

Meerzone of CFD-model? - Of allebei!

De luchtstroming in een ruimte voorspellen

De inzet van stromingssimulaties is in verschillende projecten binnen TNO Bouw regelmatig noodzakelijk. Dit vanwege de complexe stromingstechnische vraagstukken die aan de orde zijn. Het stromingssimulatieprogramma Computational Fluid Dynamics (CFD) levert hierin zijn bijdrage. CFD is echter als ontwerp-hulpmiddel vaak minder goed bruikbaar omdat het een te complex en te specialistisch programma is. Tevens geldt dat de berekeningen vaak zeer tijdrovend zijn en dat er maar beperkte mogelijkheden zijn om in korte tijd een groot aantal varianten/effekten te bestuderen. Voor de bestudering van tijdsafhankelijke effekten wordt het gebruik van CFD ook minder geschikt geacht.

-door dr.ir. M. Loomans* en ir. P. Jacobs*

Een alternatief voor CFD kan bij sommige vraagstukken worden gevonden in meerzonemodellen zoals COMIS. In dat geval gaat het dan vaak om de berekening van de stroming tussen verschillende ruimtes, bijvoorbeeld in een kantoorgebouw. Het is ook mogelijk om een grote ruimte op te delen in een beperkt aantal zones, om vervolgens uitspraken te kunnen doen over bepaalde stromingskarakteristieken in die ruimte, of om een parameterstudie uit te voeren. Om dan betrouwbare uitspraken te kunnen doen moet echter meestal wel gebruik worden gemaakt van resultaten uit een CFD-berekening om de stromingstechnische interactie tussen de zones in de ruimte beter te kunnen vastleggen. In dat geval ontstaat er dus een dilemma. Wanneer moeten de resultaten uit een CFD-berekening als uitgangspunt worden genomen en op welk moment ontstaat er een duidelijke

meerwaarde bij een gekoppeld gebruik met een meerzonemodel.

Momenteel wordt binnen TNO-Bouw een onderzoek uitgevoerd dat tot doel heeft deze specifieke koppeling nader te onderzoeken en verder te ontwikkelen. In dit artikel zal hierop kort worden ingegaan. De specifieke karakteristieken van beide type programma's zullen worden besproken en er zal een voorbeeld van beide worden gegeven. Tot slot zal kort worden ingegaan op de huidige stand van zaken. Hierbij wordt ook gerefereerd aan een onderzoekstraject dat ruim een jaar geleden is opgestart binnen het Kenniscentrum TNO-TU/e.

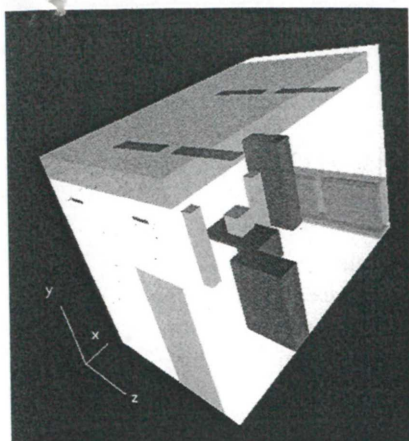
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Metten aan de luchtstroming in een ruimte is niet eenvoudig en kost geld

en tijd, daarom is het berekenen van een stromingsveld vaak aantrekkelijk. Dit heeft ertoe geleid dat rekenmodellen zijn ontwikkeld waarmee het mogelijk is om stationaire en instationaire karakteristieken van de luchtstroming te onderzoeken, zowel in een ruimte als in de gebouwde omgeving. Zo is een breed scala aan (semi-) empirische modellen beschikbaar om iets af te leiden over de stroming in een ruimte. Zij zijn in het algemeen echter slechts zeer beperkt toepasbaar. Voor gedetailleerde informatie over het stromingsveld in een ruimte moet daarom meestal gebruik worden gemaakt van de volledige zogenoemde Navier-Stokes vergelijkingen. Deze vergelijkingen beschrijven de volledige (turbulente) stroming, van de ontwikkeling van turbulentie tot de dissipatie op het niveau van de kleinste wervels.

Aan de geldigheid van de Navier-Stokes vergelijkingen wordt niet getwijfeld, echter de vergelijkingen zijn zo complex dat een analytische oplossing ervan slechts voor zeer vereenvoudigde stromingsproblemen mogelijk is. Numerieke methoden zijn dan ook noodzakelijk om deze vergelijkingen voor minder eenvoudige stromingsproblemen in te zetten. Dit vakgebied wordt numerieke stromingsleer genoemd, beter bekend als Computational Fluid Dynamics. In CFD worden de stromingsvergelijkingen gediscrèteerd en wordt vervolgens langs numerieke weg, met behulp van de computer, geprobeerd het stromingsprobleem op te lossen.

* TNO Bouw, Afdeling Gezonde Gebouwen en Installaties, Delft



Schematische weergave van de onderzochte kantoorruimte.

-FIGUUR 1-

De CFD-techniek kent inmiddels al een historie van enkele tientallen jaren. In die periode is ze ingezet om stromingsproblemen in en om gebouwen te berekenen. Door een vergelijking van de berekende resultaten met metingen is in de loop der tijd de betrouwbaarheid en het toepassingsbereik van dit soort berekeningen steeds duidelijker geworden. In de loop der jaren is de techniek verder volwassen geworden en inmiddels heeft het toch wel een bepaalde status verworven.

De typerende onderdelen van de CFD-techniek zijn:

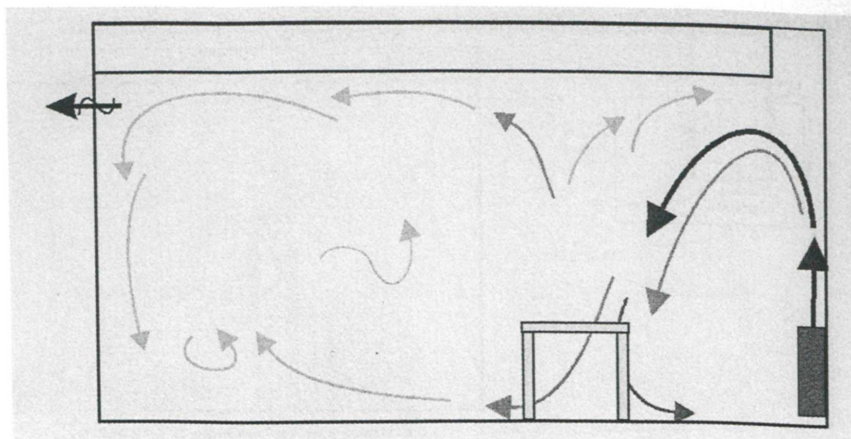
- De turbulentie modellering: Een vereenvoudiging van de turbulente (fluctuerende) stromingskarakteristieken door bijvoorbeeld uit te gaan van een gemiddeld stromingsveld. Hierop zijn de binnen de CFD-techniek bekende $k-\epsilon$ modellen gebaseerd. Voor deze modellen moet echter wel gebruik worden gemaakt van verschillende empirisch bepaalde constanten.
- De oplosmethodologie: De complexe vergelijkingen vragen om een speciale benadering om tot een oplossing te komen. Discretisatie van het stromingsprobleem in plaats en tijd is bijvoorbeeld onvermijdelijk. Ook is het niet mogelijk om het gediscrèteerde stromingsprobleem in één rekenstap op te lossen, ofwel het tegelijk bepalen van de balansen voor alle gridcellen. Naast het iteratief oplossen van de afzonderlijke vergelijkingen is ook een iteratieve aanpak vereist om de onderlinge invloed van ondermeer de massa- en de impulsvergelijking te bepalen. Ook interpolatieschema's en convergentie zijn belangrijke onderdelen van de

oplosmethodologie.

- De visualisatie van de oplossing: De visualisatie is het bekendste onderdeel van de numerieke stromingsleer. De visuele beoordeling van het berekende resultaat vormt een belangrijk onderdeel bij het bepalen of de oplossing geconvergeerd is. Echter, met behulp van de grote hoeveelheid aan gegevens die bij een berekening beschikbaar komen kunnen ook zeer inzichtelijke en kleurrijke grafische interpretaties van het stromingsveld worden weergegeven. De luchtstroming wordt in dat geval even zichtbaar gemaakt!

Voorbeelden van CFD-resultaten zien we steeds vaker in de literatuur verschijnen. De beschikbaarheid van zeer volledige up-to-date commerciële software en natuurlijk van steeds snellere computers werken hierbij drempelverlagend. De voorbeelden laten zien dat de CFD-techniek een belangrijke ondersteuning kan bieden bij de beoordeling van de luchtstroming in en rond (nieuw te ontwerpen) gebouwen. Gezien de complexiteit van de techniek en de vele vrijheidsgraden die aanwezig zijn bij de modellering, dient men zich er echter wel van bewust te zijn dat nagenoeg iedere berekening 'mooie' plaatjes zal opleveren, maar dat ook in het geval van CFD zeer zeker geldt dat 'rubbish in', 'rubbish out' is.

Het gebruik van CFD moet daarom niet enkel worden afgewogen aan de gekleurde plaatjes die kunnen worden geproduceerd. Het moet vooral ook een meerwaarde bieden om een vraag te kunnen beantwoorden die anders niet had kunnen worden beantwoord. Hierop zou de keuze voor het gebruik



Tekening van het typische stromingspatroon in een verticaal vlak zoals dat is bepaald met behulp van rookvisualisatie.

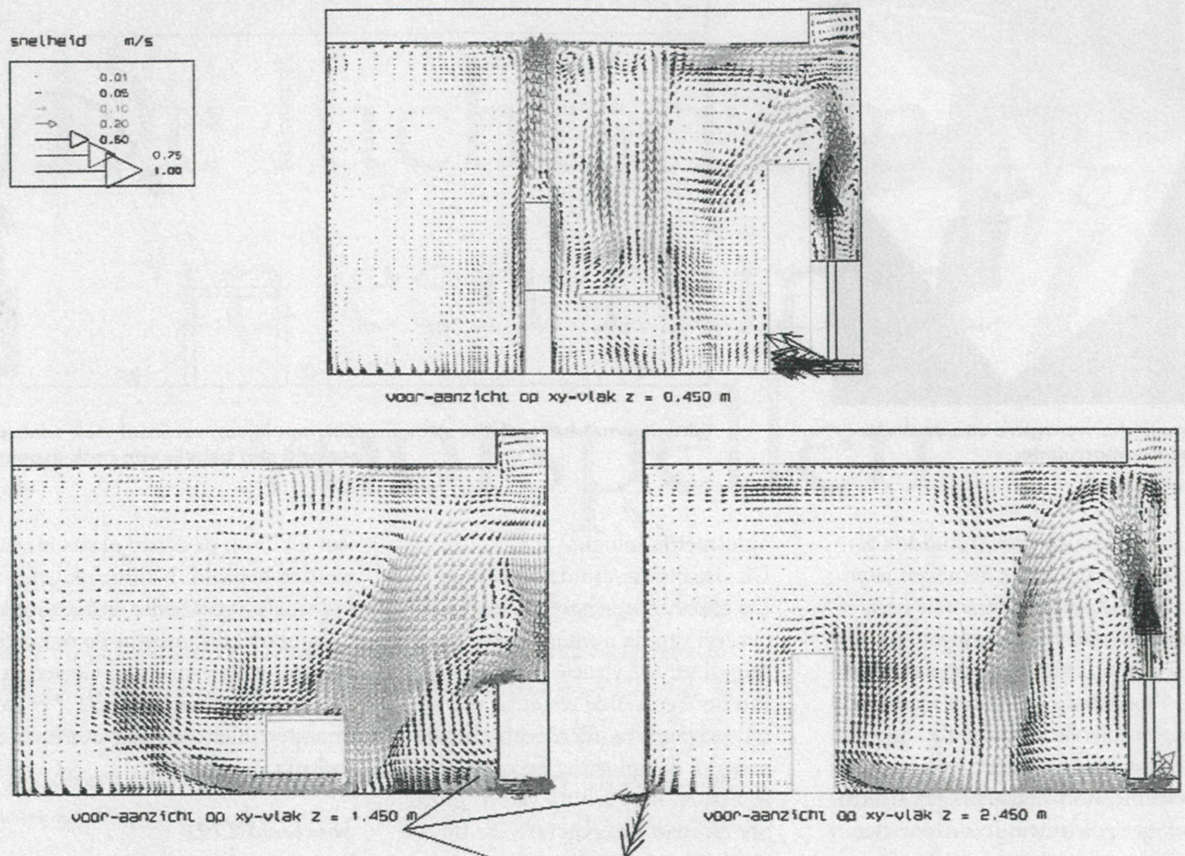
-FIGUUR 2-

van CFD op de eerste plaats moeten worden bepaald. Natuurlijk geldt dit in principe voor ieder ander simulatiehulpmiddel dat men in de ontwerp-fase zou willen inzetten. Gezien de specifieke kenmerken van CFD wordt dit aspect hier toch nog wat meer benadrukt.

Voorbeeld CFD

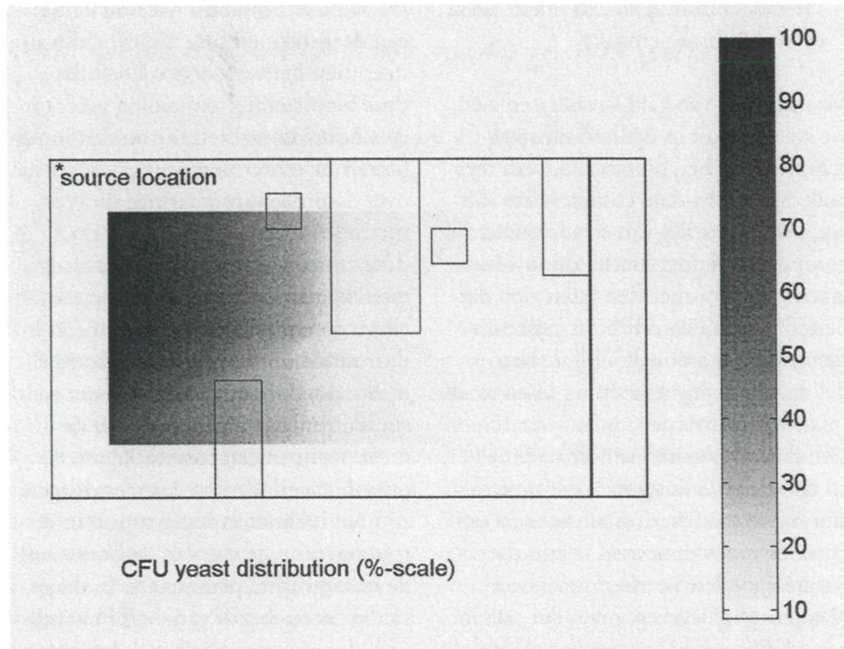
Bioaerosolen worden gemeten om de blootstelling aan micro-organismen in een ruimte te kunnen bepalen (uitgedrukt in Kiem Vormende Eenheden per volume eenheid). Meestal wordt een dergelijke meting uitgevoerd wanneer men het vermoeden heeft dat deze blootstelling aanleiding geeft tot gezondheidsklachten. Er bestaat in de literatuur echter nog weinig consensus over de procedure waarmee dit type metingen moet plaatsvinden. Daardoor is het niet eenvoudig om resultaten van individuele metingen met elkaar te vergelijken. In een project is daarom de ontwikkeling van zo een meetprocedure opgestart. Als een eerste stap is daarbij gekeken naar de meetlocatie in een ruimte. Om iets over de meetlocatie te kunnen zeggen zijn het luchtstromingspatroon in de ruimte en de locatie van de bron(nen) de belangrijkste parameters. In dit geval ligt het gebruik van de CFD-techniek dan ook voor de hand. Immers, met een meerzonemodel zal het nagenoeg onmogelijk zijn om iets over de contaminatieverdeling in een willekeurige ruimte te kunnen zeggen.

In [6] en [7] wordt een meer uitgebreide beschrijving gegeven van de resultaten van het hierboven genoemde project. Hier zullen ter illustratie enkele resultaten worden getoond als een



Het met behulp van CFD berekende snelheidsveld op enkele doorsneden in de ruimte.

-FIGUUR 3-



Meetresultaat, op een horizontale doorsnede, van de relatieve verdeling van micro-organismen in de onderzochte kantoorruimte, voor de aangegeven bronlocatie (CFU = KVE).

-FIGUUR 4-

voorbeeld van het gebruik van CFD. Er is ondermeer gekeken naar het effect van de bronlocatie en de configuratie van de ruimte op de verdeling van de verontreiniging in de ruimte. De berekeningen zijn in dit geval ook

vergeleken met enkele meetresultaten waarbij gebruik is gemaakt van een echte bacterie en schimmel.

In figuur 1 wordt een voorbeeld gegeven van een van de onderzochte confi-

guraties. Figuur 2 laat vervolgens een schets zien van het met behulp van rook gevisualiseerde stromingspatroon in de ruimte. Uit figuur 3 blijkt dat met behulp van CFD het stromingspatroon in de ruimte goed kan worden gereproduceerd.

Toelichting bij figuur 3.

De berekende luchtsnelheden zijn met behulp van vectoren aangegeven. De pijl geeft hierbij de richting aan en de afmeting en de kleur van de vector zegt iets over de snelheid. (Aanvullende informatie: op $z = 1.450$ m, de doorsnede van het midden van de ruimte, bevindt zich geen inductie-unit; op $z = 2.450$ m bevindt zich linksonder een spleet onder de deur. Deze resulteert lokaal in relatief hoge luchtsnelheden.)

De gemeten contaminatieverdeling in de ruimte wordt weergegeven in figuur 4, terwijl in figuur 5 de overeenkomstige met behulp van CFD berekende verdeling wordt getoond. Opnieuw blijkt dat vergelijkbare resultaten worden gevonden. Overigens moeten deze resultaten relatief worden gezien omdat de bronsterkte bij de metingen onbekend was.

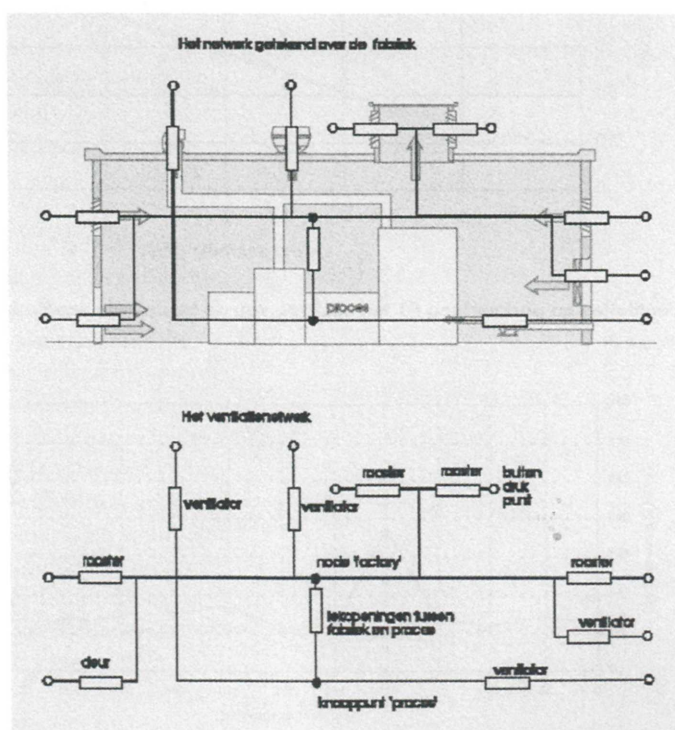
Voor de hier besproken CFD-berekeningen is overigens gebruik gemaakt van het binnen TNO ontwikkelde CFD-model WISH3D. Dit programma is binnen verschillende nationale en internationale onderzoeken gevalideerd [5].



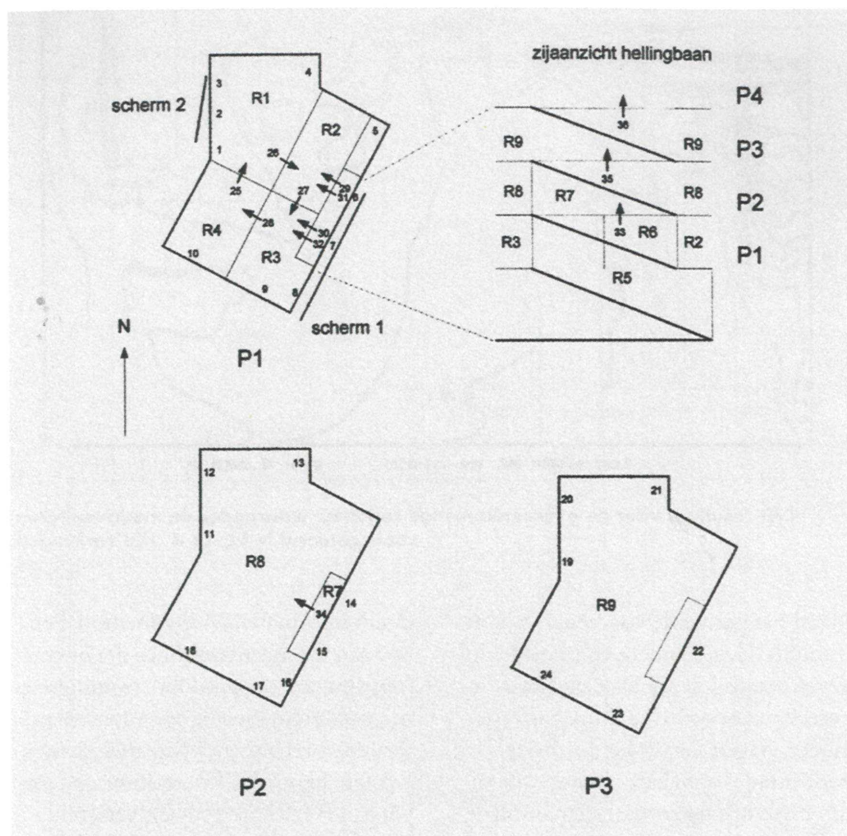
Naast het getoonde voorbeeld, zijn er inmiddels legio andere voorbeelden te geven waarbij de CFD-techniek is ingezet om antwoord te krijgen op specifieke vragen die, in het bijzonder voor minder gangbare situaties, moeilijk met vuistregels of vereenvoudigde modellen zijn te achterhalen.

Ventilatie- of zogenaamde infiltratiemodellen kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën: één-zone en meerzone modellen. Eénzone modellen zijn vaak geschikt voor eenvoudige problemen en leveren maar weinig

detail informatie. Meerzonemodellen bestaan uit meerdere zones die onderling zijn verbonden door stromingselementen, zoals kieren, open ramen en deuren, mechanische ventilatiesystemen, enz. (zie figuur 6). Intern kunnen temperatuurverschillen tussen verschillende zones ook voor een drijvende kracht voor het luchttransport zorgen. Aan de buitenzijde van het gebouw kunnen de stromingselementen worden gekoppeld aan winddrukken. Uitgaande van massabehoud in elk van de zones levert het netwerk van stromingselementen een stelsel niet-lineaire vergelijkingen op dat moet worden opgelost. Zo kan bijvoorbeeld

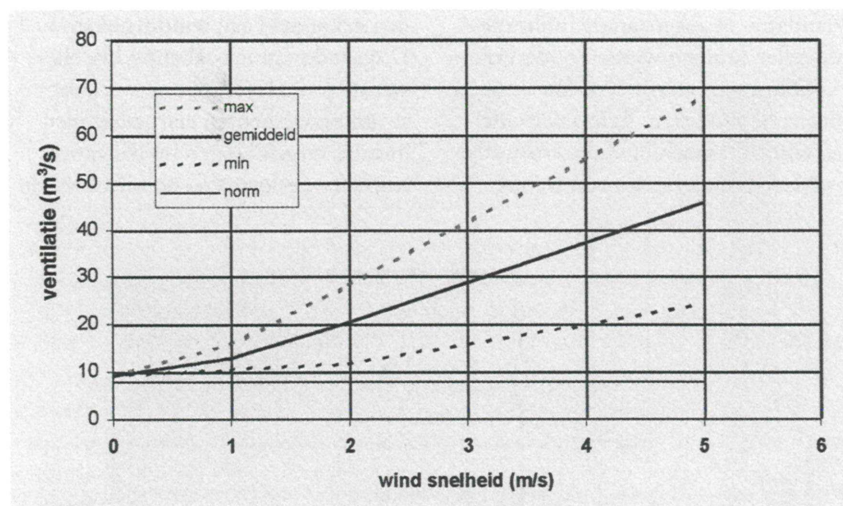


-FIGUUR 6-



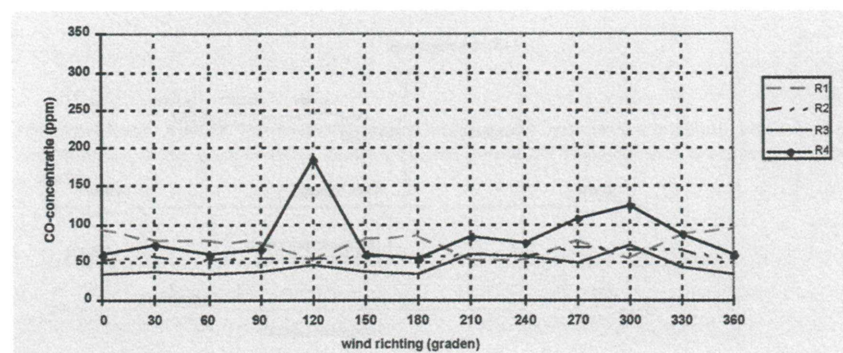
Parkeergarage, gemodelleerde zones en ventilatieopeningen in de gevels, het dak en interne verbindingen tussen zones.

-FIGUUR 7-



Ventilatie van parkeerlaag P1 ten opzichte van de benodigde ventilatie voor CO afvoer.

-FIGUUR 8-



CO concentraties bij 1 m/s windsnelheid.

-FIGUUR 9-

ook de verspreiding van verontreinigingen worden gesimuleerd. Op dit moment is COMIS een van de meest gebruikte en best gedocumenteerde meerzonemodellen. Het is in 1988 ontwikkeld door een internationaal gezelschap van ventilatiespecialisten tijdens een één jaar durende workshop te Berkeley (VS). Nadien is het geëvalueerd met tracergasmetingen, windtunnelexperimenten, andere modellen en met analytische oplossingen. De invoer- en uitvoerroutines zijn zo opgesteld dat het, zeker in vergelijking met andere meerzonemodellen, een redelijk gebruikersvriendelijk programma is te noemen.

Voorbeeld zonemodel

Een voorbeeld van een ruimte waar ventilatie van groot belang is, is een parkeergarage. Parkeergarages moeten worden geventileerd om de uitlaatgassen van auto's te verdunnen en af te voeren. Koolmonoxide (CO) in de uitlaatgassen is hierbij volgens de NEN 2443 als maatgevende verontreiniging te beschouwen.

In de NEN 2443 staan ondermeer een aantal ontwerpregels die betrekking hebben op de grootte van de natuurlijke ventilatie openingen in relatie tot het oppervlak van de garage. Als aan deze regels wordt voldaan, wordt gedacht dat een goede ventilatie is gegarandeerd. Afwijken van de regels is toegestaan, maar er moet dan wel worden aangetoond dat een gelijkwaardige ventilatie en acceptabele verontreinigingsniveau's zijn te realiseren. Hiervoor kunnen meerzonemodellen worden ingezet.

In figuur 7 is een boven- en zijaanzicht van een parkeergarage gegeven. De grootte van de natuurlijke ventilatieopeningen voldoet in dit geval niet aan de NEN norm. Daarnaast geldt dat er ook nog belendende bebouwing bij een aantal openingen aanwezig is. Om gelijkwaardigheid aan te tonen zijn daarom met het meerzonemodel COMIS de ventilatie en de optredende CO concentraties doorgerekend. De resultaten hiervan zijn in Figuur 8 en 9 afgebeeld.

Dat ook bij lage windsnelheden voldoende ventilatie wordt onderhouden, is een gevolg van de thermiek via de hellingbaan. Kleine temperatuurverschillen zijn altijd aanwezig, bijvoor-

beeld door het naijlen van de binnen- op de buitentemperatuur, warmteproductie door voertuigen, zon beschenen wanden, enz.

COMIS kan ook inzicht geven in de concentratieverdeling binnen een open ruimte. Zone R4 blijkt bij bepaalde windrichtingen slechts matig te worden doorstroomd. In dit geval is de situatie echter niet kritisch. Om in kritische gevallen echt uitsluitsel te geven over de concentratieverdeling in een ruimte zal moeten worden teruggegrepen op CFD [4].

CFD OF ZONEMODEL OF GEKOPPELD?

De beschrijving van de beide simulatietechnieken en de voorbeelden geven een indruk van de mogelijkheden en beperkingen ervan. Echter wanneer informatie op detailniveau minder van belang is, tijdsafhankelijke aspecten een grotere rol spelen en uitgebreide parameterstudies aan de orde zijn, dan heeft het gebruik van een zonemodel voorlopig nog de voorkeur boven het gebruik van CFD. Door ervoor te zorgen dat bij het gebruik van een zonemodel afgeleide informatie uit een CFD-berekening wordt gebruikt, kan de betrouwbaarheid van een berekening met een zonemodel wel worden vergroot.

Om nu voor iedere berekening met een zonemodel een CFD-berekening uit te voeren is niet zinvol. In plaats daarvan zou gebruik kunnen worden gemaakt van CFD-resultaten uit eerdere berekeningen die bijvoorbeeld in een database zijn opgeslagen. Deze informatie kan dan door een zonemodel worden aangesproken. Meestal zal er geen precieze overeenkomst tussen de onderzochte CFD-configuratie in de database en de te onderzoeken configuratie met het zonemodel bestaan, in dat geval zal inter- en extrapolatie moeten plaatsvinden. Wanneer dit kan en hoe dit het beste moet gebeuren zijn vragen waarop nog antwoord moet worden gegeven.

Op dit moment loopt een project bij TNO Bouw waarin de bovenstaande problematiek wordt onderzocht. In de eerste fase van dit project is het van belang een goed beeld te krijgen van de gegevens die tenminste moeten worden uitgewisseld tussen de beide

programma's en de opzet van een database daarvoor. Dit wordt gedaan door uit te gaan van een goed gedefinieerde probleemsituatie met een beperkt aantal parameters. In deze fase wordt ook bepaald hoe het beste de koppeling tussen de twee programma's mogelijk kan worden gemaakt. Ondermeer wordt daarvoor gebruik gemaakt van een speciale pc-versie van het CFD-programma WISH3D. Het is de intentie om op korte termijn een demo-versie beschikbaar te hebben waarmee het mogelijk is meer uitgebreide testen te doen. Dit onderzoek borduurt min of meer voort op eerder onderzoek zoals is beschreven in [1] en [8].

Het koppelen van een tweetal (of meer) typen simulatieprogramma's om op die manier optimaal gebruik te maken van de mogelijkheden van de afzonderlijke programma's is ook het onderwerp van een meer uitgebreid onderzoekstraject dat nu ruim een jaar geleden is gestart binnen het Kenniscentrum TNO-TU/e [3]. In een lopend promotieonderzoek wordt hierondermeer gekeken naar de mogelijkheden van een run-time koppeling tussen CFD en een gebouwsimulatieprogramma [2]. Overigens gaat het hierbij niet alleen om de vraag hoe die koppeling tot stand moet worden gebracht en wanneer en welke gegevens moeten worden uitgewisseld tussen de twee (afzonderlijke) programma's. Tevens wordt binnen dit onderzoek een methodologie ontwikkeld met als doel te komen tot een meer consistente benadering van het gebruik van een bepaald type simulatieprogramma en eventuele daarbij gewenste koppelingen met andere programma's.

In het licht van CFD en meerzonemodellen kan nu al een belangrijke conclusie worden getrokken. De keuze voor het gebruik van een van deze programma's moet vooral niet worden geleid door het beschikbare simulatieprogramma, maar door het type probleem waarvoor een antwoord wordt gezocht. In dat geval zal een koppeling van beide programma's bij sommige vraagstukken een duidelijke meerwaarde opleveren en kunnen we met de huidige stand der techniek een flinke stap vooruit zetten. 

REFERENTIES

1. Chen, Q. 1988. *Indoor airflow, air quality and energy consumption of buildings*, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederland.
2. Djunaedy, E., Hensen, J.L.M. en Loomans, M.G.L.C. 2002. *Towards a strategy for airflow simulation in building design*, Proceedings RoomVent 2002, pp. 393-396, Kopenhagen, Denemarken.
3. KCBS. 2002. *Center for Building and Systems*, <http://www.kcbs.nl/>.
4. Kornaat, W. 1995, *Dimensionering van ventilatievoorzieningen met behulp van luchtstromingsmodellen, Natuurlijke ventilatie van parkeergarages*, TVVL magazine, jaargang 24, Nr. 4, pp.28-31.
5. Lemaire, A.D. et al. 1993. *Room air and contaminant flow, Evaluation of Computational Methods*, IEA Annex 20, Subtask-1 Summary Report, TNO Bouw, Delft.
6. Loomans, M.G.L.C., Bluysen, P.M. en Ringlever-Klaassen, C.C.M. 2002. *Bioaerosols – Where should one measure them in a Room?*, Proceedings Indoor Air 2002, Monterey, Verenigde Staten.
7. Loomans, M. en Lemaire, A.D. 2002. *Particle concentration calculations using CFD – a comparison*, Proceedings Roomvent 2002, pp. 153-156, Kopenhagen, Denemarken.
8. Peng, X. 1996. *Modeling of indoor thermal conditions for comfort control in buildings*, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederland.