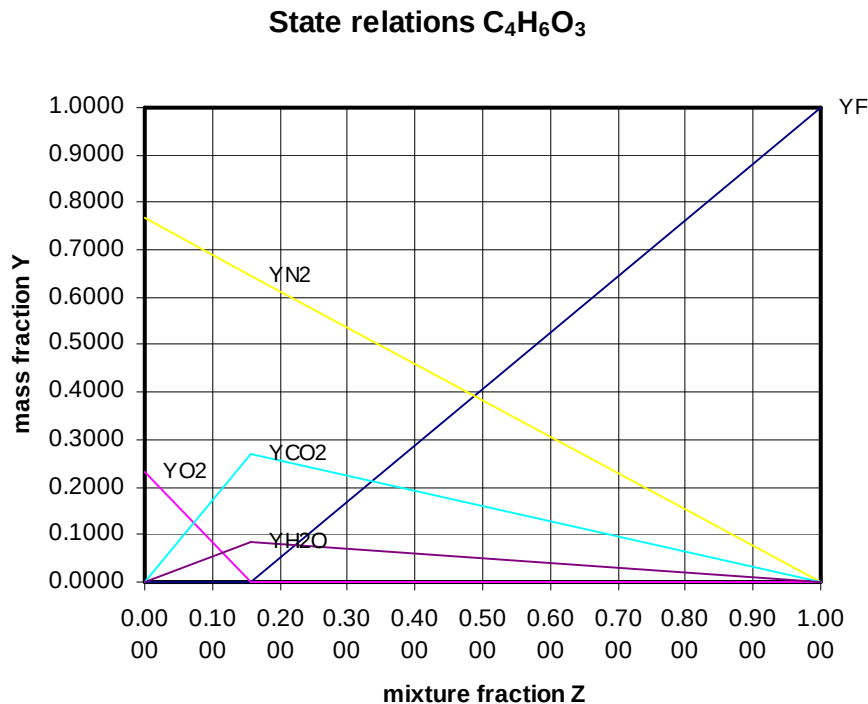
Aan het bovenbeschreven hydrodynamische basismodel kunnen diverse modellen worden toegevoegd. Vooral in brandsituaties bestaat de behoefte om andere modellen aan het hydrodynamische model toe te voegen of erin te integreren:

- 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 niet worden berekend, de brand is brandstofbeheerst volgens het opgelegde brandvermogensscenario. Er is feitelijk geen sprake van verbranding, maar alleen van warmte- en deeltjesproductie. Vlammen treden dan ook niet op. De consequentie hiervan is dat de turbulentie-intensiteit, warmteproductie en stralingsflux ter plaatse van de brandhaard niet realistisch is. Dat heeft vooral consequenties voor thermische en optische belasting op relatief kleine afstand van de brandhaard.

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 massafracties van brandstof, zuurstof, stikstof en verbrandingsproducten in relatie tot de mengfractie brandstof/lucht vastliggen in de "state relations". Hierbij wordt uitgegaan van het principe "mixed is burnt"; daarmee wordt een oneindig grote reactiesnelheid bedoeld. Ventilatiebeheerste branden kunnen zo eveneens worden gesimuleerd voor wat betreft het brandvermogen, maar vaak niet voor wat betreft de verbrandingsproducten. Dat komt in de eerste plaats doordat de brandstof niet in detail bekend is. Vaak wordt alleen onderscheid gemaakt in een cellulosebrand en een koolwaterstofbrand. In de tweede plaats wordt voor deze brandstoffen uitgegaan van de verbrandingsproducten CO_2 en H_2O . Onvolledig geoxideerde producten zoals CO komen hierin niet voor. In plaats daarvan wordt verondersteld dat het brandstofoverschot in gepyroliseerde vorm in de verbrandingsgassen aanwezig is.



Figuur 3: Voorbeeld van state relations van een cellulose brandstof. Hierin komen naast de brandstof en de lucht alleen volledige verbrandingsproducten voor (bron: NEN 6055)

Een verdere verfijning is in principe nog mogelijk. Echter, dan moeten de brandstoffen in de brandruimte worden uitgesplitst. Dat houdt in dat de aard, plaats en hoeveelheid van elke aanwezige brandstof bekend moet zijn. Dit is praktisch onmogelijk.

3.2 Thermodynamisch model voor constructies

Het is mogelijk om het warmtetransport door geleiding en buffering in 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 zo'n thermodynamisch model. Een veel voorkomende beperking is bij voorbeeld dat de materiaaleigenschappen van de constructies temperatuuraafhankelijk moeten worden ingevoerd, 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, éénderde van het brandvermogen wordt door straling afgevoerd.

4 Aandachtspunten

In bijlagen 1 en 2 is een overzicht gegeven van de aandachtspunten met betrekking tot randvoorwaarden en uitgangspunten. Bij de verantwoording van een CFD-model moet met deze aandachtspunten rekening gehouden worden.

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)
Turbulentie-intensiteit ter plaatse van de bron (evt. door verbrandingsmodel bepaald)

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)
Mixt 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 massa 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)