

Door verschillende CFD-gebruikers

Modellering van warmte- en rooktransport

De toepassing van de CFD-techniek (Computational Fluid Dynamics) voor ontwerpproblemen in de praktijk, wordt steeds meer gemeengoed. In Nederland gaat het daarbij vooral om vraagstukken over warmte- en rooktransport bij brand om gelijkwaardige oplossingen voor brandveiligheid te onderbouwen. Gezien de complexiteit van dit type stromingsprobleem en het feit dat experimentele validatie van dergelijke stromingsproblemen vaak niet mogelijk is, is de geldigheid van numerieke simulaties niet altijd even eenduidig. Daar komt bij dat controlerende instanties vaak niet de kennis hebben om CFD-resultaten op zijn merites te beoordelen [1].

**- door dr.ir. M.G.L.C. Loomans*, ir. T. Lemaire*
en mw. drs. M. van der Plas*****

Daarom is een zogenaamde referentiestudie opgezet. Het doel van deze studie is het verkrijgen van inzicht in de mate en achtergrond van de spreiding van CFD-resultaten wanneer verschillende CFD-gebruikers eenzelfde stromingsprobleem modelleren en berekenen. De wens is om vervolgens te komen tot (minimale) aanbevelingen voor het uitvoeren van CFD-studies voor een dergelijk type stromingsprobleem, zowel voor uitvoerende als voor beoordelende instanties.

Deelnemers in de studie zijn adviseurs (van beginnend tot ervaren) die CFD gebruiken in hun adviespraktijk. In de studie worden in totaal drie casussen onderzocht met een focus op de discretisatie van een probleem inclusief de toegepaste fysische modellen (bij nauwgezet omschreven randvoorwaarden) en de validatie (voor een goed

omschreven experiment met beschikbare data). De eerste casus is in aanzet zo eenvoudig als mogelijk gehouden. De complexiteit neemt vervolgens per casus toe. In alle gevallen is het stromingsprobleem gericht op warmte- en rooktransport, waarbij als specifieke applicatiegebieden parkeergarages en atria zijn gekozen. In dit artikel zal een samenvatting worden gegeven van de resultaten van de eerste casus.

METHODE *Werkwijze*

In de studie wordt een beschrijving gegeven van het te onderzoeken stromingsprobleem (casus). Op basis van deze omschrijving hebben de deelnemers (vrijwillig) berekeningen uitgevoerd. De deelnemers hebben ongeveer zes weken de tijd gekregen om de

Dr.ir. M.G.L.C. Loomans



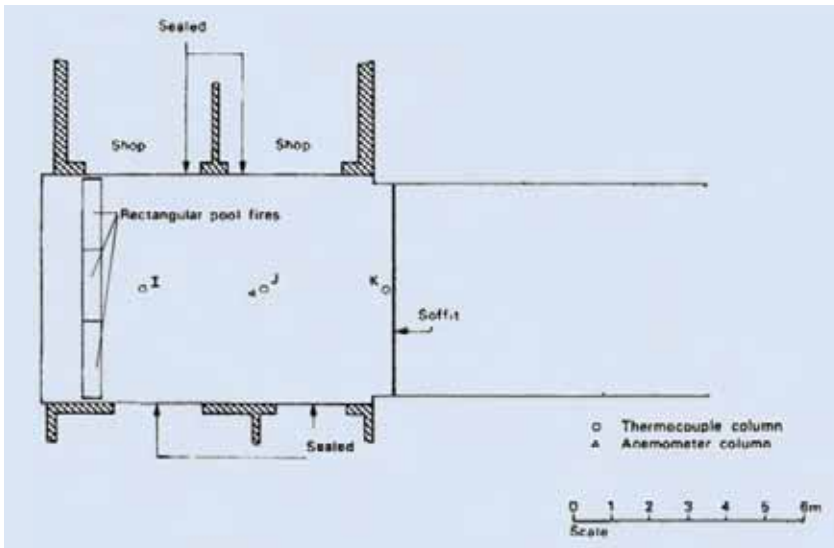
Ir. T. Lemaire



Mw. drs. M. van der Plas

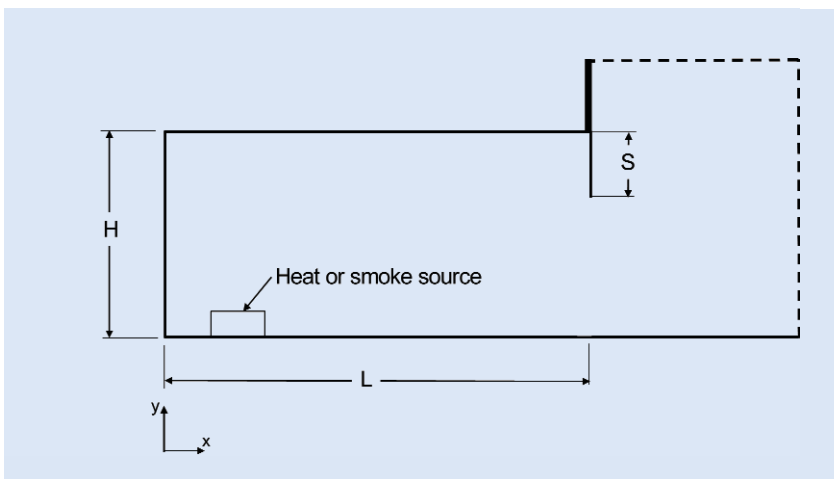


* TU Eindhoven, Faculteit Bouwkunde
** Efectis, Rijswijk, Nederland
*** NIFV, Arnhem, Nederland



Plattegrond van de situatie [4].

- FIGUUR 1 -



Doorsnede van de situatie.

- FIGUUR 2 -

berekening uit te voeren en de resultaten terug te sturen. Alle ontvangen informatie is vervolgens als geanonimiseerde data verwerkt.

De resultaten omvatten algemene gegevens over de toegepaste CFD-code, het toepassingsgebied en de ervaring van de deelnemer met het uitvoeren van dergelijke studies. Daarnaast werden specifieke gegevens gevraagd over de modellering van het probleem. Dit omvatte onder andere de discretisatie van de geometrie, de toegepaste submodellen en de oplossingswijze. Tot slot werd voor de posities waarop meetdata beschikbaar waren, gevraagd om numerieke data aan te leveren. Contourplots van de temperatuur en vectorenplots van het snelheidsveld completeerden de gevraagde informatie.

Vergelijking van de resultaten heeft in het bijzonder plaats gevonden op basis

van gemaakte keuzes voor verschillende aspecten in de CFD-modellering in relatie tot de numerieke gegevens. Bijvoorbeeld de wijze waarop rekening is gehouden met warmtestraling.

Omschrijving casus

Het uitgangspunt voor de eerste casus in de studie was om met een zo eenvoudig mogelijk, maar desondanks representatieve situatie over rook- en warmtetransport, te starten. Dit vertaalt zich in een bij voorkeur 2D-benadering, een probleem dat stationair kon worden aangenomen en een relatief eenvoudige en eenduidige geometrie.

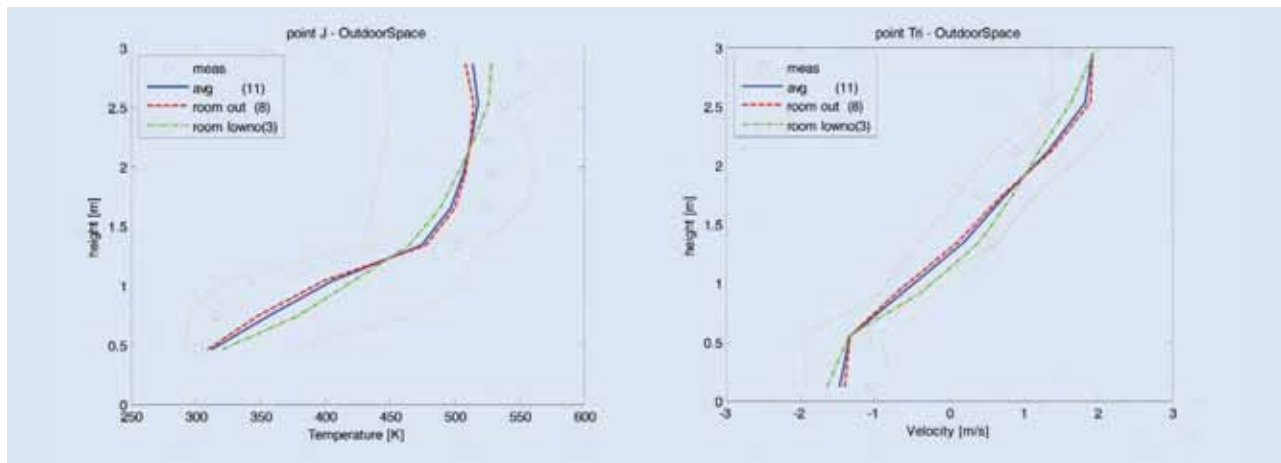
Met bovenstaande uitgangspunten is de zogenaamde Heselden-casus gekozen als eerste casus. In deze casus zijn in 1971 brandproeven in een winkelcentrum uitgevoerd door Heselden [2]. Het winkelcentrum zou daarna

worden gesloopt. Deze brandproeven zijn zodanig uitgevoerd dat een (zo goed als mogelijk) 2D-stationaire stromingssituatie bestond. Mede daarom zijn de resultaten uit de metingen tijdens de proeven vaker gebruikt voor validatie studies. Deze casus is in de literatuur in het bijzonder beschreven in het artikel van Markatos en Malin [4]. Deze referentie is gebruikt voor de beschrijving van de casus.

Het stromingsprobleem betreft een ruimte 9x6x3 meter, waarin een brandhaard is geplaatst over de volledige breedte van de ruimte 6 meter, op een afstand van 1,25 meter van de achterwand (midden; afmeting brandhaard: 0,5 m). In de wand aan de voorzijde van de ruimte is een opening waarlangs luchtuitwisseling met de buitenomgeving mogelijk is. Een plattengrond is weergegeven in figuur 1. Hierbij lopen de zijwanden door in het buitengebied, voorbij het rookscherm (soffit). In figuur 2 is aanvullende informatie gegeven over de geometrie van de omgeving buiten de brandruimte (voorbij $x = 9$ m; aangeduid als buitengebied). De afmetingen van het buitengebied zijn vrij gelaten.

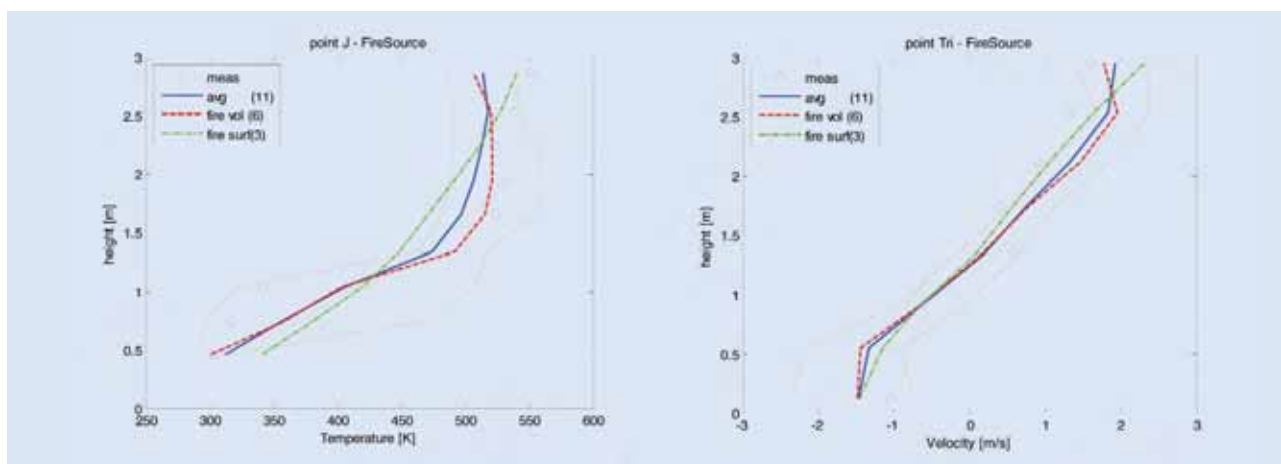
In de experimentele opstelling was een opening aanwezig over de volledige breedte van de ruimte. Een scherm aan het plafond beperkte de openingshoogte tot 2,0 m (hoogte scherm: 1,0 m). De gebruikte brandstof in de experimenten was 'industrialized methylated spirit' (spiritus), met een vermogen van 2,04 MW. Dit vermogen is gebaseerd op het gewichtsverlies. De vlammen reikten tot een hoogte van ongeveer de helft van de hoogte van de ruimte. Voor de omgevingstemperatuur mocht een waarde van 293 K worden aangehouden. De temperatuur voor de vloer, het plafond en de wanden mochten constant worden aangehouden en gelijk aan de omgevingstemperatuur.

Bij de brandproeven is op verschillende posities gemeten. De luchtsnelheid is gemeten op een drietal posities (I, J en K; zie figuur 1), de luchtsnelheid op één positie (driehoek; figuur 1). De metingen zijn uitgevoerd met respectievelijk, thermokoppels en watergekoelde anemometers. Alle metingen zijn uitgevoerd in de middellijn van de ruimte op verschillende afstanden tot de brand (drie statieven met negen thermokoppels, met een verticale



Onderscheid in modellering van een hoge buitenruimte ten opzichte van het achterwege laten van deze ruimte, dan wel het modelleren van een lage buitenruimte (voor respectievelijk punt J en D).

- FIGUUR 3 -



Onderscheid in de modellering van de brand, volumetric heat source versus een vermogen vrijgelaten aan een oppervlak.

- FIGUUR 4 -

afstand van 0,3 m, gesitueerd op 2,56 m, 5,76 m en 8,96 m van de achterwand; één statief met acht anemometers, met een verticale afstand van 0,45 m, gesitueerd op 5,46 m van de achterwand).

De nauwkeurigheid van de metingen is relatief laag. De invloed van straling op de thermokoppels nabij de brand kan namelijk tot een aanzienlijke overschatting leiden. Markatos noemt in de vergelijking van de resultaten een waarde van 50 K voor de onderste meetpunten nabij de vloer op $x = 2,56$ m. Voor de luchtsnelheidsensoren geldt dat zij de horizontale component registreren, maar dan vanaf een snelheid van ongeveer 0,5 m/s. Een 1-op-1 overeenstemming van de gesimuleerde data met de gemeten data kan daarom niet (en zou niet moeten) worden nagestreefd. Zij geven wel een indicatie van het stromingsbeeld.

In de oorspronkelijke omschrijving van de casus werd geen uitspraak gedaan over het stralingsaandeel in de

brand. Met de geleverde informatie bleek het ook niet zonder meer mogelijk om de hoeveelheid straling af te leiden. Daarom is hiervoor verwezen naar [4], waar wordt uitgegaan van een stralingsaandeel van 20 %. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het belang van straling in de totale warmteoverdracht in dit geval geringer was dan normaal in de praktijk aan de orde zal zijn. Dit heeft voornamelijk te maken met de bruikte brandstof.

RESULTATEN

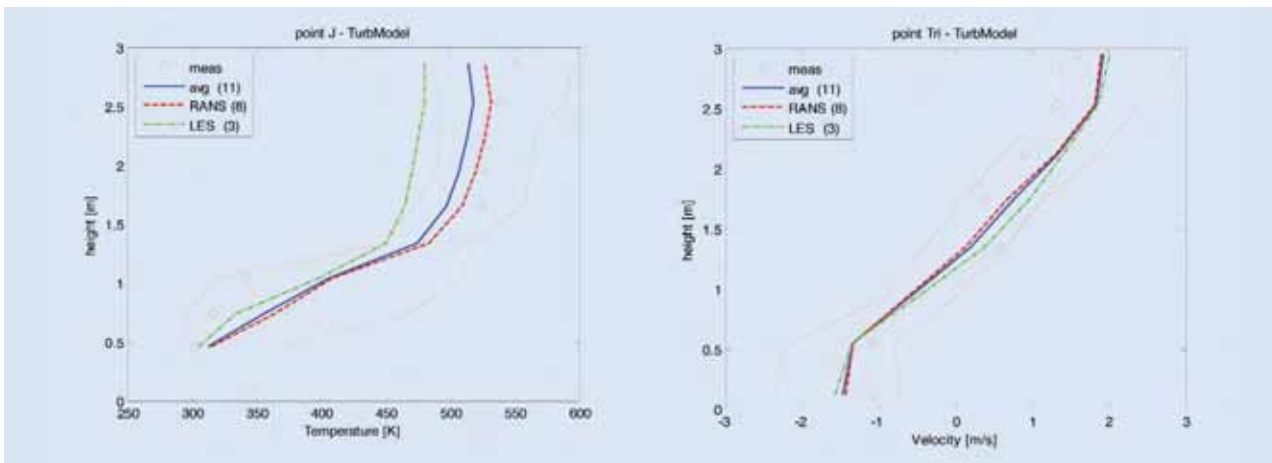
Deelnemers, CFD-code

In totaal zijn van twaalf deelnemers uit elf bedrijven de resultaten ontvangen van hun onderzoek naar de Heselden casus met behulp van CFD. De meeste deelnemers hebben meer dan drie jaar ervaring in het gebruik van CFD. Binnen de bedrijven van de deelnemers was toepassing van CFD vooral gericht op fire safety engineering. Er is in deze studie een duidelijk

tweedeling in de toegepaste typen pakketten. Enerzijds zijn dit commerciële CFD-pakketten, voornamelijk gebaseerd op RANS¹-technieken voor de modellering van turbulentie. Van dit type valt op dat Phoenics het meest wordt toegepast. Het andere type pakket is Fire Dynamics Simulator (FDS) dat gratis te verkrijgen is bij NIST (2007). FDS gebruikt de LES²-techniek voor de modellering van turbulentie. In deze studie werd beoogd ten minste drie verschillende pakketten op te nemen. Voor deze casus zijn in totaal vier verschillende CFD-codes gebruikt.

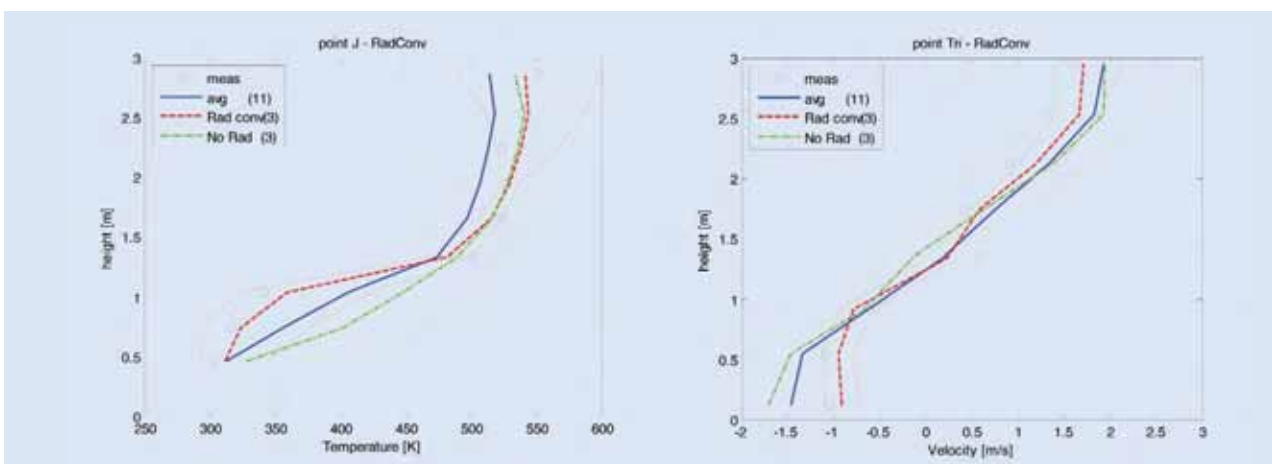
Probleemdefinitie en vertaling in model

De deelnemers hebben enkele aspecten in modellering van het stromingsprobleem op een verschillende wijze behandeld. Hieronder zullen enkele van die aspecten kort worden toegelicht. Een uitgebreidere beschrijving van de andere aspecten is gegeven in



Onderscheid in de wijze van turbulentiemodellering, RANS versus LES.

- FIGUUR 5 -



Onderscheid in verdiscontering straling, straling convectief verdisconteerd versus geen effect straling verondersteld.

- FIGUUR 6 -

[3]. In de discussie zal ook op deze aspecten worden ingegaan. Bij de geometrie is voornamelijk variatie terug te vinden in de modellering van de buitenruimte. Doel van het modelleren van een dergelijke ruimte is om het stromingsveld nabij de opening naar het brandcompartiment zich nagenoeg volledig onafhankelijk van de randcondities te kunnen laten ontwikkelen. Een scheiding in resultaten van de deelnemers is mogelijk, tussen situaties waarbij de buitenruimte in het geheel niet/of even hoog als het brandcompartiment is gemodelleerd en tussen situaties waarbij een hoge buitenruimte is meegemodelleerd. Het effect daarvan op de numerieke resultaten is zichtbaar gemaakt in de grafieken in figuur 3. Hierbij is een selectie gemaakt in de beschikbare datasets van de deelnemers. In deze selectie is de ruimte ofwel gemodelleerd als een relatief hoge en grote buitenruimte, ofwel zonder buitenruimte of een buitenruimte met een hoogte

gelijk aan de binnenruimte. In de legenda van iedere grafiek staat tussen haakjes steeds aangegeven hoeveel datasets onderdeel uitmaken van de individuele selecties. De verschillende datasets worden met een gemiddelde waarde en de overall minimum en maximum waarde voor de specifieke datasets gerepresenteerd (dit betekent dus niet dat deze lijn in alle gevallen één dataset representeert). De dikke lijn is hierbij de gemiddelde waarde, de dunne lijn met dezelfde kleur en stijl geeft de minimum/maximum waarde weer. In alle gevallen wordt het gemiddelde van alle datasets en de meetwaarden in de grafieken weergegeven ter referentie.

In de resultaten komen verschillende wijzen van modellering van de brand terug. Een duidelijke tweedeling is te zien in de aanpak van de zogenaamde Volumetric Heat Source en in de modellering van de brand aan een (laag) blokvormig oppervlak (zie

figuur 4). Voor deze aanpak is informatie gegeven over de hoogte die hiervoor kon worden gebruikt. Uit de resultaten is duidelijk dat deze informatie niet altijd is gebruikt. In een enkel geval is een verbrandingsmodel ingezet.

Oplossingsmethodiek

Belangrijke onderdelen van de toepassing van CFD zijn de discretisatie van het probleem, het gehanteerde turbulentiemodel en aanverwante submodellen. Enkele van deze aspecten zullen hier kort worden besproken. Een uitgebreidere beschrijving van de andere aspecten is gegeven in [3]. In de discussie zal ook op deze aspecten worden ingegaan. De wijze van turbulentiemodellering is gerelateerd aan de toegepaste CFD-code. FDS maakt gebruik van de LES-techniek, de overige codes hebben RANS als basis. In alle gevallen is gekozen voor het standaard k-ε model of een afgeleide daarvan. Figuur 5 geeft de vergelijking weer voor dit onderdeel.

Aspect	Keuze
Brand	Een verbrandingsmodel zou de beste keuze zijn geweest voor deze kleine ruimte. In plaats daarvan is een 'volumetric heat source' een goede keuze. Deze aanpak is vooral bruikbaar wanneer de interesse in de resultaten verder van de brandhaard af ligt.
Buitenruimte	Modellering van een hoge en voldoende grote buitenruimte voorkomt dat de stroming naar de brandruimte wordt beïnvloed door de opgelegde randcondities.
Randvoorwaarden wand	Op basis van de voorgeschreven condities moet in ieder geval niet worden gekozen voor een adiabatische benadering.
Randvoorwaarden opening	Een drukrandvoorwaarde op voldoende grote afstand van de opening naar de brandruimte levert de meest reële situatie voor het geschetste stromingsprobleem.
Grid	De geschetste situatie was 2D en mag als zodanig worden gemodelleerd als de gebruikte code daarvoor wordt vertrouwd. Met een 3D-benadering kunnen vragen hierover worden weerlegd. De minimale gridgrootte dient normaal gesproken met een gridstudie te worden bevestigd, tenzij uit eerdere studies van vergelijkbare situaties een duidelijke richtlijn omtrent de gridgrootte bekend is.
Turbulentie	Zowel RANS als LES berekenen vergelijkbare resultaten voor het onderzochte stromingsprobleem. De onderschatting van de rooklaagtemperatuur voor LES wordt voornamelijk gerelateerd aan de wijze waarop de brand is gemodelleerd en straling wordt verdisconteerd.
Straling	Modellering van de straling was voor deze casus niet eenduidig aangezien informatie over de brand niet volledig was. De correctie in het convectieve brandvermogen vormt in een dergelijk geval een goed alternatief, zeker wanneer de interesse in het stromingsveld verder van de brandhaard af ligt.
Oplossen	Om numerieke diffusie te beperken kan bij voorkeur gebruik worden gemaakt van hogere orde discretisatieschema's. Dit is ook gerelateerd aan het grid. Het nadeel van dergelijke schema's is dat het oplosproces hierdoor vaak minder stabiel verloopt.

Keuzes best practice voor 1^o casus.

- TABEL 1 -

Best practice	# punten	# aspecten gewaardeerd	# aspecten informatie onbekend
Beste (Overall)	9-11	8	0
Beste (RANS)	9-10	7-8	0
Minste	5-6	4-5	0-1

Samenvatting waardering in vergelijking tot best practice.

- TABEL 2 -

Straling vormt een belangrijk aspect in de warmtebalans bij een brand. In de berekening kan straling op verschillende manieren worden verdisconteerd.

De meest gedetailleerde aanpak gaat uit van een afzonderlijk stralingsmodel. In plaats van een stralingsmodel kan het effect van straling worden ver-

disconteerd door op het totale brandvermogen een correctie te maken. In dat geval wordt er geen stralingsmodel meegenomen in de berekening, maar wordt het convectieve deel van het brandvermogen gedefinieerd. In figuur 6 is een vergelijking gemaakt tussen resultaten waarbij geen correctie op het brandvermogen is gemaakt voor straling, en resultaten waarbij het aangegeven stralingsaandeel op het totale vermogen in mindering is gebracht. In beide situaties is er dus geen sprake van een stralingsmodel.

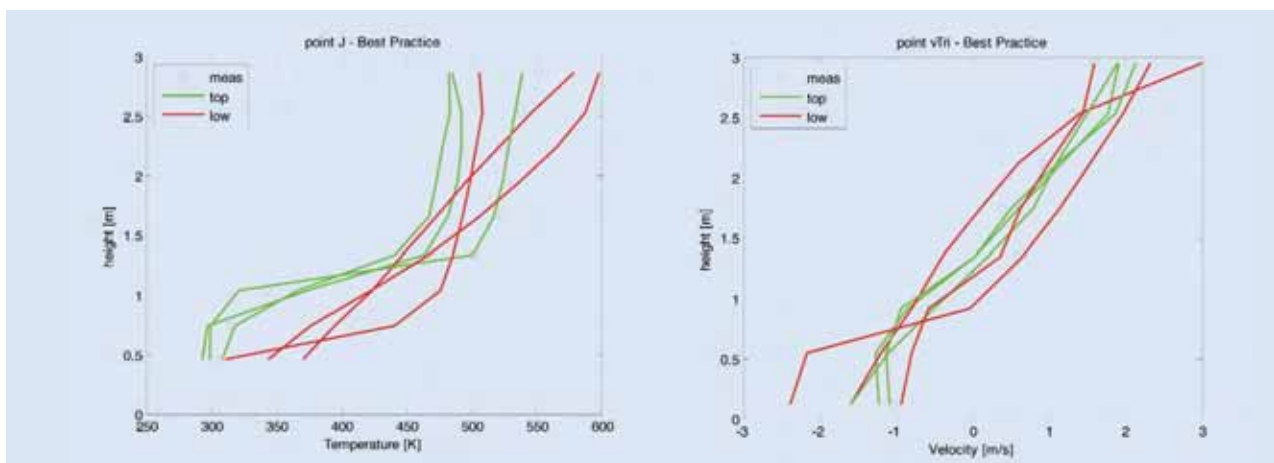
DISCUSSIE

In deze paragraaf zal eerst een korte discussie worden gegeven van de hierboven gepresenteerde resultaten. Daarna volgt een meer algemene beoordeling van de resultaten.

Vergelijking individuele aspecten

Een ruime meerderheid van de deelnemers heeft voor het stromingsprobleem een hoge buitenruimte meegemodelleerd. Wanneer echter de gemiddelde resultaten onderling worden vergeleken, dan lijkt het effect daarvan op de resultaten beperkt. Er kan op basis van de vergelijking geen significant verschil worden gevonden tussen het wel of niet meenemen van de buitenruimte.

Het uitgangspunt van de referentiestudie was om deze in het bijzonder te richten op het modelleren van rooken warmtetransport en niet op de modellering van de brand zelf. De beschikbare informatie over de feitelijke brand was voor deze casus beperkt. De Heselden-casus is een situatie (i.e. relatief kleine ruimte) waarbij die veronderstelling wellicht beperkt geldig is en de brand uiteindelijk beter kan worden gespecificeerd voor een goede vergelijking met de meetresultaten. De beschikbare informatie over de daadwerkelijke brand in het experiment was echter beperkt en niet volledig. Dit betekent dat een werkelijke modellering van de brand (met brandstof) op basis van deze informatie niet goed mogelijk was. In de omschrijving van de brand is ervoor gekozen om vooral informatie te verstrekken over het brandvermogen (geen indicatie over rook). Daarbij is uiteindelijk ook informatie gegeven over het stralingsaandeel van dit brandvermogen. De invloed van de wijze van modelle-



Vergelijking van datasets na beoordeling volgens best practice (overall). ('top' is beste [overall] en 'low' is minste)

- FIGUUR 7 -

ren van de brand laat geringe verschillen zien. Dit vertaalt zich voornamelijk in de stratificatie van de temperatuur (i.e. het aanwezig zijn van een duidelijke rooklaag). In het geval er wordt gekozen voor een brandvolume is de scheiding van de rooklaag wat scherper. Overigens moet hier wel aan worden toegevoegd dat het gehanteerde brandvolume tussen diverse deelnemers verschilt.

In de vergelijking van de resultaten voor de verschillende turbulentiemodellen zijn nagenoeg geen verschillen te vinden in de gemiddelde snelheden. Wel is de temperatuur in de rooklaag bij de LES-resultaten ongeveer 50 K lager dan voor de datasets die met een RANS-modellering zijn berekend. De verklaring hiervoor moet naar verwachting niet direct worden gevonden in de turbulentiemodellering, maar in de brandmodellering.

Een geringer brandvermogen, indien straling wordt verdisconteerd op het convectieve brandvermogen, zou zich normaal gesproken vertalen in lagere rookgastemperaturen. Echter, er zal in dat geval ook sprake zijn van een geringere vrije convectiestroming waarmee in dit geval minder koelvermogen in de brandruimte wordt geïnduceerd. Hierdoor zal de gemiddelde temperatuur in de rooklaag hoger zijn. Bovendien wordt bij het wel verdisconteren van de warmtestraling, een groot deel van de stralingshitte aan de wanden, vloer en plafond afgegeven. Doordat deze oppervlakken op een constante temperatuur zijn gehouden en vrijwel 'zwart' zijn, kan deze hitte ook niet meer via de wanden (door extra opwarming van de wanden) als nog weer worden afgegeven aan de

rookgassen en toevoerlucht in de ruimte. De resultaten lijken deze redenering te onderbouwen. Voor de temperaturen blijven de gemiddelde verschillen bij het wel of niet verdisconteren van de straling relatief beperkt. Bij de snelheden is duidelijk dat in geval van het niet meenemen van straling er hogere snelheden nabij de vloer en het plafond worden berekend. In dit geval geeft het corrigeren voor de straling een betere overeenkomst met de gemeten snelheden.

BEST PRACTICE

In de voorgaande bespreking zijn enkele voorbeelden gegeven van de vergelijking van de datasets op de individuele aspecten van de modellering van het stromingsprobleem. Een meer gespecificeerde en combinatie van aspecten wordt minder zinvol geacht, gezien de beperkte hoeveelheid datasets. Wanneer een selectie op meerdere aspecten wordt gemaakt en vergeleken, dan zou het aantal beschikbare datasets voor de vergelijking te beperkt worden.

In plaats daarvan is gekozen voor de definitie van een 'best practice' die op basis van het stromingsprobleem mag worden verondersteld. In deze best practice wordt voor verschillende aspecten aangegeven welke modelleringwijze de voorkeur heeft. De individuele datasets worden hiertegen gewaardeerd.

Tabel 1 geeft een samenvatting van de mogelijke 'best practice' keuzes voor deze casus. Merk op dat het soms op basis van efficiency niet mogelijk is om alle 'best practice' aspecten toe te passen. Inzicht in de consequenties

hiervan is dan wel nodig. Per CFD-resultaat is vervolgens een waardering gegeven voor de keuze bij verschillende aspecten zoals hierboven besproken. In totaal zijn op die manier maximaal negen (gecombineerde) aspecten gewaardeerd. Voor een deel is ook een extra gewicht gegeven aan bepaalde keuzes. Daarmee zijn in totaal maximaal twaalf punten te behalen. Een toelichting hierop is gegeven in [3]. De keuze voor de beste en minste drie datasets is uiteindelijk bepaald door het aantal punten dat uit de waardering is verkregen, gecombineerd met het aantal aspecten waarvoor een waardering wordt gegeven. Naast een overall best practice is er ook een selectie gemaakt specifiek voor de datasets die zijn verkregen met RANS-modellen. In tabel 2 wordt een samenvatting gegeven van de waardering. In figuur 7 worden de geselecteerde datasets voor de overall best practice grafisch weergegeven.

De overeenkomst in de datasets van de beste drie overall best practice laat zien dat verschillende gebruikers overeenkomstige resultaten voor het gedefinieerde stromingsprobleem kunnen verkrijgen. In vergelijking met de minste drie datasets wordt een duidelijke en scherpe rooklaag berekend. Dit is in overeenstemming met het verloop van de gemeten temperaturen. De beste drie resultaten zijn verkregen met verschillende CFD-codes.

Het is opvallend dat tussen de drie beste datasets de verschillen in de rooklaagtemperatuur toenemen op punten op grotere afstand van de brandhaard (punt J, K [niet afgebeeld]). Het verschil tussen deze data-

sets laat zich in het bijzonder verklaren door het verschil in de modellering van de straling. De twee datasets met een lagere rooklaagtemperatuur op positie J en K maken gebruik van een stralingsmodel om straling te verdisconteren. In de andere dataset is straling verdisconteerd in het convectieve deel van het brandvermogen. Dit aandeel is geringer dan met een stralingsmodel wordt bepaald. Daarnaast is voor deze dataset de randvoorwaarde voor de wanden iets afwijkend. Doordat gebruik wordt gemaakt van een externe temperatuur en warmteoverdrachtscoëfficiënt, zal er sprake zijn van een geringer energieverlies over de wand.


De minste drie datasets laten een grotere spreiding zien, zowel in het temperatuurverloop als in het snelheidsveld. Zeker nabij de brandhaard is er geen sprake van een duidelijke (scherpe) rooklaag en is er weinig overeenkomst met het gemeten temperatuurverloop over de hoogte. Opvallend is dat voor twee van de drie datasets de brand is gemodelleerd als een oppervlak in plaats van een volume. Dit pleit voor de keuze van een volumetrische benadering.

CONCLUSIE

De resultaten en de discussie laten zien dat het mogelijk is om voor een (relatief) gedetailleerd beschreven stromingsprobleem, overeenkomstige resultaten te verkrijgen van verschillende gebruikers van een CFD-code. De gebruikte CFD-code is daar relatief onafhankelijk van. Opvallend is wel dat ondanks de vergelijkbare best practice aanpak er toch nog significante verschillen optreden. Dit relateert aan het ontbreken, dan wel een verschillende interpretatie van onderdelen van het stromingsprobleem.

In de praktijk zullen dergelijke verschillen in interpretatie waarschijnlijk een nog belangrijkere positie innemen. Het is in dat geval belangrijk om kennis te kunnen nemen van de uitgangspunten die ten grondslag hebben gelegen aan de CFD-resultaten en de aannames die daarbij zijn gemaakt. Een overzicht van berekeningsdetails en -keuzes zoals weergegeven in Bijlage D van de Ontwerp NEN 6098 (NEN, 2007) kan hieraan bijdragen. Het is dan nog wel van belang dat ook dege-
ne die de resultaten gebruikt tot op

zekere hoogte deze details en keuzes op waarde kan schatten.

De referentiestudie is inmiddels vervolgd met een tweede meer complexe casus. 

ACKNOWLEDGMENT

Dit onderzoek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de welwillende medewerking van de deelnemers en hun werkgevers, die hen de mogelijkheid hebben geboden om in deze studie te participeren.

REFERENTIES

1. Kobes, M. , Rosmuller, N., Schokker, J.J., Vliet, V.M.P. van. 2006. *Verkenning van simulatiemodellen: Brand- en rookontwikkeling, evacuatie- en interventiemodellering*. Versie 442N6001/30-08-06. Nederlands Instituut Fysieke Veiligheid Nibra, Arnhem, Nederland.
2. Heselden, A. J. M. 1972. *Fire problems of pedestrian precincts. Part 1. The smoke production of various materials*. Joint Fire Research Organisation, Fire Research Station. Fire Research Note 856.
3. Loomans, M., Lemaire, A.D. , Plas, M. v.d. 2008. *referentiestudie NIFV | IBPSA-NVL | TU/e - Deelrapportage Resultaten 1e casus (Heselden casus)*, NIFV, Arnhem, Nederland.
4. Markatos, N. C., Malin, M. R., Cox, G. 1982. *Mathematical Modelling Of Buoyancy-Induced Smoke Flow In Enclosures*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 25 No.1, Pp.63-75.
5. NEN. 2007. *Ontwerp NEN 6098 – Rookbeheersingssystemen voor mechanisch geventileerde parkeergarages*. Versie uitsluitend voor commentaar. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.
6. NIST. 2007. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. NIST Special Publication 1019-5. October 2007. National Institute of Standards and Technology, Washington DC, USA.

NOTEN

- ¹ RANS: Reynolds-Averaging Navier Stokes.
- ² LES: Large Eddy Simulation.