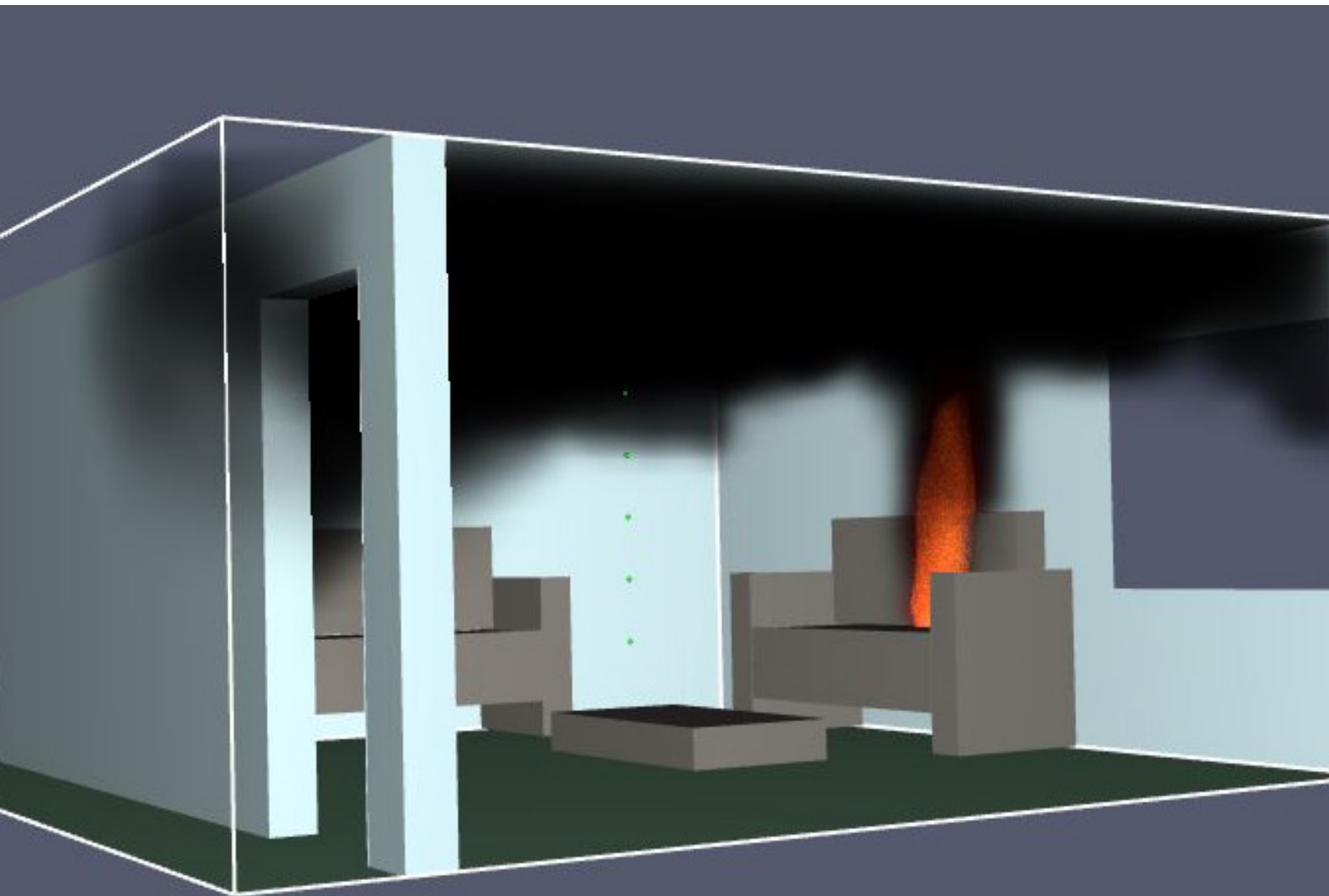




BRANDWEER

Brandweeracademie

Hulpdocument beoordeling CFD-simulaties



Instituut Fysieke Veiligheid
Brandweeracademie
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Brandweeracademie (2021). *Hulpdocument beoordeling CFD-simulaties*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

Opdrachtgever: Community of Practice Fire Safety Engineering (COP FSE)
Contactpersoon: M. Leene BBA (Brandweeracademie)
Titel: Hulpdocument beoordeling CFD-simulaties
Datum: 12 augustus 2021
Status: Permanent bèta
Versie: 1.0
Auteurs: Ing. J.M. Bellos (Veiligheidsregio Twente), Ir. A. Barreveld (Veiligheidsregio Haaglanden),
Projectleider: Ing. H.L. de Witte (Brandweeracademie)
Review: Leden van de COP FSE (diverse veiligheidsregio's), Ir. R. van Herpen (TU Eindhoven), Ir. P. van Rede (Altavilla B.V.), Ir. N. Tenbült (Altavilla B.V.), Ir. D. Steeghs (SPA WNP ingenieurs), ing. R. van Liempd (Brandweeracademie), Ing. H.L. de Witte (Brandweeracademie)
Eindverantwoordelijk: Ing. R. Hagen MPA (Brandweeracademie)

Voorwoord

Voor u ligt het *Hulpdocument beoordeling CFD-simulaties* voor branden. Dit document is tot stand gekomen vanuit een behoefte bij de Community of Practice Fire Safety Engineering (COP FSE) aan het verzamelen van kennis over en hulp bij het beoordelen van CFD-brandsimulaties. In deze COP FSE werken de FSE specialisten van de veiligheidsregio's en de Brandweeracademie samen om kennis over FSE te verhogen en meer uniform toe te passen in Nederland.

De COP FSE is opgericht om laagdrempelig kennis te ontwikkelen, delen en verspreiden. Dit document past in deze doelstelling van de COP FSE en is geschreven door mensen in de COP FSE. De onderzoekers van de Brandweeracademie hebben opgetreden als begeleiders en als reviewers. Het document wordt uitgebracht onder de vlag van de Brandweeracademie.

Dit document is, zoals de titel al aangeeft, bedoeld als een hulp bij het beoordelen van CFD-simulaties. Het is bedoeld als richtinggevend en niet als een norm. Het document heeft verder de status 'permanent bèta'. Deze status geeft aan dat het document blijvend in ontwikkeling is. Vanwege de ontwikkeling van CFD-softwarepakketten is het namelijk nooit af. Opmerkingen en aanvullingen mogen gemaild worden aan cop-fse@ifv.nl onder vermelding van 'hulpdocument beoordeling CFD-simulaties'. De COP FSE zal zorgdragen voor het actueel houden van dit document.

Wij hopen dat dit document een goede hulp gaat zijn voor de adviseurs in de veiligheidsregio's die CFD-simulaties beoordelen. Dank gaat uit naar Jean-Michel Bellos (veiligheidsregio Twente) en Arjen Barreveld (veiligheidsregio Haaglanden) die dit document geschreven hebben. Dank gaat ook uit naar de mensen die dit document gereviseerd hebben (zie colofon).

René Hagen
Lector brandpreventie
Brandweeracademie (IFV)

Inhoud

	Inleiding	5
1	Beoordeling CFD-simulatie	6
1.1	Algemene aandachtspunten proces	6
1.2	Processtappen	7
1.3	Inhoudelijke aandachtspunten beoordelen CFD-simulatie	8
	Bijlage 1 Informatie CFD-softwarepakketten	19
	Bijlage 2 Indicatieve toetscriteria	20
	Bijlage 3 Aandachtspunten grid bepalen	23
	Bijlage 4 Termenlijst	25

Inleiding

Dit hulpdocument is bedoeld als ondersteuning voor adviseurs van de brandweer bij het beoordelen van CFD-brandsimulaties (computational fluid dynamics). Dit document behandelt het beoordelingsproces (wanneer moeten welke vragen gesteld worden?) maar beoogt ook handvatten te bieden voor de inhoudelijke beoordeling. Brandweeradviseurs kunnen met dit document beter beoordelen waar onjuist- of onzekerheden zitten in CFD-simulaties.

Het maken van CFD-simulaties is een complexe taak. Er moet goed beoordeeld worden of de berekening en het model geschikt zijn voor hetgeen men te weten wil komen. De invoergegevens moeten een juiste afspiegeling van de praktijk zijn en de uitvoergegevens moeten op een juiste manier geïnterpreteerd worden. Met CFD-brandsimulaties kan met beperkte ervaring weliswaar veel berekend worden, maar de uitkomsten kunnen dan onbetrouwbaar zijn. Als waarborg voor een juist gebruik van CFD-simulaties en een goede kwaliteit ervan, is een gedegen beoordeling door de adviseur van de veiligheidsregio belangrijk. Ter ondersteuning van deze beoordeling is door de COP FSE dit hulpdocument ontwikkeld. Dit hulpdocument bevat aandachtspunten en tips voor het beoordelen van CFD-simulaties door de brandweer. Deze punten zijn verzameld tijdens de dagelijkse praktijk van het beoordelen. Een CFD-simulatie is vaak onderdeel van een risicogerichte benadering. Vanwege dit verband zijn er ook aandachtspunten benoemd voor de risicogerichte benadering.

Dit document bevat aandachtspunten voor het proces (paragraaf 1.1 & 1.2) en aandachtspunten voor de inhoudelijke beoordeling (paragraaf 1.3). De aandachtspunten gericht op de inhoud zijn ingedeeld op grond van de wijze waarop een CFD-simulatie wordt uitgevoerd:

- > Doel berekening, methode en toets criteria (paragraaf 1.3.1)
- > Het CFD-softwarepakket (paragraaf 1.3.2)
- > De invoer in het model (paragraaf 1.3.3)
- > De uitvoer / het resultaat (paragraaf 1.3.4)

In bijlage 1 is verder informatie gegeven over de verschillende CFD-softwarepakketten (bijvoorbeeld over de turbulentiemodellen). In bijlage 2 zijn indicatieve criteria opgenomen die als meetbare toetscriteria kunnen worden gebruikt in een risicoanalyse. In bijlage 3 wordt aandacht besteed aan de keuze van de grid en tot slot zal in bijlage 4 een lijst met termen worden opgenomen.

1 Beoordeling CFD-simulatie

1.1 Algemene aandachtspunten proces

Bij het proces van het beoordelen van een CFD-simulatie zijn de volgende algemene aandachtspunten en tips te geven:

- > Om de doelstellingen, afgeleide doelstellingen en de bijbehorende risico's en de context van het CFD-onderzoek scherp te krijgen, is het essentieel om de belangrijkste belanghebbenden in een vroeg stadium bij besprekingen uit te nodigen. Mogelijke belanghebbenden zijn: de eigenaar of gebruiker, de opsteller van de CFD-simulatie, de brandveiligheidsadviseur en het bevoegd gezag.
- > Probeer overeenstemming te krijgen over de uitgangspunten bij het CFD onderzoek alvorens berekeningen worden uitgevoerd. Hoe later in het ontwerpproces een belanghebbende aansluit, hoe moeilijker er nog wijzigingen gedaan kunnen worden. Een aanpassing in de uitgangspunten voor de CFD-simulatie achteraf leidt vaak tot het opnieuw uit moeten voeren van de simulatie, hetgeen veel tijd kost.
- > De scope en doelstelling van de CFD-simulatie moeten op voorhand duidelijk zijn. Wat wil de aanvrager aantonen met zijn berekening? Betreft het bijvoorbeeld het temperatuursverloop en/of de rookdichtheid in een ruimte of betreft het de (mate van) rookbuffering of rookverspreiding tussen ruimten?
- > Een brand is een dynamisch proces, dat afhankelijk is van een groot aantal variabelen. De CFD-simulatie betreft slecht een theoretische benadering van het verbrandingsproces, evenals de hiermee samenhangende effecten voor wat betreft temperatuuropbouw en rookverspreiding. Er dient rekening te worden gehouden met een mate van onzekerheid en onnauwkeurigheid in de meetresultaten.
- > Menselijk gedrag (bijvoorbeeld het openen van een deur om te kunnen vluchten) kan van invloed zijn op de brand, de rookverspreiding et cetera. Dit moet niet vergeten worden om mee te nemen in de CFD-simulatie.
- > Kijk goed wat er in het echt kan gebeuren en wat daarvan moet worden meegenomen in de CFD-simulatie. Als een wand hogere temperaturen krijgt te verduren dan hij kan weerstaan, dan zal de wand bezwijken. De terugkoppeling van resultaten naar de werkelijke omgeving moet niet vergeten worden.
- > Een CFD-simulatie geeft inzicht in het ontstaan en de verspreiding van rook en warmte door de ruimte. Wanneer ook de temperatuuropbouw in de constructie van belang is, dan is dat van invloed op de keuze voor een bepaald rekenmodel. De meest toegepaste CFD-softwarepakketten geven op dit punt slechts een rudimentaire benadering. Bovendien is het vaststellen van de thermische en mechanische respons van de constructies ten gevolge van de temperatuuropbouw, zeer lastig. De adviseur zal aannemelijk moeten maken dat hij/zij in staat is om tot betrouwbare conclusies te komen.
- > Het is aan de aanvrager om te zorgen dat alles duidelijk verwoord en goed onderbouwd wordt in rapportages van de CFD-simulatie of in de uitgangspunten van de berekening. Wanneer de CFD-simulatie onderdeel is van een aanvraag voor een omgevingsvergunning voor de activiteit bouwen dan kan er, om te verantwoorden waarom er meer informatie nodig is voor een goede beoordeling, eventueel gekeken worden naar artikel

2.10 evenals 2.1, lid 1 en 2.2, lid 7, sub a van de Regeling omgevingsrecht¹, waarin algemene eisen staan gesteld aan berekeningen.

- > Het kennisniveau van de CFD-gebruiker is bepalend voor de kwaliteit van het onderzoek.
- > Bij twijfel over het beschikken over voldoende kennis kan altijd een COP-FSE-collega op persoonlijke titel benaderd worden. Ook een second opinion of peer review² door een ander particulier bedrijf of adviesbureau kan tot de opties behoren.

1.2 Processtappen

Het proces van het beoordelen van een CFD-simulatie bestaat in principe uit twee stappen:

Stap 1: Het beoordelen van toetscriteria, randvoorwaarden en uitgangspunten van de CFD-simulatie. Denk hierbij aan de volgende punten en bijbehorende onderbouwing die aangeleverd moeten worden:

- a. Is een CFD-simulatie wel nodig? Of zijn er wellicht betere (eenvoudiger) modellen die gebruikt kunnen worden?
- b. Het doel van de berekening en de relatie met het kenmerkschema (gebouw-, mens-, omgevingskenmerken, et cetera) en het bijbehorende brandbeveiligingsconcept.
- c. Toetscriteria (toetsbare criteria wanneer het doel behaald wordt), inclusief een bepaling van de benodigde veiligheidsmarge en/of gevoeligheidsanalyse.
- d. Geschiktheid van het model voor de gekozen toepassing (verificatie en validatie).
- e. Keuze van de celafmeting en het tijdstapmodel en de wijze waarop deze worden gekozen.
- f. Brandscenario's en de invoer ten aanzien van de brand.
- g. De wijze waarop installaties worden meegenomen en gemodelleerd (brandbestrijding, rookbeheersing et cetera).
- h. Gebouw en eventuele vereenvoudigingen daarvan.
- i. Omgevingskenmerken (wind, drukverschil, et cetera).
- j. Welke uitvoergegevens zullen aantonen dat (al dan niet) aan gestelde doel- en/of toetscriteria voldaan wordt? Hoe worden hieruit conclusies getrokken? Wordt een gemiddelde over een aantal cellen berekend of wordt een maximum waarde genomen uit één cel?

Het uitvoeren van CFD-simulaties is een tijdrovende, kostbare en complexe bezigheid. Om achteraf discussie te voorkomen over de gebruikte modellen, input of output, is het nodig om voorafgaand aan het uitvoeren van de CFD-simulaties de uitgangspunten van de simulatie ter goedkeuring voor te leggen aan het bevoegd gezag. Op die manier wordt voorkomen dat CFD-simulaties opnieuw uitgevoerd moeten worden. Aandachtspunten bij de hierboven genoemde punten zijn te vinden in paragraaf 1.3, 'inhoudelijke aandachtspunten beoordelen cfd-simulatie'.

Stap 2: Beoordelen van de CFD-simulatie als geheel.

In deze beoordeling wordt gekeken of er is gewerkt volgens de vastgestelde uitgangspunten (is er gerekend volgens de afspraken?) en of de output voldoet aan de vooraf bepaalde toetscriteria. De aandachtspunten bij deze beoordeling zijn te vinden in paragraaf 1.3, 'inhoudelijke aandachtspunten beoordelen cfd-simulatie'.

¹ [Regeling omgevingsrecht; algemene vereisten in verband met berekeningen.](#)

² The Institution of fire engineers (2014). [Handreiking Peer Review voor het Fire Safety Engineering voor ontwerp proces.](#)

Op het moment dat de uitgangspunten niet op voorhand zijn besproken en ter goedkeuring zijn voorgelegd, moeten de punten uit stap 1 alsnog beoordeeld worden wanneer de rapportage van de CFD-simulatie ingediend wordt.

Kom je er als adviseur van de brandweer niet uit, schroom dan niet om hulp of om een second opinion te vragen. Zie ook paragraaf 1.1 'algemene aandachtspunten proces'.

1.3 Inhoudelijke aandachtspunten beoordelen CFD-simulatie

Naast de aandachtspunten en tips bij het proces van het beoordelen van CFD-simulaties, zijn er ook aandachtspunten en tips over de inhoudelijke beoordeling. Deze worden in deze paragraaf besproken.

1.3.1 Doel van de berekening, methode en toetscriteria

Een CFD-simulatie wordt met een bepaald doel uitgevoerd. Vaak wordt een CFD-simulatie uitgevoerd om te onderbouwen dat er aan een bepaald doel wordt voldaan.³ Om een CFD-simulatie goed te kunnen toetsen, moeten zaken rondom het doel en de methode die gebruikt wordt helder zijn vastgelegd. Hierbij zijn er de volgende aandachtspunten en tips⁴:

- > Een goede definitie en analyse van de (brand)risico's zijn van belang. Wanneer mogelijke brandrisico's kunnen worden geëlimineerd, is een CFD-simulatie wellicht overbodig*¹

*1: Een op dit moment gebruikelijke methode om de (brand)risico's te analyseren is een kwalitatieve beoordeling (het beschrijven van het scenario zonder daarbij kansen toe te kennen). Maak hiervoor bijvoorbeeld gebruik van het kenmerkschema van het IFV en benader de brandveiligheidsrisico's vanuit brand-, gebouw-, mens-, interventie- en omgevingskenmerken en de onderlinge samenhang van deze kenmerken. Een probabilistische (kwantitatieve) risicoanalyse heeft vanwege het meenemen van de kans in de risicoanalyse bijkomende voordelen ten opzichte van een kwalitatieve risicoanalyse.

- > Wellicht kan met een eenvoudiger model een betrouwbaarder resultaat worden verkregen. Denk bijvoorbeeld aan (multi)zone modellen. Of dit mogelijk is hangt er ook van af bij welke andere modellen de CFD-simulatie moet aansluiten. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het combineren van een CFD-(veld)model met Pathfinder/Simulex, een CFD- met een FEM-model of het combineren van CFAST-(zone)model met OntruimMR. Het combineren van veld- en zonemodellen is niet wenselijk.
- > De doelstellingen moeten zo goed mogelijk worden ingekaderd en expliciet gemaakt. Het is aan te raden om hoofddoelen te vertalen naar subdoelen.⁵
- > Het beoordelingskader of de gekozen toetscriteria dienen te worden onderbouwd. In bijlage 2 is meer informatie opgenomen over verschillende toetscriteria.
- > De gebruiker en de toetsende instantie dienen zich te realiseren dat de rekenresultaten uit de CFD-simulatie en de daarmee samenhangende conclusies lang niet altijd een betrouwbare en realistische weergave van de werkelijkheid zijn. De resultaten zijn naast

³ Available Safe Egress Time (ASET) – Required Safe Egress Time (RSET).

⁴ Voor aanvullende tips rondom FSE en risicogericht werken, zie hoofdstuk 3 van deel A van [Basis voor brandveiligheid. De onderbouwing van brandbeveiliging in gebouwen](#).

⁵ Veiligheid omgeving (buurpercelen); Veiligheid gebouw (draagstructuur); Veiligheid compartiment (uitbreidingsgebied van brand en rook); Veiligheid vluchtroutes (gebouwgebruikers); Veiligheid aanvalsroutes (hulpverleners).

het voldoende gevalideerd zijn van het model in hoge mate afhankelijk van de juiste invoer in de berekening. Een onjuiste invoer van brandontwikkeling, ventilatiemogelijkheden of wijze van energieoverdracht naar de omgeving, leidt tot onzekere of onjuiste rekenresultaten en daarmee tot onjuiste conclusies. De resultaten zijn, zelfs wanneer de invoer op de juiste wijze is ingegeven, niet altijd even betrouwbaar. Een viertal voorbeelden illustreert dit:

- a. Doorgaans wordt de brandontwikkeling niet gesimuleerd in een CFD-simulatie, maar wordt in de invoer opgelegd. Een veel gebruikte methode is het definiëren van een T²-fire met een bepaalde vermogensdichtheid en branduitbreidingssnelheid.⁶ Dit is echter niet de meest nauwkeurige modellering van brand(groei), maar gedetailleerdere methoden (chemische verbranding) zijn beperkt gevalideerd en vragen een gedetailleerde input. Hierdoor zijn deze methoden veelal niet goed bruikbaar in de ingenieurspraktijk.
 - b. Direct nabij de brandhaard zijn de rekenresultaten veel minder betrouwbaar. Dat geldt ook voor de rekenresultaten nabij uitslaande vlammen (uit openingen in de scheidingsconstructie).
 - c. De rekenresultaten voor de stralingsflux zijn in de meeste CFD-modellen evenmin erg betrouwbaar; voor warmtestraling wordt meestal een apart en vrij grof model gehanteerd.
 - d. Naarmate een brand langer duurt, zijn de rekenresultaten vanwege de onvoorspelbaarheid van het brandverloop vaak minder betrouwbaar.
- > De repressieve inzet (of de gevolgen voor deze inzet) moet beoordeeld worden in de risicoanalyse. Wanneer dit onvoldoende uit de CFD-simulatie gehaald kan worden, kan een kwalitatieve analyse op basis van 'de basisprincipes van brandbestrijding' gemaakt worden. Het is hierbij belangrijk om te beseffen dat de brandweer haar uiterste best doet tijdens een inzet, maar dat er nooit sprake kan zijn van een resultaatverplichting.
- > Omdat resultaten onzeker zijn, moet nagedacht worden over een veiligheidsfactor. De grootte van deze factor is enerzijds van afhankelijk hoe goed de berekening gevalideerd is, maar anderzijds van hoe onzeker de resultaten zijn en hoe groot het risico is. Als het gaat om veiligheid van mensen dan wordt er over het algemeen een grotere veiligheidsfactor aangehouden dan wanneer het gaat om schade door brand. De keuze voor de veiligheidsfactor moet gemotiveerd en onderbouwd worden. In NEN 6079 staat een voorbeeld van veiligheidsfactoren die bij een ASET – RSET-bepaling gebruikt kunnen worden (zie tabel 1.1 hieronder).

Tabel 1.1 Veiligheidsfactoren ASET - RSET bepaling (bron: NEN 6079: 2016)

Bepalingsmethode	Modelparameters	Nieuwbouw		Bestaande bouw	
		RSET ≤ 3 min	RSET > 3 min	RSET ≤ 3 min	RSET > 3 min
Vuistregelmethode	Conservatief (80 %) ^a	1,5	2,0	1,0	1,2
	Nominaal (50 %)	2,0	2,5	1,0	1,5
Alternatieve bepaling	Conservatief (80 %)	1,2	1,5	1,0	1,0
	Nominaal (50 %)	1,5	2,0	1,0	1,2

^a Een conservatieve oplossing is hier mogelijk omdat ASET nominaal of conservatief kan worden ingevuld, terwijl voor RSET alleen een nominale oplossing voorhanden is.

⁶ Adviesburo Nieman (2007). *Fysisch brandmodel*. Zwolle: Adviesburo Niemand B.V.

- > Om de gevolgen van de onzekerheid van de input op de resultaten te toetsen kan ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden. Door de berekeningen uit te voeren met andere input, kan beoordeeld worden wat deze voor gevolgen heeft voor de resultaten. Er zou gesteld kunnen worden dat het gebruik van een gevoeligheidsanalyse de voorkeur geniet boven het gebruik van een (tamelijk arbitrair gekozen) veiligheidsfactor.

1.3.2 CFD-softwarepakket

Er zijn veel verschillende CFD-softwarepakketten. Elke softwarepakket kent zijn eigen rekenregels, rekenmethodieken en toepassingsgebied. Deze zaken moeten goed vastgelegd en onderbouwd worden.

De volgende aandachtspunten en tips zijn hierbij te benoemen:

- > De keuze voor een CFD-softwarepakket hangt in de praktijk onder andere af van de kosten en de beschikbaarheid, de gebruikersondersteuning, validatie en de complexiteit van het probleem dat onderzocht wordt. Essentieel bij het kiezen van een CFD-softwarepakket is dat de software in voldoende mate is geverifieerd (rekent de software correct: $1 + 1 = 2$ en geen 3?) en gevalideerd⁷ (komen de resultaten overeen met een werkelijke situatie?) voor de toepassing waar de software voor gebruikt wordt.
- > Het is aan de aanvrager om aan te tonen dat de gebruikte software geschikt (gevalideerd) is voor hetgeen hij wil berekenen. De CFD-gebruiker kan gevraagd worden om aan te tonen dat hij/zij in staat is om, op basis van validatieberekeningen, tot realistische resultaten te komen. Bij het interpreteren van de resultaten moet rekening gehouden worden met de verificatie en validatie van het CFD-softwarepakket.
- > De mate van validatie kan per pakket verschillen. Het CFD-softwarepakket moet in ieder geval voldoende gevalideerd zijn voor het doel van de berekening. Ten tijde van het schrijven van dit document zijn bij de meeste CFD-softwarepakketten de volgende zaken niet of slechts in beperkte mate gevalideerd:
 - Brandverloop en branduitbreiding: de CFD-gebruiker voert vaak zelf het brandscenario in. Het brandverloop ligt daarmee vast en verandert niet door de omstandigheden tijdens de brand in de CFD-simulatie.
 - Sterk ondergeventileerde branden: de exacte grens is niet aan te geven, maar wanneer bekend is dat het gaat om een sterk ondergeventileerde situatie, dan moet er nauwkeurig gekeken worden hoe de gebruikte software hiermee omgaat.
 - De interactie met de scheidingsconstructie: hoe wordt in het CFD-model omgegaan met de thermische isolatie en thermische accumulatie van die scheidingsconstructie? Hoe wordt omgegaan met het bezwijkgedrag van niet-brandwerende delen in de scheidingsconstructie? En hoe wordt omgegaan met de luchtdoorlatendheid van de scheidingsconstructie?
 - De interactie van water met vuur (bijvoorbeeld bij een sprinkler of de inzet van de brandweer).
- > In zijn algemeenheid moet gekeken worden wat de nauwkeurigheid is van de simulatie. Met de (on)nauwkeurigheid moet rekening gehouden worden bij het bepalen van de veiligheidsfactor en in de gevoeligheidsanalyse.

1.3.3 Invoer in het model

Op het moment dat duidelijk is met welk doel een CFD-simulatie wordt gedaan en wanneer een geschikt CFD-softwarepakket is gekozen voor die toepassing, kan de invoer voor de

⁷ Voor FDS staat in de [Verification and validation guide](#) bijvoorbeeld informatie gegeven over de te verwachte (standaard)afwijkingen.

CFD-simulatie vastgesteld worden. De invoer die gekozen wordt, bepaalt in grote mate de uitvoer ofwel de resultaten van de CFD-simulatie. De invoer van de CFD-simulatie moet daarom goed beoordeeld worden. Hierbij zijn de volgende aandachtspunten en tips te benoemen:

Solver (tijdstappen, cellen, tijdsduur)

- > Bij elke CFD-simulatie is er de vraag of het gekozen rekenrooster voldoende fijn is. Het is gebruikelijk dat de CFD-gebruiker controleert of de rekencellen voldoende klein zijn voor die specifieke toepassing (of dat er eerder een controle uitgevoerd is bij een gelijksoortige toepassing). Wanneer kleinere rekencellen geen significante veranderingen geven, is de afmeting van de rekencellen juist. Vooraf kan met de CFD-gebruiker afgesproken worden welke maximale verschillen in temperatuur, luchtsnelheid, et cetera nog acceptabel zijn.
- > Bij CFD-softwarepakket met een LES (large eddy simulation)-turbulentiemodel (zoals bijvoorbeeld FDS) is er een vuistregel dat de karakteristieke diameter van de brandhaard ten minste 10 cellen^{*1} dient te bevatten. Hierbij wordt de karakteristieke diameter⁸ van de brandhaard gegeven door D^* .

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

*1: Alleen voor de omgeving rondom de brandhaard geeft dit een *indicatie*. Voor specifieke stromingen door openingen (zoals ventilatoren) en zones waar veel turbulentie optreedt, kunnen elders in het domein nog kleinere cellen noodzakelijk zijn.

- > Voor een CFD-softwarepakket met een RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes)-turbulentiemodel bestaat geen dergelijke vuistregel. Voor een tijdsgemiddelde k-ε-model (turbulentiemodel, zie het onderdeel turbulentie) is de nauwkeurigheid van de resultaten niet sterk afhankelijk van het warmtevermogen, waardoor de hierboven beschreven vuistregel niet geldt. In dat geval zijn echter de definitie van het turbulentiemodel en het inschatten van het vlamvolume weer lastig.

In bijlage 3 zijn aandachtspunten opgenomen voor het bepalen van de grid.

Omgevings- en startcondities

- > Zijn door de CFD-gebruiker de juiste omgevings- en startcondities ingevoerd? De omgevingsdruk en temperatuur spelen doorgaans geen rol van betekenis (bij brandomstandigheden). De windsnelheid en -richting spelen (mogelijk) wel een rol.
- > Wanneer het effect van de wind (bijvoorbeeld bij parkeergarages) van belang is, dan zullen wellicht de verschillende variabelen in windsnelheid en -richtingen, evenals de omliggende (bestaande en geplande) bebouwing moeten worden meegenomen. Het is aan de CFD-gebruiker om te motiveren in hoeverre de wind een rol van betekenis speelt, en hoe deze in de berekening al dan niet wordt meegenomen.
- > De grenzen van het rekenmodel, de 'open randen', dienen groter te zijn dan het beschouwde bouwkundige object, met als doel om ook de effecten van uittredende vlamlichamen en rookafvoer mee te kunnen nemen.

⁸ [FDS MESH SIZE CALCULATOR](#).

Gebouw

- > In hoeverre worden de geometrie-details meegenomen of versimpeld in de CFD-simulatie? Hierbij kan gedacht worden aan:
 - a. Wordt in een parkeergarage de invloed van de vloerbalken c.q. geparkeerde auto's meegenomen in een CFD-model (in positieve dan wel negatieve zin)?
 - b. Gebogen (ronde- of ovale) constructies zijn (afhankelijk van het CFD-softwarepakket en de gekozen grid) vaak niet of moeilijk te modelleren. Hoe wordt deze beperking in het model al dan niet buiten beschouwing gelaten? 'Stair skipping' (ronde vormen simuleren door middel van getrapte rechte vlakken) wordt in de praktijk veel toegepast, maar kan afwijkingen in de resultaten ten opzichte van de werkelijkheid geven.
 - c. Oeningen moeten zich houden aan de afmetingen van cellen, waarbij openingen uit meerdere cellen moeten bestaan om een realistische stroming te simuleren. Bij het invoeren van een opening kan het voorkomen dat de hoogte-breedteverhouding aangepast wordt, om op een juist oppervlak uit te komen. Wanneer deze verhouding verandert, kan dit invloed hebben op de hoeveelheid lucht die door de opening stroomt in bepaalde situaties.
 - d. Ook een (ventilatie)rooster wordt vereenvoudigd ingevoerd. Cellen zijn meestal niet klein genoeg om de structuur van een rooster in te kunnen geven. De aerodynamische eigenschappen van openingen (voorzien van een rooster) moeten mogelijk worden gecorrigeerd, zeker als deze in werkelijkheid minder zijn dan in het model het geval is.
 - e. In hoeverre worden de materiaaleigenschappen van de wanden ingegeven? Het adiabatisch invoeren van de wanden (in plaats van thermisch dikke- of dunne-constructies) kan een flinke invloed hebben op de temperatuur*¹ in de ruimte of die van de rooklaag. Het wel of niet meenemen van de materiaaleigenschappen is afhankelijk van de doelstelling van de CFD-simulatie. Hieronder zijn een aantal bekende materiaaleigenschappen weergegeven*².

*¹: Dit is met name gezien vanuit warmtetransport naar de wand. Mogelijk zijn effecten als warmtestraling en de 'grofheid' van het oppervlak (wrijving) ook relevant.

*²: Deze eigenschappen zijn geldig bij een omgevingstemperatuur van 20 °C. Bij hogere temperaturen veranderen de thermische eigenschappen en bij sommige materialen ook de fasetoestand. Kunststoffen zijn hiervoor het meest gevoelig.

Tabel 1.2 Thermische materiaaleigenschappen (bron: Kennisbank bouwfysica, reader B-3:2005)

materiaal	eigenschappen (grootheden)				
	λ	c_p	ρ	α	$\lambda \cdot \rho \cdot c_p$
	[W/m.K]	[J/kg.K]	[kg/m ³]	[m ² /s]	[W ² .s/m ⁴ .K ²]
koper	387,000	380	8940,0	1,14E-04	1,31E+09
staal	45,800	460	7850,0	1,27E-05	1,65E+08
metselwerk	0,690	840	1600,0	5,13E-07	9,27E+05
beton	2,000	880	2300,0	9,88E-07	4,05E+06
floatglas	0,760	840	2700,0	3,35E-07	1,72E+06
gipspleister	0,480	840	1440,0	3,97E-07	5,81E+05
PMMA	0,190	1420	1190,0	1,12E-07	3,21E+05
hardhout, eiken	0,170	2380	800,0	8,93E-08	3,24E+05
naaldhout, vuren	0,140	2850	640,0	7,68E-08	2,55E+05
asbest	0,150	1050	577,0	2,48E-07	9,09E+04
PUR-schuim	0,034	1400	20,0	1,21E-06	9,52E+02
lucht	0,026	1040	1,1	2,27E-05	2,97E+01

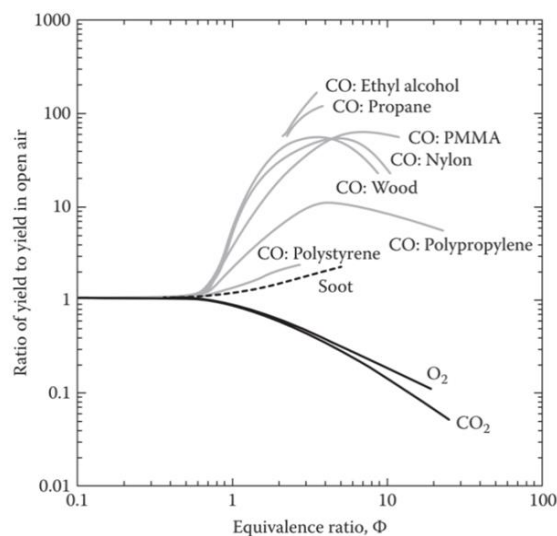
Verbranding (brandvermogen, brandverloop, yields)

- > Het is aan de CFD-gebruiker om brandscenario's en brandlocaties vast te stellen en zijn keuzes te motiveren. Het brandscenario zal in de basis voorspeld moeten worden op basis van literatuur, praktijktesten en berekeningen.⁹ Het kan zelfs voorkomen dat aanvullende praktijktesten noodzakelijk zijn om een juiste ontwerpbrand te kunnen invoeren.
- > Laat zo veel scenario's berekenen als nodig is om het doel van de berekening te bereiken. Bijvoorbeeld een realistisch en worstcasescenario: brand in voorwerp met en zonder geslaagde interventie, brand in een ruimte met en zonder geslaagde interventie, travelling fire met en zonder geslaagde interventie, brand in het gehele compartiment met en zonder geslaagde interventie.
- > In CFD-softwarepakketten wordt er bij praktische problemen meestal gebruikgemaakt van vereenvoudigde verbrandingsmodellen. In RANS-modellen wordt daarbij veel overgelaten aan de CFD-gebruiker. Hierdoor kan er meer kennis nodig zijn om een RANS-model goed op te bouwen.
- > Er zijn chemische (complexere) verbrandingsmodellen. Hierdoor wordt de interactie tussen turbulentie en het verbrandingsproces en de interactie tussen straling en het pyrolyseproces beter gemodelleerd dan door de eenvoudige verbrandingsmodellen. In de praktijk zijn deze chemische verbrandingsmodellen echter beperkt toepasbaar, omdat ze niet of nauwelijks gevalideerd zijn en erg gedetailleerde input vragen.
- > De yield is de hoeveelheid van een bepaald verbrandingsproduct dat vrijkomt afhankelijk van de hoeveelheid massa die verbrandt (massa brandstof die verbrandt x yield verbrandingsproduct = massa verbrandingsproduct). Yields worden niet berekend door een CFD-softwarepakket. Er wordt gewerkt met constante factoren, bijvoorbeeld een CO-yield of soot-yield (roet). De hoeveelheid vrijkomende stoffen is een op een gelinkt aan het brandvermogen. Omdat ook de verbrandingswarmte (heat of combustion) bepaalt hoeveel kilogram brandstof er verbrandt bij een bepaald brandvermogen, is de hoeveelheid vrijkomende verbrandingsproducten eveneens afhankelijk van de verbrandingswarmte van de brandstof. De relatie tussen vrijkomende hoeveelheid

⁹ Maak bijvoorbeeld gebruik van Selecting design fires van Staffansson, CIBSE, SFPE handbook of fire protection engineering, BS7974, BRE Design Fires for use in Fire Engineering, NEN 6093, NEN 6098 of NEN 6055.

verbrandingsproducten is soms tegenintuïtief. Des te hoger de verbrandingswarmte, des te lager de hoeveelheid vrijkomende stoffen bij een gelijk brandvermogen.

- > De productie van CO en roet is afhankelijk van vele factoren. De yields moeten daarom ingevoerd worden met een waarde die past bij wat er brandt en bij het brandregime tijdens de brand. Onderstaande waarden worden vaak gehanteerd:*1
 - a. Soot yield: 2,6% (brandstofbeheerste brand) tot 10% (ventilatiebeheerste / gesprinklerde brand).
 - b. CO yield: 1,0% (brandstofbeheerste brand) tot 10% (ventilatiebeheerste / gesprinklerde brand).



Figuur 1.1 Effect van ventilatiecondities op yields (bron: Karlsson & Quintiere (1999). *Enclosure Fire Dynamics*)

*1 Deze waarden zijn niet zonder meer generiek toe te passen en vaak slechts bruikbaar voor cellulosebranden met een rookpotentieel tot $R=100 \text{ m}^2/\text{kg}$ (mass optical density). Het beoordelen van de motivatie en onderbouwing van de gekozen yields is een belangrijk aandachtspunt bij de beoordeling van CFD-simulaties.

Straling

Over het algemeen wordt straling niet numeriek berekend in een CFD-simulatie (een nauwkeurig stralingsmodel is te tijdrovend voor praktische FSE-problemen). De meest voorkomende manieren om straling te berekenen in CFD-softwarepakketten zijn:

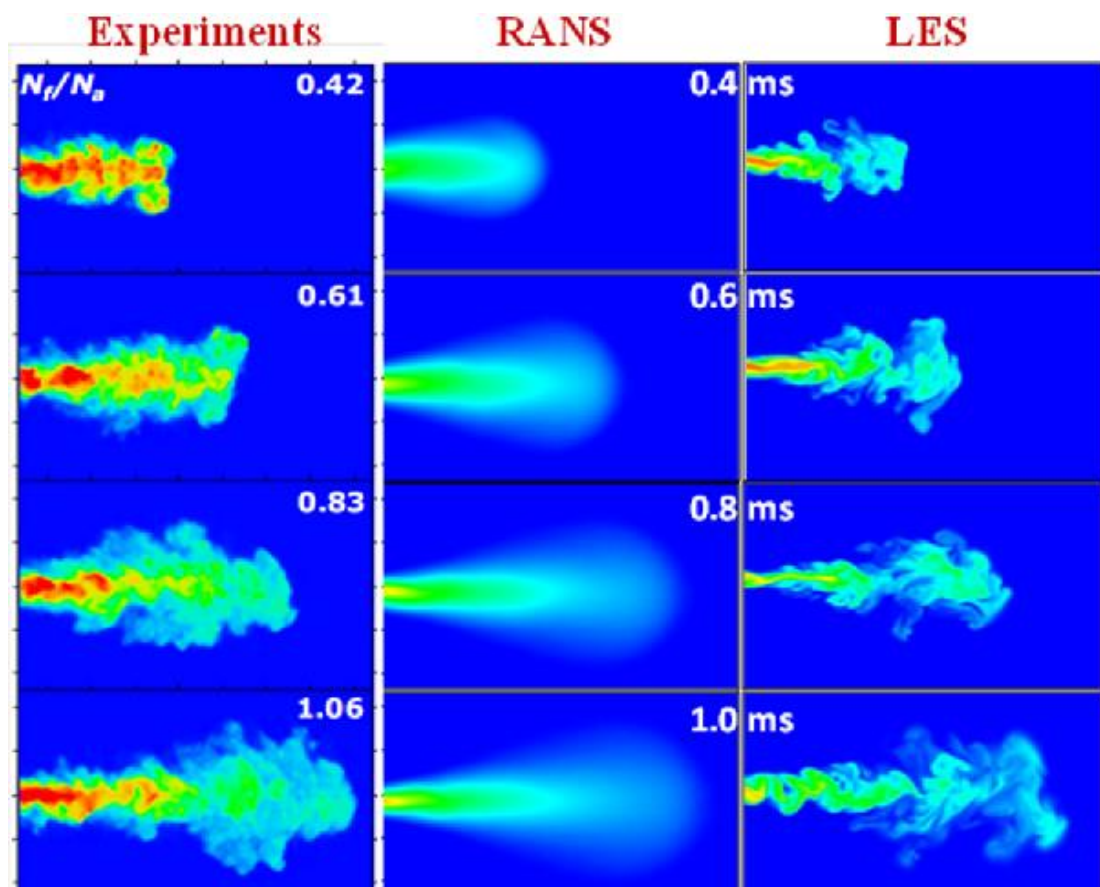
- > Constant-absorptie-coëfficiënt, bijvoorbeeld het grey gas model: deze methode veronderstelt de rooklaag als grijs, isotherm gas met een unieke grijze absorptie-coëfficiënt. Op deze manier wordt de stralingsflux tussen de rook en de wanden in functie van de rook- en wandtemperatuur berekend en wordt de golflengte-afhankelijkheid van de rookgassen verwaarloosd. Roet is de belangrijkste component uit de verbrandingsproducten die de thermische straling van de brand en de hete rookgassen bepaalt. Aangezien het spectrum van roet continu is, kunnen we aannemen dat het gas zich als grijs gas gedraagt. Let op: om de lokale effecten van straling in de nabijheid van de bron of vlam te modelleren, zijn deze modellen niet geschikt.

- > Breedbandmodellen: hierin wordt de golflengteafhankelijkheid van de absorptie berekend door de dominante golflengtes per component samen te nemen.
- > Smalbandmodel: hierin wordt de volledige integratie over verschillende golflengtes meegenomen in de berekening.

Turbulentie en verspreiding van gassen of vaste stoffen

De turbulente stroming dient op passende wijze gesimuleerd te worden. Voor het simuleren van turbulentie zijn drie verschillende benaderingen mogelijk:

1. Een directe numerieke simulatie (DNS): hierbij worden zowel de grote als kleine turbulente wervels (eddy's) rekenkundig bepaald. Dit vraagt zeer kleine rekencellen en daardoor veel rekencapaciteit. DNS wordt daarom niet gebruikt voor praktische problemen, maar meer voor academische onderzoeken en productontwikkeling.
2. LES-model (Large eddy simulation): dit wordt bijvoorbeeld gebruikt in FDS. Hierbij worden de grote turbulente wervels rekenkundig bepaald en kleinere wervels worden met een turbulentiemodel gesimuleerd. De toegepaste afmeting van de rekencellen bepaalt tot welke maat wervels gesimuleerd worden.
3. RANS-model (Reynolds Averaged Navier Stokes): de grote en kleine turbulente wervels worden met een turbulentiemodel gesimuleerd. De verschillende wervels worden hierin statistisch gemiddeld. Het gevolg hiervan is logischerwijs dat vooral kleine turbulente stromingen niet direct in de meetresultaten terug te vinden zijn. Voor thermiek gedreven stromingsproblemen (brand) zijn k-epsilon- en (SST) k-omega-(sub)modellen vrij gangbaar in gebruik.



Figuur 1.2 Verschil tussen experimenten, RANS- en LES-turbulentiemodel (bron: Comparison of RANS and LES Turbulence Models against Constant Volume Diesel Experiments, Som: 2012)

Detectie van brand

CFD-softwarepakketten hebben geen goede manier om te berekenen wanneer rookmelders in alarm komen. Er is maar beperkte validatie (voor een beperkt aantal rookmelders) beschikbaar.

Blusinstallatie en inzet van de brandweer

- > Het effect van een sprinkler- en/of watermistinstallatie is zeer lastig te modelleren in welk CFD-model dan ook.¹⁰ FDS heeft een aantal sub-modellen hiervoor, maar veel zaken kunnen niet voldoende betrouwbaar gesimuleerd worden of zijn onvoldoende gevalideerd. Denk hierbij onder andere aan:
 - a. de interactie tussen waterdruppels (en druppelgrootte) en de brand en het effect op het verbrandingsproces en het brandvermogen.
 - b. het smoren van de brand door de installatie dat leidt tot een toename in roetvorming en toxische verbrandingsgassen.
 - c. de mate waarbij de rooklaag afgekoeld wordt.
 - d. de volumetoename ten gevolge van stoomvorming, die in de (meest gangbare) modellen niet is meegenomen. Volumetoename kan onder meer leiden tot drukopbouw en hiermee samenhangende stromingen.
 - e. het stromingspatroon (turbulentiemodel) ten gevolge van het sproeipatroon van de installatie.
 - f. de waternevel of stoomvorming, waardoor de zichtlengtes slechter worden. Dit heeft een relatie met het aspect vluchtveiligheid.

Het moment waarop de sprinklerinstallatie activeert, wordt meestal bepaald in de CFD-simulatie of berekend door middel van de formule van Alpert.¹¹ Na activatie van de sprinkler kunnen de volgende effecten van de sprinkler optreden voor wat betreft het brandvermogen (zie

- > figuur 1.3):
 - a. de brand wordt (vrijwel) geblust.
 - b. de brand groeit niet meer, maar het verbrandingsproces gaat door.
 - c. de brand wordt gedeeltelijk beheerst en het vermogen neemt af, waarna de brand stabiliseert.
 - d. de brand wordt niet geblust (het faalscenario van de installatie).Welk scenario zal optreden in de praktijk is lastig te voorspellen. Doorgaans wordt scenario c als conservatieve keuze ingevoerd voor het scenario waarbij de sprinkler naar behoren werkt. Voor de CO- en soot-yield is het gangbaar dat men uitgaat van een situatie waarin de brand gesmoord is (dit geeft de hoogste yields).

¹⁰ N. Tenbült (2018). [Cooling of a hot smoke layer by a sprinkler spray. Validation of a CFD-model](#). Masterthesis, TU Eindhoven.

¹¹ R.L. Alpert (1972). [Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors](#). *Fire technology* 8, 181-195.

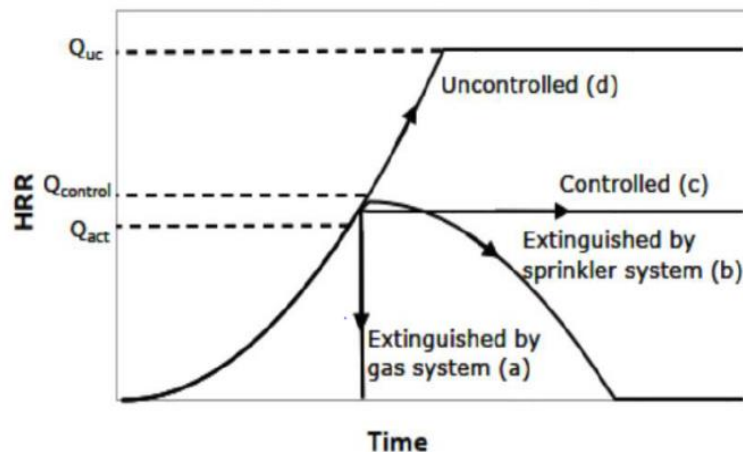


Figure 12.1. Schematic figure of the assumed effect on heat release rate for different types of suppression. Based on [17].

Q_{uc} = heat release rate for the fully developed, uncontrolled fire.

$Q_{control}$ = heat release rate at which the fire can be controlled.

Q_{act} = heat release rate when the suppression system activates.

Figuur 1.3 Mogelijk verloop van de brandvermogenscurve bij activatie van een blusinstallatie (bron: Selecting design fires, Staffansson L.: 2010)

Ventilatie, luchtbehandelingsinstallatie en lekdichtheid

- > Het op een juiste wijze ingeven van de ventilatie vraagt de nodige aandacht van de CFD-gebruiker. Er is vrijwel altijd een vereenvoudiging nodig van de manier waarop een ventilatiesysteem werkt. Deze vereenvoudiging mag (logischerwijs) niet tot te grote afwijkingen leiden.
- > Lekkagenaden rondom bijvoorbeeld deuren zijn eigenlijk altijd kleiner dan de afmeting van de rekencellen. Er is daardoor een vereenvoudiging van lekkagestromen nodig. Deze vereenvoudiging mag (ook) niet tot grote afwijkingen leiden*¹. Voor het bepalen van lekkageoppervlakken kan het Ashrae handbook HVAC fundamentals chapter 16 gebruikt worden.¹²

*1: Het beoordelen van deze vereenvoudiging en het beantwoorden van de vraag in hoeverre de afwijkingen acceptabel klein zijn, zijn zeer lastige en analytische kwesties, waar ook de ingenieurspraktijk geen direct passend antwoord op heeft.

Druk

Het drukverloop is in hoge mate afhankelijk van temperatuurontwikkeling (en daarmee van het brandscenario) en van de luchtdoorlatendheid van scheidingsconstructies. Hierbij dient (ook) rekening te worden gehouden met het bezwijken of vervormen van constructie- of bouwdelen. Doorgaans wordt het bezwijken of vervormen van gebouwdelen niet gemodelleerd in de CFD-simulatie. Het drukverloop in de brandruimte zoals berekend in de CFD-simulatie kan daardoor minder betrouwbaar zijn.

Menselijk gedrag

CFD-simulaties houden normaliter geen rekening met menselijk gedrag. Of vluchtende mensen bijvoorbeeld deuren openen of sluiten, wordt niet meegenomen. De gebruiker is verantwoordelijk om dit op een juiste manier in te voeren. Omdat menselijk gedrag

¹² <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2021-ashrae-handbook-fundamentals>

onvoorspelbaar is en kan variëren, moet gekeken worden welke variaties er mogelijk zijn en welke variaties gemodelleerd moeten worden.

Uitvoer / resultaten

Het is bij bepaalde CFD-softwarepakketten (onder andere FDS) achteraf niet mogelijk om aanvullende informatie op te vragen, tenzij alles opnieuw berekend wordt. De gewenste uitvoer moet daarom op voorhand al besproken en vastgelegd worden.

1.3.4 Uitvoer / resultaat

Op het moment dat de juiste invoer is gekozen, kan, nadat de berekening is uitgevoerd, gecontroleerd worden of de uitvoer voldoet aan de vooraf bepaalde toetscriteria. Hierbij gelden de volgende aandachtspunten en tips:

- > Hoe zijn de vooraf bepaalde toetscriteria gedefinieerd? Deze kunnen de conclusie beïnvloeden:
 - Is er sprake van een absolute (minimum / maximum) of gemiddelde grenswaarde?
 - Betreft het een waarde over een bepaalde tijdsspanne of van één moment?
 - Betreft het een gemiddelde van meerdere meetresultaten of meetpunten?
- > Zijn door de CFD-gebruiker de resultaten op de juiste wijze geïnterpreteerd?
- > Kan er op basis 1D/2D/3D-resultaten een juiste beoordeling in relatie tot de beoogde doelstelling worden gegeven? Zo nee, welke andere 'viewpoints' zijn noodzakelijk?
- > Zijn er meer uitvoergegevens nodig dan enkel grafische? Dienen ook uitvoergegevens ter plaatse van specifieke meetpunten (bijvoorbeeld temperatuur, zichtlengte of CO-concentratie) periodiek te worden weergegeven?
- > De simulatieresultaten dienen te worden nagegaan in de context van de beoogde oplossing. Zijn de eindresultaten voldoende eenduidig in relatie tot de oorspronkelijke doelstellingen (vertaald naar het toetsingskader of de gekozen toetscriteria)?
- > Bij een CFD-simulatie dient de concentratie roetdeeltjes vertaald te worden in de zichtlengte binnen het verontreinigd gebied. De gebruikte rekenmethode voor de verhouding tussen zichtlengte en rookconcentratie dient duidelijk te worden gedefinieerd en gemotiveerd. In de reader 'Rookdichtheid en zichtlengte' is daar meer informatie over te vinden.¹³

¹³ R. van Herpen. [Rookdichtheid en zichtlengte](#). Kennisbank Bouwfysica.

Bijlage 1 Informatie CFD-softwarepakketten

Deze bijlage is nog in ontwikkeling

	Turbulentiemodel	-	-	Toelichting
Autodesk CFD	-	-	-	Relatief nieuw
ANSYS CFX				N.t.b.
CHAM/ Phoenix	-	-	-	N.t.b.
FDS	-	-	-	N.t.b.
FireFoam/OpenFoam	-	-		OpenFoam voornamelijk stedenbouwkundig/wind
Jasmine				Wordt niet/nauwelijks gebruikt
Smartfire				N.t.b.
Sofie	-	-	-	Wordt niet/nauwelijks gebruikt

Bijlage 2 Indicatieve toetscriteria

Het doel van een CFD-simulatie is om bepaalde condities in de brandruimte of een van de aangrenzende ruimten aan te tonen of te voorspellen. Aan de hand van deze condities kan bijvoorbeeld worden bepaald in hoeverre een veilige ontvluchting mogelijk is, een brand ventilatie- dan wel brandstofbeheerst is of in hoeverre bepaalde constructiedelen bezwijken. Om hier een goede uitspraak over te kunnen doen, is het vaststellen van de juiste toetscriteria voor deze zaken van groot belang.

In deze bijlage worden daarom enkele criteria benoemd die bij het beoordelen van een CFD-simulatie kunnen worden aangehouden. Er is aangegeven waar de betreffende criteria hun oorsprong vinden. Er moet worden opgemerkt dat de genoemde *criteria slechts indicatief van aard* zijn. Het is bovenal de rol van de CFD-gebruiker om, voor de verschillende (maatgevende) scenario's, realistische uitgangspunten en veiligheidsmarges en hiermee samenhangende, juiste criteria te definiëren. Het is daartoe belangrijk kennis te hebben van (bijvoorbeeld) de fysiologische en psychologische reacties van mensen op brand en rook, of de thermische en mechanische respons van constructies. Normatieve uitgangspunten hoeven niet altijd passend te zijn bij het doel van een CFD-simulatie. Het is in dat geval vaak beter om de toetscriteria te bepalen op basis van literatuur dan op basis van normen.

Tabel B2. 1 Toetscriteria veilig vluchten en veilige inzet brandweer

	Rookvrije hoogte	Temperatuur	Straling	Zichtlengte (niet lichtgevend)	Bron
Vlucht- en overlevingsmogelijkheden FED / FEC / FIC / FLD methode Purser					Rookverspreiding in woongebouwen (Brandweeracademie, 2020)
Niet besloten vluchtroute*1	-	45 °C (op 1,8 m)	1,0 kW/m ² (op 1,8 m)	100 m	> Bouwbesluit 2012 artikel 2.107 lid 12 > TNO Bouwrapport 1997-CVB-R0883
Besloten vluchtroute onder gestratificeerde rooklaag	2,5 m	200 °C	2,5 kW/m ² (op 1,8 m)	-	NPR 6095-1:2012
Besloten vluchtroute door opgemengde rooklaag	-	80 °C (op 1,8 m)		10 m	Assessment criteria Swedish Building Code 2013

Aanvalsroute inzet *2	2,5 m?	-	3,0 - 4,6 kW/m ²	3m?	>	Brandweer BRZO ¹⁴
					>	Nieman Toolbox brandweerinzet
					>	TNO-Dv3 3006 C024
					>	PGS 29
					>	rapport Lund ¹⁵

Tabel B2. 2 Criteria ontstaan flashover

Onderwerp	Ontsteking door straling uit rooklaag	Ontsteking door convectie	Rooklaaghoogte	Bron
Flashovercondities	> 500 °C	> 300 °C (Cellulose)	Rooklaag >90 %	NEN 6055:2011

Tabel B2.3 Criteria brandregime brand

Onderwerp	Vermogensontwikkeling	Massafractie	Opmerking
Ventilatiebeheerste / brandstofbeheerste brand	Reductie brandvermogen t.o.v. invoer	< 14 % O ₂	Verschilt per brandstof en is afhankelijk van de gastemperatuur. Zie ook NEN 6055: 2011 bijlage B.5

Tabel B2. 4 Criteria constructie- of bouwdeelen

Onderwerp	Temperatuur	Temperatuur	Bron
Ontbranding Isolatie* ⁵	500-700 °C EPS, PUR en glaswol	1100 °C Steenwol	
Bezwijken onbeschermde staalconstructiedelen* ^{4,5}	Kritieke temperatuur kolom 490 °C	Kritieke temperatuur kolom n.t.b.	(Brandinformatiesysteem) 'Veilige waarden voor de kritieke staaltemperatuur bij ontwerp een aanbesteding' ban BmS, 2016.
Bezwijken (niet brandwerend) glas* ^{3,5}	250-300 °C (spanning)	520 °C (Verweking)	Brandinformatiesysteem
Afspatten beton* ^{4,5}	380 °C t.p.v. plafond	250 °C t.p.v. wapening (afh. beton kwaliteit)	NFPA 502

¹⁴ J.A. Meinster (2016). [Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet \(maximaal 5 minuten\) van \(bedrijfs\)brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven](#). Landelijk Expertisecentrum BrandweerBRZO.

¹⁵ M. Gradén & J. Liljedahl (2007). [Räddningsmanskaps säkerhet under insats - kriterier för analytisk dimensionering](#). Bachelorthesis, Universiteit van Lund.

- *1: De term 'niet-besloten ruimte' en de hiermee samenhangende criteria kunnen ter discussie gesteld worden, omdat ze niet gerelateerd zijn aan (kortstondig) vluchten maar aan (langdurig) verblijven. De onderbouwing door TNO bij de keuze voor deze criteria is niet bekend.
- *2: De mogelijkheid tot het uitvoeren van een brandweerinzet is in hoge mate afhankelijk van de duur van de inzet (blootstellingsduur), en het inspanningsniveau.
- *3: Meer nog dan bij de overige criteria zijn de hier geschetste temperaturen sterk afhankelijk van de materialisering, bijvoorbeeld het glastype, het aantal lagen, de dikte per laag, maar ook de ruimte voor het glas om uit te zetten in het kozijn. De hier geschetste criteria gelden dan ook nadrukkelijk niet als absolute grenswaarden.
- *4: Meer nog dan bij de overige criteria zijn de hier geschetste temperaturen sterk afhankelijk van de mechanische belasting op constructiedelen, evenals van de grootte van constructiedelen. De hier geschetste criteria gelden dan ook nadrukkelijk niet als absolute grenswaarden.
- *5: Het is de vraag in hoeverre de opwarming van een materiaal (warmtetransport) juist wordt berekend door het CFD-softwarepakket. Veelal is deze opwarming in de berekening gebaseerd op rudimentaire uitgangspunten.

Bijlage 3 Aandachtspunten bij het bepalen van de grid

Een realistisch en betrouwbaar rekenresultaat is afhankelijk van een gridkeuze die aansluit bij de bouwkundige situatie. De grid dient voldoende gedetailleerd te zijn om een gedegen berekening te kunnen uitvoeren. Er zijn verschillende beperkingen en aandachtspunten waar op gelet kan worden bij het bepalen van de grid (zie onderstaande tabel B3.1).

Tabel B1.1 Aandachtspunten bij het bepalen van de grid

Keuze	Aandachtspunten
Bouwkundige situatie	In hoeverre is het mogelijk om schuine en ronde vormen te modelleren? In verschillende CFD-programma's is het moeilijk of onmogelijk om ronde vormen te modelleren. Een vereenvoudiging van het ruimtelijk model kan nodig zijn.
Bouwkundige situatie	In hoeverre is een vereenvoudiging van het model mogelijk en/of noodzakelijk? Denk hierbij aan het al dan niet modelleren van balkconstructies, het vereenvoudigen en terugbrengen van het aantal gevelopeningen en het modelleren van roosters. Deze vereenvoudigingen kunnen van grote invloed zijn op de resultaten
Bouwkundige situatie	Een grid dient aan te sluiten op het ruimtelijk model. De verschillende ruimtelijke elementen zoals (de afstand tussen) constructiedelen en openingen moeten passen in de grid (een cel kan niet zowel lucht als een constructieonderdeel bevatten).
Gridtype	Over het algemeen is een Cartesian grid wenselijk, zeker in de buurt van de haard. Vervolgens kan overgaan worden naar Orthogonaal.
Gridtype	Bij de toepassing van niet gestructureerde grids is een uitgebreide gevoeligheidsanalyse zeer belangrijk. De kans op divergeren van de berekening neemt toe.
Gridgroottes	Een grid dient groter te zijn dan het ruimtelijk model zelf, zodat ook de toevoer van lucht en de afvoer van rookgassen uit het model kunnen worden meegenomen.
Celafmetingen	Een grid kan generiek gezien met een grotere celafmeting worden uitgevoerd, en een kleinere celafmeting wanneer de omstandigheden daarom vragen. Cellen worden doorgaans kleiner nabij de brandhaard en nabij bouwkundige elementen zoals kolommen, plafonds en openingen. Aan het vergroten of verkleinen van cellen zijn randvoorwaarden verbonden. In FDS kan (bijvoorbeeld) een vergroting tot factor 2 worden toegepast. De knooppunten tussen de verschillende celafmetingen moeten exact overeenkomen.
Celafmetingen	De benodigde celafmeting is erg afhankelijk van de situatie en is afhankelijk van 'wat' wordt uitgerekend en voor welke oppervlak dit wordt berekend. Het rekenen aan brand- en rookverspreiding binnen een kleine ruimte kan met een grotere

nauwkeurigheid gebeuren dan een stedenbouwkundig windonderzoek. Voor het rekenen aan brand- en rookgedrag zijn, generiek gezien, celafmetingen tussen de 0,1 m en 1 m gebruikelijk. Voor LES-modellen (FDS) kan middels de karakteristieke diameter van de brandhaard een (generieke) uitspraak worden gedaan over de beoogde celafmeting. Voor RANS-modellen geldt dit niet (zie ook par. 1.3.3). Een robuustheidsonderzoek, waarbij cellen stapsgewijs worden verkleind totdat er geen significante verandering in de uitkomst meer plaatsvindt, is noodzakelijk.

Celafmetingen Een cel bestaat uit drie dimensies. De X-, Y- en Z-dimensies dienen ongeveer gelijk te zijn. Een dimensie mag, afhankelijk van het model dat wordt gebruikt, ongeveer tot factor 1:1:3 afwijken.

Celafmetingen Analyse van de gevoeligheid van de mesh is van belang, zie: <https://www.youtube.com/watch?v=KiFYNuC88SU>.

Bijlage 4 Termenlijst

Deze bijlage is nog in ontwikkeling