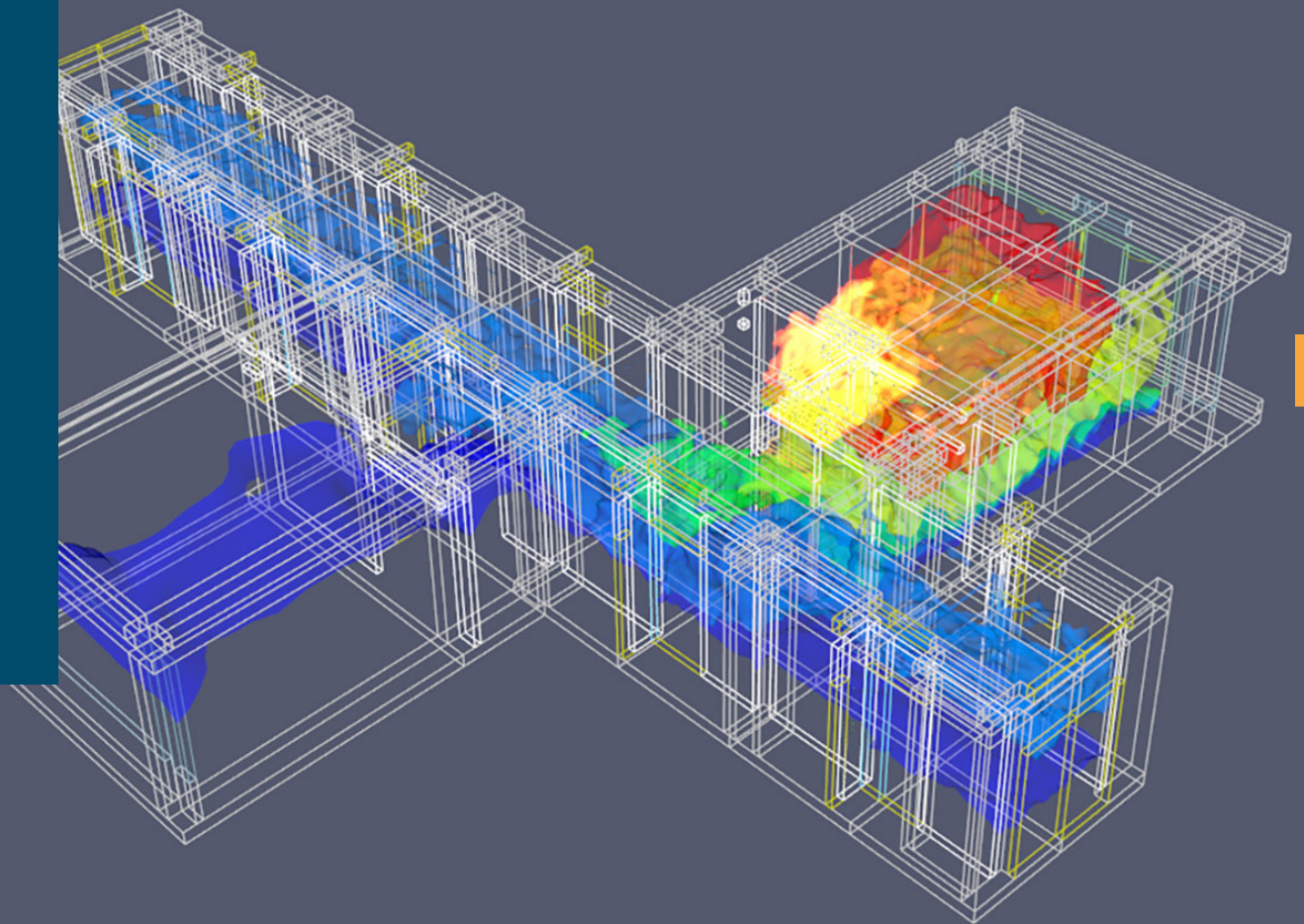


Hulp bij het beoordelen van CFD-brandsimulaties



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs	J.M. Bellos (Veiligheidsregio Twente), A. Barreveld (NIPV), R. van de Nes, M.G.M. van der Heijden (Veiligheidsregio Brabant-Noord)
Contactpersoon	I. Tanck (NIPV)
Opdrachtgever	Community of Practice Fire Safety Engineering (COP FSE)
Contactpersoon	I. Tanck (NIPV)
Datum	15 mei 2024
Foto's	R. van de Nes, P. van de Rede

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Voorwoord

Voor u ligt het rapport *Hulp bij het beoordelen van CFD-Brandsimulaties*. Dit document is geïnitieerd en tot stand gekomen door de leden van de Community of Practice Fire Safety Engineering (COP FSE) en geeft invulling aan de toenemende vraag naar kennis van en ondersteuning bij de evaluatie van CFD-brandsimulaties. De COP FSE, een collectief van FSE-specialisten van de veiligheidsregio's en het NIPV, wijdt zich aan het versterken en standaardiseren van FSE-kennis in Nederland.

Dit document is het resultaat van de inzet van COP FSE om kennis breed beschikbaar te maken, te delen en te verspreiden en is tot stand gekomen door de gezamenlijke inspanningen van haar leden. Gedurende 2023/24 heeft het document, door het NIPV in samenwerking met Michel Bellos, Mike van der Heijden en Richard van de Nes, een grondige revisie ondergaan. De publicatie vindt plaats onder de vlag van het NIPV.

Zoals de titel suggereert, dient dit document als handreiking bij het begeleiden en beoordelen van CFD-brandsimulaties binnen een doelgericht brandveiligheidsproces, eerder als richtlijn dan als strikte norm. Het bevindt zich in een 'permanent bèta-status', wat aangeeft dat het voortdurend evolueert, parallel aan ontwikkelingen in kennis, technieken en CFD-(brand)software. Suggesties en aanvullingen zijn welkom via cop-fse@NIPV.nl, onder vermelding van 'hulpdocument beoordeling CFD-brandsimulaties'. De COP FSE heeft zich tot doel gesteld om het document actueel te houden.

We zijn ervan overtuigd dat dit hulpdocument waardevol zal zijn voor adviseurs actief in marktpartijen of werkzaam in de veiligheidsregio's die betrokken zijn bij CFD-brandsimulatieprojecten. Onze dank gaat uit naar Jean-Michel Bellos (Veiligheidsregio Twente), Mike van der Heijden (Veiligheidsregio Brabant-Noord) en Richard van Nes voor het opstellen van dit document en naar allen die het document hebben gereviseerd.

Lieuwe de Witte
Lector Brandveiligheidskunde

Inhoud

	Inleiding	5
1	Het doelgerichte brandveiligheidsproces	6
2	Aandachtspunten bij CFD-modellering	9
2.1	Geometrie en/of gebouw	9
2.2	Omgeving	14
2.3	Brand	16
2.4	Ventilatie en installatieonderdelen	21
2.5	Menselijk gedrag	26
2.6	CFD-modellering	27
2.7	Uitvoer en resultaat	32
	Literatuurlijst	34
	Bijlage 1 Informatie CFD-softwarepakketten	36
	Bijlage 2 Indicatieve acceptatiecriteria	37
	Bijlage 3 Aandachtspunten bij het bepalen van de grid	40
	Bijlage 4 Inlegvel CFD	41
	Bijlage 5 Loopsnelheden	42

Inleiding

Dit rapport is bedoeld als een ondersteuning voor zowel brandweeradviseurs als adviseurs uit de markt bij het begeleiden en beoordelen van (brand)simulatietrajecten, met een Computational Fluid Dynamics (CFD)-aanpak als kern. Het focust niet alleen op het verfijnen van het beoordelingsproces – door het moment van het stellen van vragen te bepalen – maar voorziet ook in handvatten voor de beoordeling. Aan de hand van dit document kan een beoordeling worden gemaakt óf en op welke wijze de inzet van CFD-brandsimulaties van significante meerwaarde is en waar eventuele fouten en/of onzekerheden kunnen optreden.

Het uitvoeren van CFD-brandsimulaties is een ingewikkeld proces dat een zorgvuldige afweging vereist: is CFD wel de meest geschikte aanpak voor het vraagstuk, of volstaat een minder complexe en tijdrovende aanpak evenzeer? Wanneer CFD de voorkeur heeft, moeten de invoergegevens een waarheidsgetrouwe representatie van de realiteit te zijn, terwijl de interpretatie van de resultaten correct moet gebeuren. Een zorgvuldige analyse en evaluatie van de uitgevoerde CFD-brandsimulatie door (brandweer)adviseurs zijn van belang om de kwaliteit en juiste inzet van CFD-brandsimulaties te waarborgen.

Waarheidsgetrouw

Een waarheidsgetrouwe weergave is lastig vast te stellen. Zelfs bij een juist gekozen en nauwkeurige weergave van het brandverloop en vrijkomen van temperatuur en rookgassen blijft een brand een stochastisch en niet nauwkeurig te voorspellen fenomeen. Dit betekent dat er altijd sprake zal zijn van een zekere mate van onzekerheid. Wanneer echter rekening wordt gehouden met deze inherente mate van onzekerheid, behoeft die het gebruik van CFD-brandsimulaties niet in de weg te staan.

Dit rapport verschaft praktische richtlijnen en adviezen gebaseerd op de dagelijkse praktijk van beoordelingen. Het document ordent deze aandachtspunten in twee categorieën: punten gericht op het doelgerichte brandveiligheidsproces (hoofdstuk 1) en aandachtspuntenpunten voor de inhoudelijke beoordeling van CFD-brandsimulaties (hoofdstuk 2).

Daarnaast biedt bijlage 1 informatie over diverse CFD-softwarepakketten, inclusief details zoals turbulentiemodellen. Bijlage 2 stelt indicatieve acceptatiecriteria voor die als toetsingscriteria in risicoanalyses kunnen dienen. Bijlage 3 inzicht geeft aandachtspunten bij het bepalen van de grid. Bijlage 4 bevat een inlegvel met relevante parameters die voorafgaand aan de uitvoering vastgelegd moeten worden en voor de beoordeling zelf van belang kunnen zijn. Bijlage 5 ten slotte geeft loopsnelheden weer.

Normatief kader of richtinggevend

Opgemerkt moet worden, dat dit document en de bijbehorende bijlagen nadrukkelijk niet als *normatief kader* maar als *richtinggevend* moeten worden beschouwd. Het document geeft aandachtspunten over de te volgen processtappen voorafgaand aan de CFD-brandsimulatie en adviezen over de inhoudelijke beoordeling naderhand. Een vroegtijdige afstemming tussen de verschillende partijen over de uitgangspunten is van belang.

1 Het doelgerichte brandveiligheidsproces

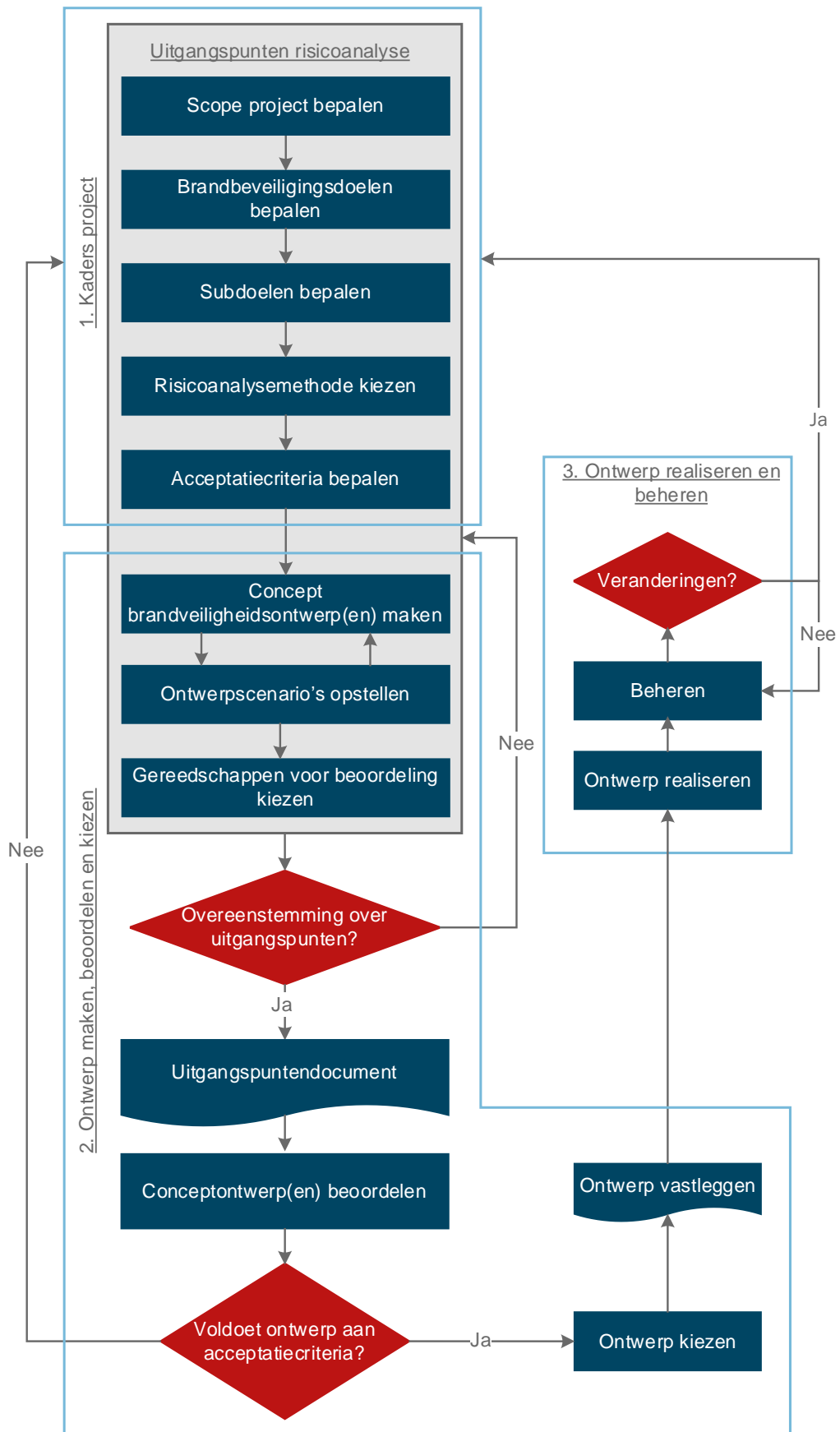
Een CFD-brandsimulatie wordt als onderdeel van een (breder) integraal plan brandveiligheid uitgevoerd. De simulatie is vaak onderdeel van een doelgerichte aanpak van brandveiligheid, bijvoorbeeld voor het maken van een doelgericht brandveiligheidsontwerp van een gebouw.

In de doelgerichte aanpak van brandveiligheid wordt toegepaste brandveiligheidskunde gebruikt om op een systematische en navolgbare wijze een brandveiligheidsoplossing te vinden die aan een of meerdere vooraf bepaalde brandveiligheidsdoelen voldoet. Bij doelgerichte brandveiligheid vormen conceptueel en risico-denken de verbinding tussen wetenschap en praktijk. Om tot een passende brandveiligheidsoplossing te komen, worden brandveiligheidsdoelen bepaald, wordt een methode voor de bepaling van de mate van brandveiligheid gekozen en worden scenario's en risico's geanalyseerd.

Doelgericht of risicogericht

In plaats van doelgerichte brandveiligheid wordt ook vaak de term risicogerichte brandveiligheid gebruikt. De eerste stap bij beide is het vaststellen van doelen (Brandweer Nederland, 2023). De risico's worden vervolgens beoordeeld en er wordt getoetst of aan de doelen wordt voldaan. De doelen die gesteld worden, bepalen daardoor welke risico's acceptabel zijn of niet. Omdat de doelen centraal staan in de doelgerichte en risicogerichte aanpak, is ervoor gekozen om in deze publicatie gebruik te maken van de term doelgerichte brandveiligheid. Tevens wordt hiermee aansluiting gevonden bij andere NIPV-publicaties over doelgerichte brandveiligheid.

Om de doelgerichte aanpak van brandveiligheid soepel te laten verlopen, is het aan te raden om hiervoor een doelgericht brandveiligheidsproces te volgen. Op die manier weten alle betrokkenen hoe het proces gaat verlopen en worden geen stappen overgeslagen. Een proces dat gebruikt kan worden voor het maken, kiezen, realiseren en beheren van een doelgericht brandveiligheidsontwerp van een gebouw is uitgewerkt in de *Handreiking toepassen doelgerichte brandveiligheid bij gebouwen* van het NIPV (publicatie medio 2024) (van Rede et al., 2024). Het doelgerichte brandveiligheidsproces uit deze handreiking is weergegeven in figuur 1.1. Het model risicogericht werken van Brandweer Nederland kan ook gebruikt worden (Brandweer Nederland, 2023). Het doelgerichte brandveiligheidsproces in figuur 1.1 is specifiek gericht op brandveilige gebouwen. Het model risicogericht werken is meer generiek van aard. Om die reden wordt in dit hulpdocument verwezen naar de NIPV-handreiking en het proces uit figuur 1.1.



Figuur 1.1 Processchema doelgerichte brandveiligheid (van Rede et al., 2024)

De basis van de doelgerichte brandveiligheid is het bepalen van de doelen, subdoelen en acceptatiecriteria die gelden voor het project. Hierbij wordt gekeken wat behaald moet worden (doelen), op welke wijze dat gebeurt (subdoelen) en welke meetbare grenswaarden gelden als maatstaf voor het behalen van het doel en subdoel (acceptatiecriteria). Een voorbeeld hiervan is het voorkomen van slachtoffers en gewonden (doel) door het gedurende voldoende lange tijd beschikbaar houden van vluchtwegen (subdoel) met als grenswaarde een zichtlengte van ten minste 10 meter (acceptatiecriterium). Voor het kiezen van acceptatiecriteria kan gekeken worden in bijlage 2 van dit hulpdocument. Hierin staat een overzicht van acceptatiecriteria die in verschillende onderzoeken genoemd worden.

Om te kunnen beoordelen of aan de acceptatiecriteria wordt voldaan, kan het nodig zijn om aan de effecten van brandscenario's te rekenen. Dit kan op meerdere manieren, zoals bijvoorbeeld door middel van handberekeningen, zonemodellen of CFD-brandsimulaties. Of een CFD-brandsimulatie de beste manier is om bepaalde effecten van de brandscenario's te berekenen, wordt in het processchema in figuur 1.1 bepaald in de stap 'gereedschappen voor beoordeling kiezen'.

Wanneer een CFD-brandsimulatie wordt gekozen als gereedschap voor beoordeling is het van belang dat de uitgangspunten en invoer die hierbij gelden goed worden vastgelegd en ook worden afgestemd met het bevoegd gezag. Vereisten rondom de onderwerpen die moeten worden beschreven in de uitgangspunten staan beschreven in de handreiking (van Rede et al., 2024). Specifiek voor CFD-brandsimulaties geldt dat in aanvulling hierop ook de volgende zaken gedetailleerd moeten worden beschreven:

- > afkadering van het gemodelleerde gebied en structurering van het 3D-model
- > modellering van componenten zoals ventilatie, detectie en sprinklersystemen
- > invloed van externe omgevingsfactoren op de simulatie
- > keuze van het brandtype, de software en modellen voor specifieke aspecten
- > presentatie van de output voor verificatie van doelstellingen en toetsing aan criteria.

In bijlage 4 van dit hulpdocument is een inlegvel opgenomen dat helpt bij het verzamelen en samenvatten van alle belangrijke informatie en afgesproken scenario's voor een CFD-brandsimulatie. Het documenteren van andere relevante aspecten wordt aangeraden voor een volledige en nauwkeurige vastlegging. Hoofdstuk 2 van dit hulpdocument geeft daarnaast aandachtspunten voor het kiezen van de juiste invoer van de CFD-brandsimulatie.

Bij het beoordelen van de conceptontwerpen, waarin de effecten van scenario's zijn bepaald door de CFD-brandsimulaties, moet getoetst worden of de ontwerpen voldoen aan de acceptatiecriteria (en daarmee aan de doelen en subdoelen). Een ontwerp dat voldoet aan de acceptatiecriteria kan vervolgens gekozen worden. Dit ontwerp moet vastgelegd worden in een rapport. Dit rapport moet vaak beoordeeld worden door het bevoegd gezag (bijvoorbeeld wanneer het een onderdeel uitmaakt van een omgevingsvergunning voor de activiteit bouwen). Onderdeel van deze beoordeling is de beoordeling van de CFD-brandsimulatie. Specifieke aandachtspunten voor deze beoordeling staan in hoofdstuk 2 van dit hulpdocument. Bevoegde autoriteiten of adviseurs van de brandweer die problemen tegenkomen bij het beoordelen van CFD-brandsimulaties worden aangemoedigd om ondersteuning te zoeken bij een collega binnen of buiten de eigen veiligheidsregio, bij een lid van de COP-FSE, of een second opinion bij derden te overwegen.

2 Aandachtspunten bij CFD-modellering

Op het moment dat er overeenstemming is over het doel en de methode voor de inzet van CFD-brandsimulaties, kan de invoer voor de CFD-brandsimulatie vastgesteld worden. De invoer die gekozen wordt, bepaalt in grote mate de uitvoer, ofwel de resultaten van de CFD-brandsimulatie. De invoer van de CFD-brandsimulatie moet daarom beoordeeld worden. De uitvoer moet op de juiste wijze gepresenteerd en geïnterpreteerd worden. In de volgende paragrafen worden hiervoor aandachtspunten en tips beschreven.

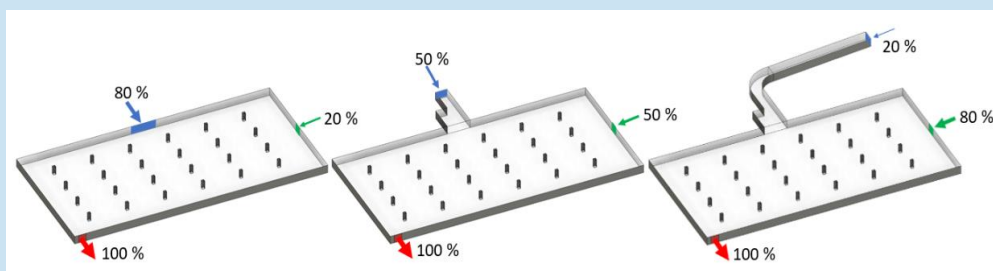
2.1 Geometrie en/of gebouw

Een belangrijk onderdeel van een CFD-brandsimulatie is het 3D-CFD-model. Het 3D-model is per definitie een vereenvoudigde weergave van de fysieke werkelijkheid. Er worden verschillende uitgangspunten aangehouden die later (mogelijk) van invloed kunnen zijn op het eindresultaat. Er kan gedacht worden aan:

- > De plaats waar het 3D model eindigt. Is dit bijvoorbeeld bij een ventilatieopening naar buiten, of is de omgeving van deze opening ook belangrijk, bijvoorbeeld voor de weerstand (doorstroombepalingen in de opening) of om rekening te kunnen houden met mogelijke rookrecirculatie via andere openingen. Het belang van kritisch kijken naar het 3D-model wordt in het kader hieronder duidelijk gemaakt.

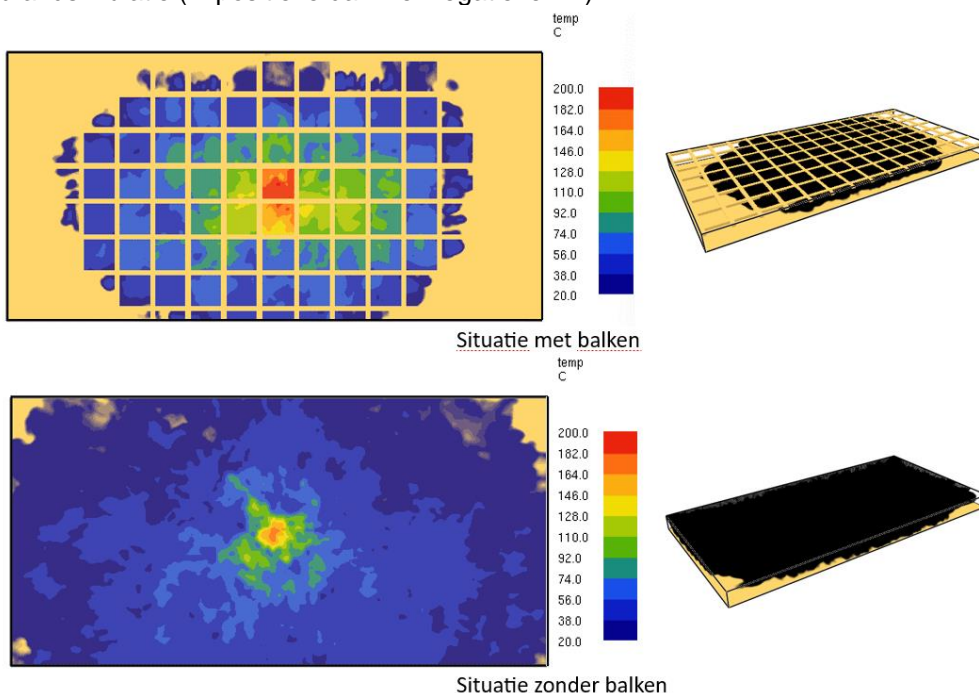
Invloed van toe en afvoer in een parkeergarage

In een garage (figuur 2.1) is sprake van een mechanische afvoer (rode pijl) en natuurlijke toevoer via de inrit (blauwe pijl) en een rooster in de wand (groene pijl). Bij een vast afvoerdebiet wordt de toevoerlucht verdeeld over de openingen, afhankelijk van het open oppervlakte en de weerstand. De begrenzing van het model eindigt ten aanzien van de inrit (blauw) heeft invloed op de luchtverdeling. Als het model eindigt waar lucht de garage in stroomt (linker figuur) stroomt lucht makkelijk het model in en dus komt er veel lucht via de inrit. Als er echter een vernauwing is in de inrit (middelste figuur) komt er te veel lucht naar binnen; hiermee moet rekening worden gehouden. Dit kan ofwel door deze vernauwing op te nemen in het 3D-CFD-model ofwel door het toevoegen van een passende weerstand. Als er sprake is van een bocht en lange gang, zal er nog minder lucht het model instromen via de inrit (rechter figuur).



Figuur 2.1 De invloed van de grens van een rekenmodel

- > In hoeverre heeft de gebouwde omgeving invloed op het resultaat en in hoeverre moet deze worden meegenomen in het 3D-CFD-model?
- > Vaak worden geometrische details niet opgenomen in een 3D-CFD-model om de rekentijd acceptabel te houden. Hier dient goed over nagedacht te worden. Hieronder staat een aantal praktijkvoorbeelden:
 - Ventilatiekanalen worden doorgaans niet opgenomen in een model, maar als ze erg groot zijn of bijvoorbeeld voor een toevoerventilator lopen, is hun invloed groot. In dat geval dient er wel degelijk rekening mee te worden gehouden.
 - Bij brandsimulaties stroomt rook vaak langs het plafond. Balken onder het plafond kunnen dus een grote invloed hebben op de uitkomst. Echter, een stoeprand van dezelfde hoogte wordt vaak genegeerd, wat een prima keuze is. In figuur 2.2 zijn de effecten hiervan weergegeven
 - Geparkeerde auto's kunnen invloed hebben op het resultaat van een CFD-brandsimulatie (in positieve dan wel negatieve zin).



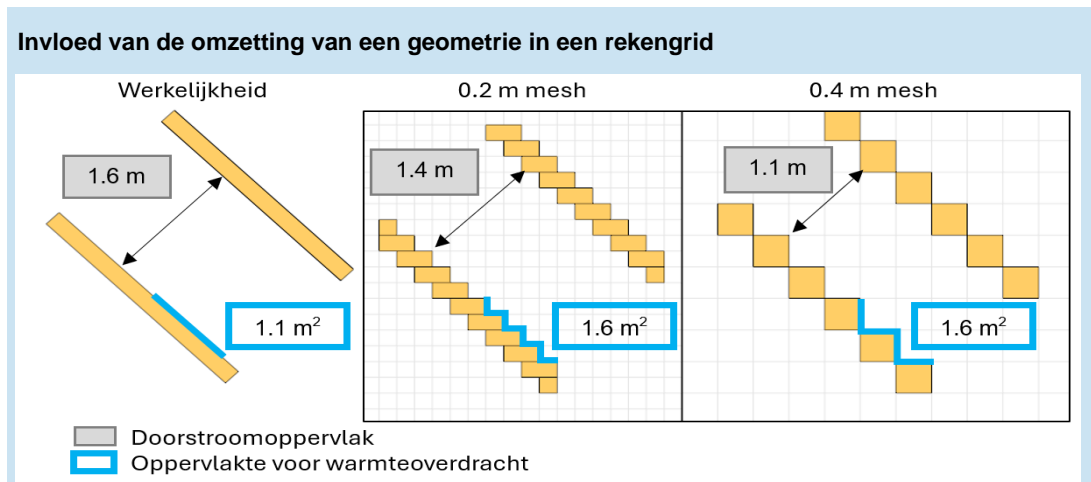
Figuur 2.2 Rook- en temperatuurverspreiding met en zonder balken

Invloed van constructiedelen aan het plafond op rook en temperatuurverspreiding

Rook verspreidt zich doorgaans onder het plafond en balken zijn derhalve belangrijk om mee te nemen in het CFD-model. In bovenstaande voorbeeld wordt voor hetzelfde scenario het effect van balken geïllustreerd. Met balken verzamelt rook zich tussen de balken en de rook blijft hierdoor nabij de brand lokaal heter (bovenste figuur). Zonder balken verspreidt de rook zich verder, maar is door warmteverliezen en inmenging ook koeler.

- > Afhankelijk van het CFD-softwarepakket en de gekozen grid is het soms niet of moeilijk mogelijk om schuine en/of gebogen (ronde of ovale) constructies te modelleren. Wordt

deze beperking in het model¹ al dan niet buiten beschouwing gelaten? In figuur 2.3 zijn de effecten hiervan weergegeven.



Figuur 2.3 Invloed van de omzetting van een schuine wand in een rekengrid

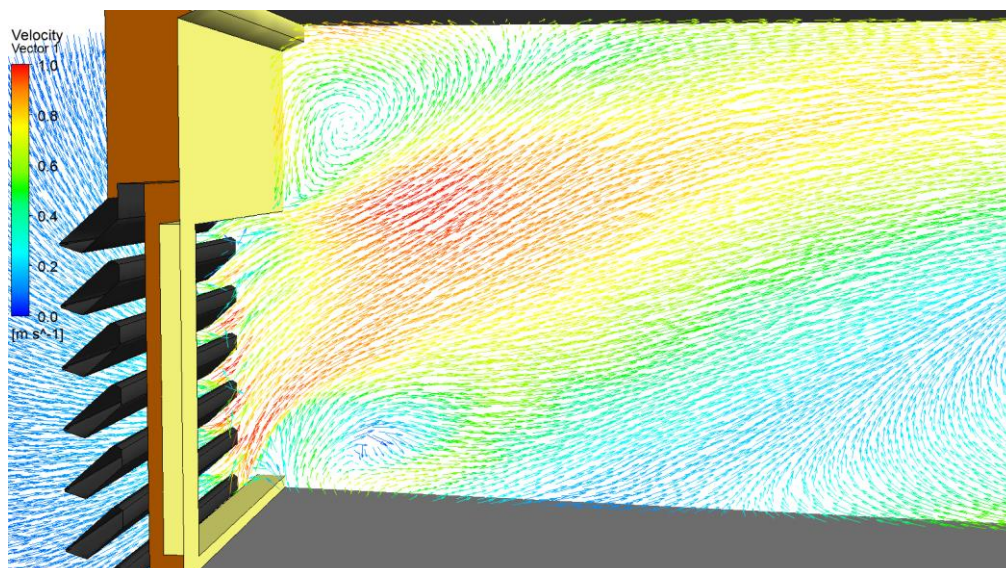
In bovenstaande figuur staat weergegeven hoe FDS (Fire Dynamics Simulator (NIST): een veel gebruikt CFD-modelleringsprogramma) een schuine wand van een geometrie omzet in een rekengrid, voor twee verschillende maten rekencellen. Te zien is dat door de discretisatie het doorstroomoppervlakte kleiner wordt, maar dat door het verfijnen van de grid het effect kleiner wordt. Het oppervlakte beschikbaar voor warmteoverdracht wordt echter groter, ongeacht de mate van verfijning. Beide effecten kunnen een invloed hebben op de uitkomst van een CFD-brandsimulatie en men moet hier bedacht op zijn in relatie tot het onderzoeksdoel.

- > Hoe worden ventilatieopeningen gemodelleerd? Als deze exact worden nagemaakt in het model, moeten er ook voldoende gridelementen aanwezig zijn. In sommige gevallen is het praktisch 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. Een en ander moet altijd beschreven en goed onderbouwd worden.
- > Een (ventilatie)rooster wordt vaak vereenvoudigd ingevoerd. Cellen zijn meestal niet klein genoeg om de structuur van een rooster in te kunnen geven. In dit geval wordt een submodel aan de opening toegekend waarmee de aerodynamische eigenschappen van een rooster worden opgelegd in de simulatie. Hier moet goed over worden nagedacht en de opsteller van de CFD-brandsimulatie moet in de rapportage beschrijven hoe hiermee is omgegaan gegaan. In figuur 2.4 zijn de effecten van een lamellenrooster op de luchtstroming weergegeven.

Invloed van een lamellenrooster

Vaak worden roosters niet in dit detailniveau gemodelleerd, maar met een submodel. Belangrijk is om de eigenschappen van dit rooster goed mee te nemen. Een rooster zorgt voor weerstand en kan de stroomrichting beïnvloeden.

¹ '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.



Figuur 2.4 Lucht die de garage in stroomt via een lamellenrooster

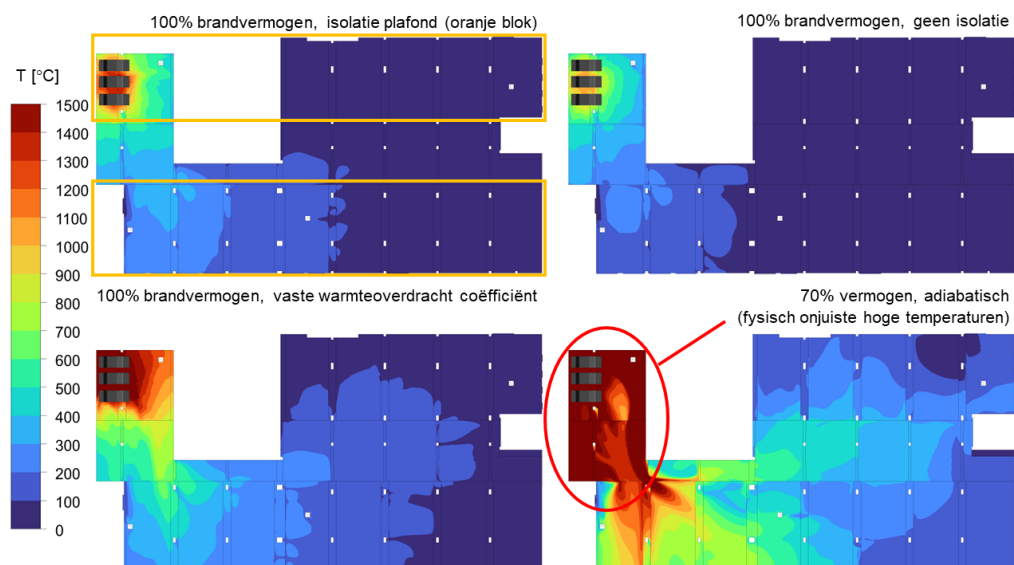
- > In hoeverre worden de materiaaleigenschappen van constructiedelen zo gemodelleerd dat het thermisch gedrag van constructie ook correct wordt weergegeven? Het adiabatisch invoeren van de wanden in plaats van specifieke thermische eigenschappen en de juiste dikte van de constructies, kan een flinke invloed hebben op de gastemperatuur in het rekendomein. Het wel of niet meenemen van de materiaaleigenschappen is afhankelijk van de doelstelling van de CFD-brandsimulatie. In figuur 2.5 is een aantal bekende materiaaleigenschappen weergegeven.² Het kan, afhankelijk van de doelstelling, nodig zijn om de warmtegeleidingscoëfficiënt en soortelijke warmte die afhangt van de temperatuur mee te nemen in het model. Het opleggen van een vaste temperatuur, bijvoorbeeld door in FDS constructiedelen als *Inert* in te voeren, kan resulteren in een flinke onderschatting van de rooklaagtemperatuur en hiermee dus ook op de verspreiding van de *ceiling-jet*, de snelle horizontale verspreiding van hete rookgassen onder het plafond.

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

Figuur 2.5 Materiaaleigenschappen (bron: Kennisbank bouwfysica, reader B-3:2005)

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

Er dient opgemerkt te worden dat wanden traag opwarmen. Dit is met name het geval bij zware constructiedelen, zoals beton. De absorptie van warmte, zowel door convectie als door straling, is bij een wand tijdsafhankelijk. In het begin is een wand koud en neemt (zeer) veel warmte op. Voor een goede tijdsafhankelijke berekening dient het CFD-model in groot detail te zijn opgezet. Dit kan door de wand expliciet in het model op te nemen, of, indien nodig, een meerlaags wandmodel³ toe te passen. Het uitgaan van een constante weerstand tegen warmteoverdracht (uitsluitend op basis van warmtegeleidingscoëfficiënt en dikte) leidt bij een tijdsafhankelijk berekening tot onvoldoende afkoeling van rook. De rooklaagtemperatuur is daarmee in het model hoger dan in werkelijkheid het geval zal zijn. In onderstaande figuur 2.6 en tabel 2.1 staat de invloed van verschillende manieren van modelleren op de berekende temperaturen geïllustreerd.



Figuur 2.6 Invloed van de thermische eigenschappen van een constructie

Tabel 2.1 Invloed van de thermische eigenschappen van een constructie

Modellering	Figuur	Brand	Constructie	Lucht
100% brandvermogen (inert model) Constructie deels geïsoleerd beton Thermische traagheid massa meegenomen	linksboven	100%	64%	36%
100% brandvermogen (inert model) Constructie ongeïsoleerd beton Thermische traagheid massa meegenomen	rechtsboven	100%	78%	22%
100% brandvermogen (inert model) Constructie ongeïsoleerd beton Met vaste warmteoverdrachtcoëfficiënt	linksonder	100%	45%	55%
70% brandvermogen ⁴ (inert model) Constructie adiabatisch Adiabatisch	rechtsonder	70%	0%	70%
Effecten van thermische eigenschappen van een constructie				

³ Het opnemen van spouwen en isolatiematerialen achter een thermisch dikke constructie is soms minder zinvol.

⁴ Een 70 % convectief warmteaandeel is een veel voorkomend uitgangspunt bij modelleringen (waarbij de component straling niet wordt meegenomen).

De thermische eigenschappen van de constructie dienen, afhankelijk van het doel van de simulatie, nauwkeurig te worden gemodelleerd. De materiaaleigenschappen kunnen van invloed zijn op het CFD-model:

Isolatie: De isolatie kan een grote invloed hebben op de temperatuur in en is daarom belangrijk om mee te nemen in de modellering. De bovenste linker en rechter afbeeldingen van figuur 2.6 vergelijken de invloed van isolatie op de berekende temperatuur in een parkeergarage. Er wordt door de aanwezigheid van isolatie 36 % in plaats van 22 %⁵ van de afgegeven warmte aan de lucht overgedragen.

Thermische traagheid: De thermische traagheid van beton heeft tevens een groot effect. De afbeeldingen rechtsboven en linksonder geven de situatie weer voor respectievelijk een model waarin beton volledig is gemodelleerd (thermisch traag) en een model waarbij uitsluitend een vaste warmteoverdrachtcoëfficiënt is opgegeven. De thermische traagheid van beton heeft een grote invloed. Zonder dit te modelleren zijn de temperaturen veel hoger; met uitsluitend een vaste warmteoverdrachtcoëfficiënt wordt 55 % van de warmte afgegeven aan de lucht ten opzichte van 22 % wanneer wel rekening wordt gehouden met de thermische traagheid van beton.

Adiabatisch: De rechter twee afbeeldingen van figuur 2.6 laten het effect zien wanneer een constructie als adiabatisch wordt gemodelleerd en het brandvermogen hiervoor met 30 % wordt verlaagd. Bij de adiabatische wanden en plafonds zijn de temperaturen fors hoger; er wordt 70 % van het door de brand vrijkomende vermogen overgedragen aan de lucht, terwijl dit bij een gedetailleerde (nauwkeurige) modellering slechts 22 % is.

De verschillen in temperatuur zijn voor de verschillen in modellering groot en het is dus van belang om bij het modelleren goed rekening te houden met de materialen die zijn toegepast

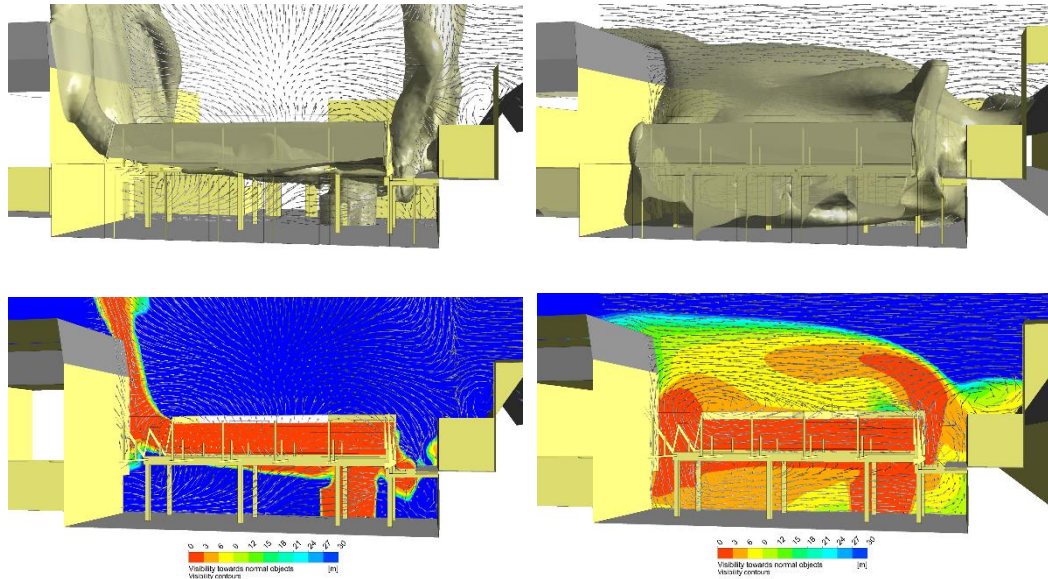
2.2 Omgeving

De invloed van omgevingscondities kunnen een grote rol spelen op de effecten van brand. Daarom moet er, zoals eerder vermeld, goed over worden nagedacht. Het is vervolgens van belang dat de relevant geachte omgevingseffecten correct gemodelleerd worden.

- > Zijn de juiste omgevings- en startcondities ingevoerd? De windsnelheid en -richting kunnen een grote invloed op de uitkomst hebben. Met name voor het modelleren van wind zijn echter een groot aantal scenario's mogelijk. Het is belangrijk dat de opsteller op een efficiënte wijze de gevoeligheid hiervan kan onderbouwen of onderzoeken. De invloed van wind wordt in onderstaande figuur worden geïllustreerd.⁶

⁵ Dit betreft de totale hoeveelheid warmte die wordt overgedragen aan de constructie. Zowel door straling als door convectie wordt minder warmte afgegeven.

⁶ https://www.researchgate.net/publication/325948986_Wind_and_Fire_Coupled_Modelling-Part_II_Good_Practice_Guidelines.



Figuur 2.8 De invloed van wind

De invloed van wind op de werking van een rook- en warmteafvoer (RWA)-installatie

Links is de situatie zonder wind afgebeeld en rechts met wind. Het waait van rechts naar links; aan de linkerkant staat op korte afstand een gebouw dat hoger is dan het horizontale dakvlak met RWA-luiken. Het wordt duidelijk dat de invloed van wind in dit geval significant is. In de linker afbeelding is er een gestratificeerde rooklaag aanwezig, waar mensen onderdoor kunnen vluchten. In de rechter figuur geval stroomt wind tegen het gebouw en wordt naar beneden gestuwd. Hierdoor stroomt geen rook het RWA-luik meer uit, maar stroomt er hier juist lucht naar binnen die vervolgens mengt met rook. Het gevolg is dat de hele ruimte vol rook komt te staan.⁷

- > 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 degene die de CFD-berekening uitvoert 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 over het algemeen groter te zijn dan het bouwkundige object. Dit is bijvoorbeeld van belang als er wind wordt gemodelleerd en er voldoende ruimte moet zijn om wind om een gebouw heen te laten stromen. Bij een te kleine ruimte worden onrealistisch hoge drukken en mogelijk dus (ventilatie)debieten veroorzaakt. Voldoende ruimte in het rekenmodel is ook vaak nodig om de effecten van uittredende vlamlichamen en rookafvoer mee te kunnen nemen.
- > De omgevingstemperatuur kan van invloed zijn op de absolute waarde van de berekende temperatuur. De relatieve temperatuurtoename door een brand is min of meer constant bij gelijke vermogensafgifte. Maar als bijvoorbeeld de omgeving 30 °C is in plaats van 15 °C, is ook de absolute temperatuur van de rook circa 15 °C hoger. Dit kan van belang zijn als bijvoorbeeld beoordeeld wordt of vluchten door een omgevingstemperatuur van 60 °C nog mogelijk is. Het gebruikelijk om uit te gaan van een temperatuur van 20 °C in een gebouw.

⁷ Anderzijds verdunt de rook ook door extra inmenging. Wat doet dat met andere relevante parameters zoals temperatuur en rooksamenstelling?

2.3 Brand

In een CFD-brandsimulatie zal een brand worden gemodelleerd. Hierbij dient vooraf een inschatting gemaakt te worden van de brand die zal optreden. Degene die de simulaties uitvoert, moet daarom de brandscenario's en brandlocaties vaststellen en zijn of haar keuzes te motiveren. Het brandscenario zal (in beginsel) voorspeld moeten worden op basis van richtlijnen, literatuur, praktijktesten en berekeningen.⁸ Laat zo veel scenario's berekenen als nodig is om het doel van de berekening te bereiken. Denk hierbij ten minste aan realistische en veronderstelde 'worstcase-scenario's'; deze scenario's moeten aansluiten bij de doelstelling van de simulatie.

Er zijn meerdere aspecten die van belang zijn bij het beschrijven van een brandscenario:

Brandverloop: Ontwikkelt de brand zich over tijd of wordt er uitgegaan van een stabiele (ontwerp)situatie, ofwel 'steady state'?⁹

- > **Steady state:** Bij een steady state brand is het maximale brandvermogen van belang. Dit is meestal een (maximaal) aan te nemen (piek)brandvermogen dat constant wordt opgelegd in het model. Bij dergelijke simulaties kan enkel een uitspraak worden gedaan over de eindsituatie en dient te worden bevestigd dat het verkregen stromingsbeeld stabiel is geworden.
- > **Tijdsafhankelijk:** Bij een tijdsafhankelijke brand is het brandvermogen variabel in de tijd. Er is een groeifase, soms een piekfase en uiteindelijk een afname in het brandvermogen als de brand is uitbrandt of wordt geblust. Dit is de meest voorkomende simulatievorm.

Groeisnelheid: De groeisnelheid van de (tijdsafhankelijke) brand kan op basis van standaard modelbranden die passen bij de gebruiksfunctie worden gekozen of op basis van tests. Standaardwaarden voor kwadratisch groeiende branden op basis van gebruiksfuncties zijn traag (600s¹⁰), medium (300s), snel (150s) en ultra-snel (75s) (van Mierlo, R.J.M. et al., 2021). Daarnaast kan de groeisnelheid van brand ook middels testen worden aangetoond. Bij branden in hogere ruimten is het vermogen dat in een bepaalde tijd bereikt wordt tevens afhankelijk van de stapelhoogte.

Referentie-brandvermogen:

Het referentie-brandvermogen is het vermogen van een brand per vierkante meter (kW/m²) en wordt ook wel de brandvermogensdichtheid genoemd. Vaak heeft een modelbrand afhankelijk van de gebruiksfunctie een bepaalde intensiteit. Aangezien de groei ook afhangt van de gebruiksfunctie, wordt het oppervlakte van de brand dan berekend op basis van het vermogen (in de tijd) en het referentie-brandvermogen.

Een brand met hogere intensiteit heeft bij een gelijk vermogen een kleiner oppervlak en kleinere omtrek. Dit leidt tot een verminderde inmenging van lucht uit de omgeving en daarmee vaak tot minder rookdebiet. De rook is echter wel heter. Meestal groeit een brand met een hoge intensiteit ook sneller, waardoor er zowel meer als hetere rook is.

⁸ Het kan zelfs voorkomen dat aanvullende praktijktesten noodzakelijk zijn om een juiste ontwerpbrand te kunnen invoeren. Daarbij kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt 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.

⁹ De keuze tussen een steady state of een tijdsafhankelijk brandverloop is zeer afhankelijk van het doel van de simulatie.

¹⁰ De tijd die nodig is om van nul naar één megawatt te groeien. In dit geval 600 seconden.

Zie in onderstaande tabel een vergelijking tussen de eigenschappen van een kantoorbrand (tijdsconstante = 300s, referentie brandvermogen = 250 kW/m²) en een brand in een winkel (tijdsconstante = 150s, referentie brandvermogen = 500 kW/m²).

Tabel 2.2 Vergelijking typen brand en eigenschappen

Type brand	Kantoorbrand	Winkel	Eenheid
Referentie brandvermogen	250	500	kW/m ²
Tijdsconstante	300	150	s
Eigenschappen bij 1 MW:			
Tijd	300	150	s
Oppervlakte	4	2	m ²
Omtrek	7,1	5,0	m
Eigenschappen op 300 s:			
Vermogen	1	4	MW
Oppervlakte	4	8	m ²
Omtrek	7,1	10,0	m

Bij een gelijk brandvermogen leidt een minder intense brand door zijn grotere oppervlakte en omtrek tot meer inmenging van lucht en daarmee tot meer rookdebiet. De rook is wel kouder. Na dezelfde duur van de brand (bijvoorbeeld 300 s) produceert een intensere brand echter wél meer rook en meer warmte.

Verbrandingswarmte: De verbrandingswarmte is de hoeveelheid energie die per massa is opgeslagen in een stof. In praktijk past een hoge verbrandingswaarde meestal bij een heviger brand. Vaak is echter in de modellering het opgelegde brandvermogen (in de tijd) de basis van de modelbrand en wordt de verbrandingswaarde gebruikt om de rookproductie terug te rekenen. In dát geval zal een hogere verbrandingswaarde juist tot minder verbrandingsproducten – dus rookproductie – leiden. Een hoge verbrandingswaarde is in dat geval dus niet maatgevend

Rookproductie: Via conversiefactoren worden de hoeveelheid rookproductie (of rookdichtheid) en/of hoeveelheid (giftige) gassen in de rook bepaald. Deze factoren bestaan (bijvoorbeeld) uit een soot yield.

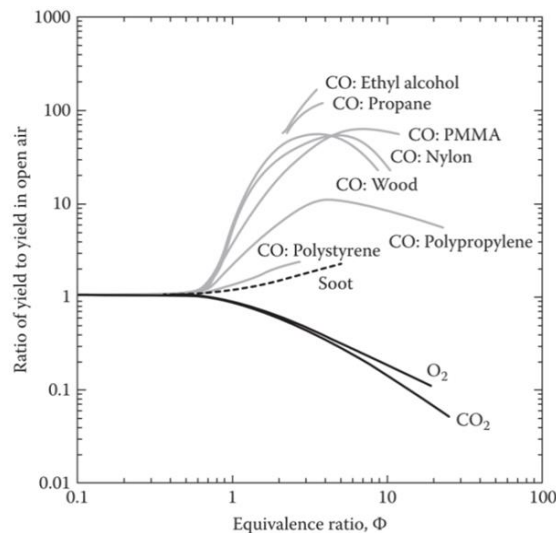
Yield: De yield is de hoeveelheid van een bepaald verbrandingsproduct dat vrijkomt, afhankelijk van de hoeveelheid massa die verbrandt.¹¹ De vrijkomende verbrandingsproducten zijn gezien het stochastische karakter van brand altijd dynamisch. CO-yields en

¹¹ Massa van brandstof die verbrandt in tijd x yield verbrandingsproduct = massa verbrandingsproduct in tijd.

soot-yields (roet) worden echter niet berekend door een CFD-softwarepakket, maar worden (doorgaans) als constante waarde ingegeven door de modelleur. Omdat ook de verbrandingswarmte ('heat of combustion') bepaalt hoeveel kilogram brandstof er verbrandt bij een bepaald brandvermogen, is de hoeveelheid vrijkomende verbrandingsproducten (en daarmee de productie van rook) direct gerelateerd aan de verbrandingswarmte van de brandstof. De relatie tussen vrijkomende hoeveelheid 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. Onderstaande waarden worden vaak gehanteerd (zie ook het blauwe kader onder figuur 2.9):

1. Soot-yield: 2,6 % (brandstofbeheerste brand) tot 10 % (ventilatiebeheerste / gesprinklerde brand). Een autobrand heeft een soot yield van circa 12 % en voor een woningbrand wordt vaak 10 % aangehouden (Mierlo, R.J.M., Tromp, A.J. 2021).
2. CO-yield: 1,0 % (brandstofbeheerste brand) tot 10 % (ventilatiebeheerste / gesprinklerde brand) (Mierlo, R.J.M., Tromp, A.J. 2021).



Figuur 2.9 De invloed van ventilatiecondities op yields (Karlsson, B. et al., 1999)

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-brand simulaties.

CFD-Software:

> In CFD-softwarepakketten wordt er bij praktische problemen meestal gebruikgemaakt van vereenvoudigde verbrandingsmodellen. Afhankelijk van de gebruikte software wordt daarbij veel overgelaten aan de CFD-gebruiker. Er is veel kennis nodig om een (brand)simulatiemodel goed op te zetten. Bij een multipurpose softwarepakket dienen de gehele brand en alle eigenschappen te worden gedefinieerd. Bij softwarepakketten toegewijd aan brandsimulaties (zoals FDS) staan veel settings als 'default' ingesteld. Men moet goed op te letten dat deze default settings ook overeenkomen met de in de

uitgangspunten en normen opgestelde waarden. Denk hierbij aan een aan een brandstofgerelateerde default soot yield.

- > De simpelste manier om een brand te modelleren is een inert brandmodel waarbij simpelweg het brandvermogen in een volume (ongeveer het vlamvolume) vrijkomt. In ditzelfde volume komen verbrandingsproducten of roet vrij. Dit model is geschikt wanneer er voldoende zuurstof is en als details (zeer) dicht bij de brand niet erg belangrijk zijn. Denk hierbij aan onderzoeksdoelen zoals het dimensioneren van een RWA-installatie voor een parkeergarage, tunnel, atrium of winkelcentrum.
- > Er zijn ook chemische (complexere) verbrandingsmodellen. Hiermee wordt de interactie tussen turbulente lucht die zuurstof bevat en het verbrandingsproces beter gemodelleerd dan met de eenvoudige (inerte) verbrandingsmodellen. In dit type verbrandingsmodel zijn gradaties. Een simpeler (single step) combustion model kan goed een ventilatie-beheerste brand modelleren met uitslaande vlammen. Hierbij wordt de pyrolyse, ofwel massa-afname van de brand, opgelegd. Het modelleren van de daadwerkelijke brandvoortplanting is zelfs met geavanceerde chemische verbrandingsmodellen in de praktijk slechts beperkt haalbaar, omdat ze niet of nauwelijks gevalideerd zijn en om een erg gedetailleerde invoer vragen.
- > Afhankelijk van het doel van de simulatie is een model meer of minder geschikt en heeft een versimpeling grotere of minder grote gevolgen. Zo is voor het ontwerp van een RWA-installatie doorgaans minder detail nabij de brand noodzakelijk; de hoeveelheid rook en de temperatuur op grotere afstand van de brand worden dan vaak alsnog realistisch berekend. Wil men echter weten wat de thermische belasting op een stalen kolom is dicht bij een brand, dan is een betere modellering van de brand zelf noodzakelijk. Hetzelfde geldt voor het modelleren van een zuurstofbeheerste brand; dit is alleen mogelijk met een chemisch verbrandingsmodel. In onderstaande figuur 2.10 staan de verschillen tussen een inert model en een verbrandingsmodel geïllustreerd. Het is belangrijk om bij een verbrandingsmodel te controleren of de warmte die afgegeven moet worden wel is vrijgekomen (met andere woorden: of het aangenomen scenario daadwerkelijk gesimuleerd is). Andersom dient bij een inert model te worden gecontroleerd of de uitkomsten wel fysisch juist zijn (vaak zijn de temperaturen onrealistisch hoog als een inert model wordt toegepast in een situatie waarin onvoldoende zuurstof beschikbaar is voor het vrijgegeven vermogen; temperaturen boven de 1000 °C zullen in de praktijk bij de meeste brandtypen niet snel voorkomen).

Verbrandingsmodel - rookverspreiding



Inert model- rookverspreiding



Verbrandingsmodel - temperatuur



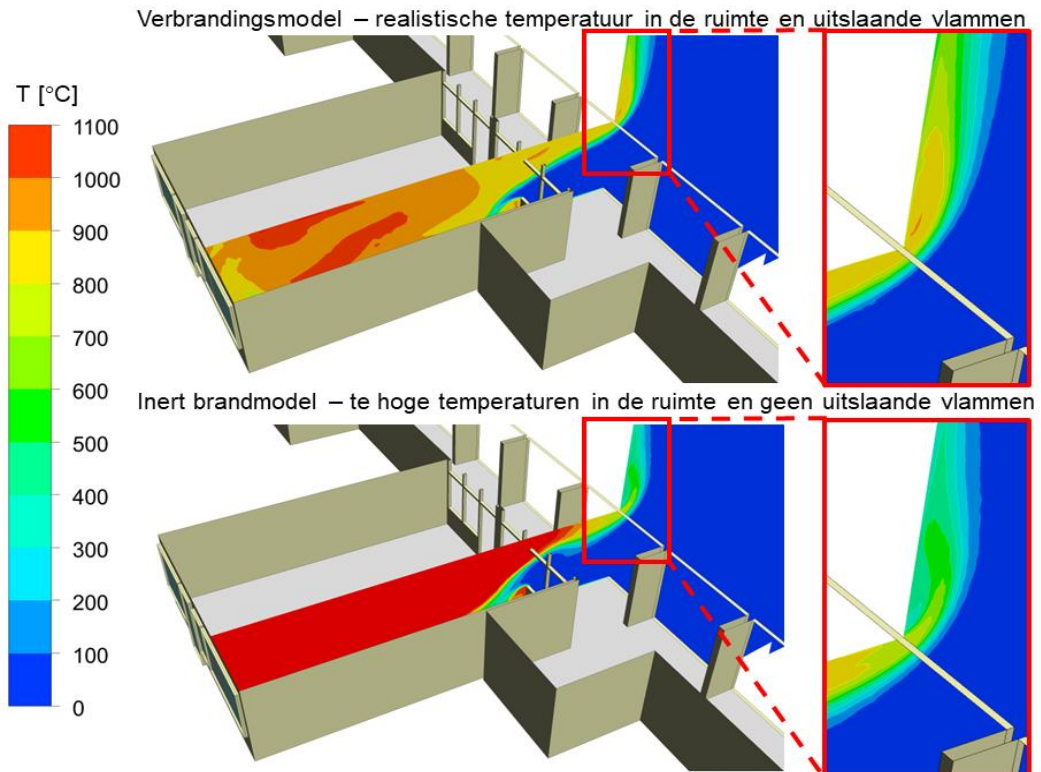
Inert model - temperatuur



Figuur 2.10 Invloed van een verbrandingsmodel en inert brandmodel bij een tunnelbrand

Verskil tussen een verbrandingsmodel en inert brandmodel bij voldoende ventilatie

Het verschil in resultaten bij de simulatie van een tunnelbrand tussen een verbrandingsmodel (boven in figuur 2.10) en een inert brandmodel (onder in figuur 2.10) is bij voldoende ventilatie zeer klein.



Figuur 2.11 Invloed van een verbrandingsmodel en inert brandmodel bij een woningbrand

Verskil tussen een verbrandingsmodel en inert brandmodel bij onvoldoende ventilatie

Het verschil in resultaten bij de simulatie van een woningbrand bij flashover condities kan groot zijn. In dit geval is de brand zuurstofbeheerst en zijn er uitslaande vlammen. Dit is alleen goed te modelleren met een verbrandingsmodel (boven). Een inert brandmodel zal de temperatuur significant te hoog inschatten, omdat alle energie in de woning vrijkomt. De temperatuur onder het plafond van de galerij is met het inerte verbrandingsmodel juist te laag, omdat er geen uitslaande vlammen worden berekend.

Straling:

Het modelleren van straling vereist een submodel binnen de CFD-brandsimulatie. Een stralingsmodel maakt gebruik van ray-tracing en/of een eigen subgrid. Er zijn meerdere soorten stralingsmodellen. De meest voorkomende manieren om absorptie door straling te berekenen in CFD-softwarepakketten zijn:

- > Met een 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 golfenlengte 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 binnen het relevante stralingsgebied, kunnen we aannemen dat het gas zich als grijs gas gedraagt. Let op:

om de lokale effecten van straling zeer dicht bij 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.

De mate van warmteoverdracht door straling hangt af van de temperatuur van een oppervlak, rooklaag of vlam. De mate van warmteoverdracht hangt tevens af van de emissiviteit (en absorptie) van het vlak of de rooklaag en de zichtfactoren van de onderdelen die warmte uitwisselen via straling.

Straling

De hoeveelheid warmte die wordt overgedragen door middel van straling hangt tot de macht vier af van het temperatuurverschil tussen beide objecten. Straling is dus in toenemende mate relevant in een brandsimulatie als de temperatuur hoger wordt.

De zichtfactor speelt daarnaast een grote rol. Een rooklaag boven in een grote ruimte kan een zichtfactor van 1 benaderen. Bij een dikke donkere rooklaag met een emissiviteit van (bijna) 1 is de hoeveelheid ontvangen stralingsflux te benaderen op basis van de temperatuur van de rooklaag.

Vaak wordt gesteld dat de rooklaagtemperatuur niet heter mag zijn dan 200 °C, omdat dit bij een zwarte straler¹² en een zichtfactor van 1 overeenkomt met een stralingsflux van 2,5 kW/m². Bij een puntbron gaat deze aanname echter niet op. Dan is de zichtfactor vele malen lager en de totale ontvangen stralingsflux dus ook.

De stralingscomponent wordt niet altijd numeriek berekend in een CFD-brandsimulatie vanwege de benodigde extra rekencapaciteit. Dit kan echter een te hoge inschatting van de rooktemperatuur tot gevolg hebben. Als alternatief wordt er een aanname gedaan voor de hoeveelheid warmte die wordt overgedragen door straling; dit wordt vervolgens van het vermogen dat vrijkomt in de CFD-brandsimulatie afgehaald. Alleen het convectieve brandvermogen wordt dan gemodelleerd. Dit is een behoorlijke versimpeling van de werkelijkheid en bij de testen waarop dit is gebaseerd wordt vaak alleen directe straling vanuit de brand zelf naar de constructie bedoeld. Hete rook die op afstand is van de brand, zal (afhankelijk van de temperatuur) echter nog altijd veel warmte verliezen door straling. Dit wordt door het doen van deze aanname genegeerd, waardoor de rook als te heet wordt gemodelleerd. Het modelleren van straling heeft daarom altijd de voorkeur.

Alle CFD-brandsimulatie-softwarepakketten kunnen de stralingsflux als output genereren. Door deze output op te vragen en te bestuderen kan goed worden beoordeeld of warmteoverdracht door straling goed gemodelleerd is.

2.4 Ventilatie en installatieonderdelen

Bij een brandsimulatie worden regelmatig de volgende onderdelen gemodelleerd, zoals:

- > detectie van brand

¹² Zwarte straler: Een (theoretisch volmaakt) object welke aan de Planckkrommen voldoet. Dit wil zeggen dat het lichaam de straling die erop valt volledig absorbeert, en uitzendt. De golflengte van deze uitgezonden straling is alleen afhankelijk van de temperatuur van het zwarte lichaam.

- > sprinklerinstallatie (en de inzet van de brandweer)
- > ventilatiesystemen en luchtbehandeling
- > roosters
- > lekkage.

Deze worden in onderstaande paragrafen behandeld.

2.4.1 Detectie van brand

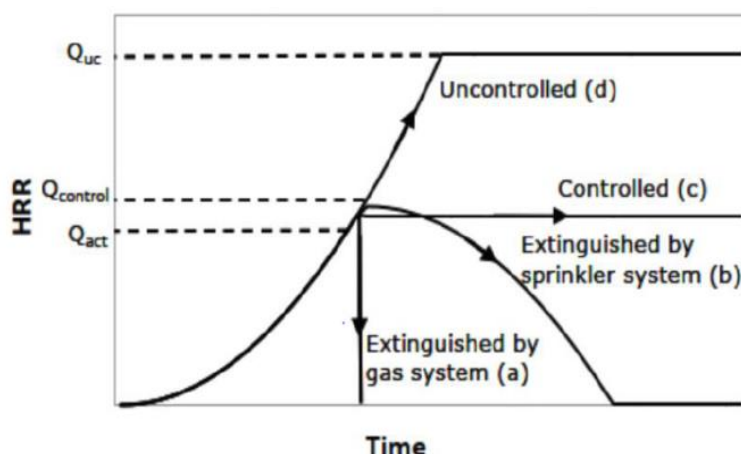
Het is mogelijk om de detectie van rook met een submodel te berekenen in een CFD-brandsimulatie. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat er een vorm van schijnnaauwkeurigheid kan ontstaan. Het brandvermogen in de tijd is immers een aanname en ook de rookproductie op basis van dit vermogen is daarmee evenzeer een aanname.¹³ Is bijvoorbeeld een snelgroeïende brand met een hoge rookproductie wel een negatief scenario als het gaat om de detectiesnelheid van een brand? Of is in dit geval een lager brandvermogen en minder maar koudere rook een conservatiever scenario? Hierbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat een traag groeiende brand later wordt gedetecteerd, maar ook minder rook produceert en dus minder snel tot slechtere condities zal leiden. Elke aanname moet in het teken van het brandveiligheidsdoel staan.

2.4.2 Sprinklerinstallatie (en de inzet van de brandweer)

Het exacte effect van een sprinkler- en/of watermistinstallatie is lastig te modelleren in elk CFD-model.

Het moment waarop de sprinklerinstallatie activeert, wordt meestal bepaald in de CFD-brandsimulatie of wordt berekend (bijvoorbeeld) door middel van de correlaties van Alpert (Alpert, R.L., 1972). Na activatie van de sprinkler kunnen de volgende effecten van de sprinkler optreden voor wat betreft het brandvermogen (zie onderstaand figuur):

- (a) De brand wordt (vrijwel direct) geblust.
- (b) De brand wordt gedeeltelijk beheerst en het vermogen neemt af, waarna de brand stabiliseert.
- (c) De brand groeit niet meer, maar het verbrandingsproces gaat door.
- (d) De brand wordt niet geblust (het faalscenario van de installatie).



¹³ Ontwikkelde modellen om o.b.v. de aanwezige materialen de branduitbreiding en het brandvermogen zijn voor praktijksituatie nog zeer onbetrouwbaar gebleken (ondanks dat deze bijvoorbeeld wel in FDS beschikbaar worden gesteld). Let dus ook goed op als er op voorhand geen brandcurve wordt vastgesteld.

Figuur 2.12 Mogelijk verloop van de brandvermogenscurve¹⁴ bij activatie van een blusinstallatie, (Staffansson L., 2010)

Welk scenario zal optreden in de praktijk is lastig te voorspellen. Doorgaans wordt scenario c (controlled) als conservatieve keuze ingevoerd voor het scenario waarbij de sprinkler naar behoren werkt. Dit is de eenvoudigste manier om de invloed van sprinklers op het brandscenario mee te nemen in een CFD-brandsimulatie. Het moment van sprinkleractivatie dient wel goed te worden berekend. Dit kan door middel van de onderstaande formule:

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} \cdot (T_g - T_l) - \frac{C}{RTI} \cdot (T_l - T_m)$$

Waarin:

$\frac{dT_l}{dt}$	=	Temperatuur stijging per s van het patroon	[K/s]
u	=	Snelheid van de rookgassen ter plaatse van het patroon	[m/s]
RTI	=	Response Time Index	[m ^{0.5} s ^{0.5}]
C	=	Conductivity factor	[m ^{0.5} s ^{-0.5}]
T_g	=	Temperatuur van de rookgassen ter plaatse van het patroon	[K]
T_l	=	Temperatuur van het patroon	[K]
T_m	=	Temperatuur het materiaal waar het patroon aan vast zit	[K]

3.

(Heskestad, L. et al., 1988).

Met name een watermistinstallatie heeft een grote invloed op de temperatuur in de ruimte. Het constant houden van het brandvermogen na activering van de sprinklers, zonder verder rekening te houden met afkoeling van de rook, kan een wel erg conservatief scenario zijn. Zeker als de temperatuur belangrijker is dan de zichtlengte.

Met een CFD-brandsimulatie is in principe¹⁵ de interactie van druppels met de omgeving te modelleren. Het activeren van de sprinklerinstallatie heeft twee effecten op de rooklaag:

1. De luchtstroming kan invloed hebben op de verplaatsing van druppels. Dit is met name bij een watermistinstallatie relevant, omdat hier de druppelgrootte kleiner is en de druppels meer met de luchtstroming mee verplaatsen. Andersom zijn bij een conventionele sprinklerinstallatie de druppels groter en kunnen juist de luchtstroming beïnvloeden.
2. De warmteoverdracht (van en) naar de druppel en het effect hiervan op de temperatuur kunnen tevens worden gemodelleerd. Afhankelijk van de druppelgrootte en het temperatuurverschil worden de opwarming van de druppels en de hoeveelheid verdamping berekend.

Beide effecten onttrekken warmte uit de hete rook. Deze koelt dus af, waardoor hij kan uitzakken. Het vraagt een daarvoor gevalideerd CFD-pakket¹⁶ en gedegen kennis en ervaring van de gebruiker om deze effecten juist te modelleren. Een aantal andere effecten

¹⁴ Q_{ue} : 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.

¹⁵ Voor een betrouwbare modellering is informatie over het sproeipatroon van de sprinklerkop vereist. Het modelleren van een sproeipatroon vraagt vanwege de benodigde gridresolutie veel rekenkracht.

¹⁶ FDS heeft ook een aantal submodellen om sprinklers te modelleren.

van sprinklers op de brand zijn zeer complex om te modelleren of zijn onvoldoende gevalideerd. Denk hierbij aan:

- > De interactie tussen waterdruppels (en druppelgrootte) en de brand en het effect op het verbrandingsproces en het brandvermogen. (Dit is een thermisch, chemisch en aerodynamisch proces en daarom lastig te modelleren.)
- > Het smoren van de brand door de installatie, wat leidt tot een toename in roetvorming en toxische verbrandingsgassen.¹⁷ (Dit is een thermisch en chemisch proces en daarom lastig te modelleren.)
- > Bij een door de sprinkler gecontroleerde brand zal sprake zijn van stoomvorming, dat kan leiden tot volumetoename. De volumetoename kan onder meer (een al dan niet beperkte) drukopbouw en hiermee samenhangende stromingen tot gevolg hebben. Dit is met name bij een hogedruk watermistinstallatie relevant. Dit proces kan wel worden gemodelleerd, maar dan moet er een 'particle track model' worden toegepast waarbij druppels ten gevolge van warmte kunnen verdampen.
- > De waterlevel of stoomvorming, waardoor de zichtlengtes slechter worden. Dit heeft een relatie met het aspect vluchtveiligheid.

Degene die de CFD-brandsimulatie uitvoert, zal uit moeten kunnen leggen hoe de invloed van sprinklers is gemodelleerd en welke fysische effecten zijn meegenomen.

2.4.3 Ventilatiesystemen en de luchtbehandelingsinstallatie

Het op een juiste wijze invoeren van de ventilatie in de CFD-brandsimulatie vraagt aandacht. Hierbij gelden de volgende aandachtspunten:

Afschakeling: Een ventilatiesysteem voor dagelijks gebruik wordt veelal (maar dus niet altijd) uitgeschakeld bij branddetectie.

Instreamlocaties: De locaties waar lucht het CFD-model instroomt, zowel op natuurlijke als mechanische wijze, moeten in detail worden gemodelleerd. De luchtsnelheid moet kloppen en er zouden geen vereenvoudigingen moeten worden gedaan die de luchtsnelheid beïnvloeden. De stroming van toevoerlucht door het CFD-model wordt hier namelijk sterk door beïnvloed. Dit kan weer invloed hebben op:

- > De worp van de toevoerlucht (hoe ver die lucht komt).
- > De mate van inmenging van rook uit de rooklaag en invloed op de rookpluim. Dit is belangrijk voor het ontwerpen van RWA-installaties.
- > De druk in de ruimte.

Afvoerlocaties: Voor het modelleren van afvoerlocaties zijn de afmetingen veel minder van belang. Het belangrijkste is dat het juiste debiet op de juiste hoogte wordt afgevoerd.

Stuwdrukventilatoren: Bij het modelleren van stuwdrukventilatoren dient ook een goede worp te worden berekend. Tevens dienen de eigenschappen, zoals rookdichtheid en temperatuur, van de lucht die wordt aangezogen en uitgeblazen (rekening houdend met het warmtetransport binnen de ventilator) ongeveer gelijk te zijn. Stuwdrukventilatoren zuigen lucht en rook aan en blazen die met hogere snelheid weer uit. De belangrijkste parameter is de hoeveelheid stuwdruk ('thrust'). Als door beperkingen in het softwarepakket een stuwdrukventilator niet exact kan worden gemodelleerd, dient aandacht te worden

¹⁷ Voor de CO- en soot-yield gaat men meestal uit van een situatie waarin de brand gesmoord is (dit geeft de hoogste yields).

gecontroleerd of geproduceerde hoeveelheid stuwdruk klopt. Het kan zijn dat een kleine nozzle van een stuwdrukventilator niet past in het toegepaste rekengrid en dat de uitblaasnozzle dan een groter oppervlakte krijgt.¹⁸ Hierdoor zijn bij gelijk debiet de uitblaas-snelheid lager en de stuwdruk te laag. De combinatie massastroom en uitblaassnelheid moet dan zo worden ingesteld dat de *impuls* (massastroom x snelheid) correct is. Bij het gebruik van louvers om de lucht in de goede richting te drukken wordt mogelijk fictief stuwdruk toegevoegd en moet ook hiervoor worden gecorrigeerd. Het is verder van belang dat de eigenschappen van de aangezogen lucht worden gekoppeld aan de uitgeblazen lucht.

In CFD-modellen kunnen stuwdrukventilatoren zijn openomen. Stuwdruk ventilatoren zijn bedoeld om de brand met wind in de rug en rookvrij te kunnen benaderen, dan wel om backlayering¹⁹ bij tunnels te voorkomen. NFPA 502 2023²⁰ geeft een informatieve handreiking voor het berekenen van de benodigde snelheid voor tunnels, die eventueel (en enkel indicatief) naast de resultaten van de CFD-brandsimulatie kan worden gelegd. De relatie die daarvoor iteratief kan worden opgelost is:

$$V_c = K_l K_g \left(\frac{gHQ}{\rho C_p A T_f} \right)^{1/3} \quad \text{met } T_f = \left(\frac{Q}{\rho C_p A V_c} \right) + T$$

Met:

V_c : kritische snelheid [m/s]	A : Aanstroomoppervlak [m ²]
C_p : soortelijke warmte [kJK ⁻¹ kg ⁻¹]	T : Aanstroom temperatuur [K]
K_g : als $G < 0$: $K_g = 1 + 0.0374G^{0.8}$; als $G \geq 0$ $K_g = 1$	G : Hellingspercentage [%]
H : Hoogte [m]	Q : Vermogen (conv.) brand [kW]
K_l : Kritische Froude nummer (onder andere $Q > 100\text{MW}$: $K_l = 0.606$, $Q = 50\text{MW}$: $K_l = 0.68$, $Q < 10\text{MW}$: $K_l = 0.87$)	

2.4.4 Roosters

Roosters worden vaak niet in detail gemodelleerd. Het is dan van belang om het effect van het rooster op de luchtstroming, zowel de weerstand als de richting, wel juist te modelleren. Vaak wordt een weerstandcoëfficiënt toegepast. Dit is een goede methode. Er moet echter wel op de volgende zaken worden gelet:

- > Hoe is de weerstandcoëfficiënt uit de literatuur bepaald? Zitten hier bijvoorbeeld al de in- en uitstroomverliezen in? Hoe is de weerstand getest, in een kanaal of bij vrije uitstroom?
- > Bij het opzetten van een model dient er rekening mee te worden gehouden welke verliezen al door de CFD worden berekend en welke verliezen in het submodel moeten, zodat er geen verliezen dubbel worden geteld. Bijvoorbeeld, wanneer een volume met een 'weerstand in een wand' wordt toegepast, dan berekent de CFD zelf de in- en uitstroomverliezen. Deze moeten dus niet (opnieuw) in de weerstandcoëfficiënt meegenomen worden.

¹⁸ Een verder verfijning van de gridresolutie is ook mogelijk, maar dit vraagt uiteraard veel meer rekencapaciteit.

¹⁹ Backlayering: Het voorkomen van rookverpreiding tegen de ventilatierichting in, waardoor aanwezige personen bovenwinds kunnen vluchten.

²⁰ Opgemerkt wordt dat deze relatie door de jaren heen is veranderd. Met name in de versie NFPA 502 uit 2020 was een significant andere relatie opgenomen. Deze is in de herziening van 2023 weer teruggebracht naar de versie die grotendeels overeenkomt met de versies van 2011, 2014 en 2017. Het gebruik van de relatie is beperkt, aangezien deze is opgesteld t.a.v. tunnelveiligheid en een zeer beperkt toepassingsgebied heeft. Ze kan echter indicatief helpen bij de beeldvorming over de benodigde kritische snelheid. In de NFPA502 wordt ook aangeraden om CFD- (of locatie)testen te gebruiken.

- > In de praktijk worden nog wel eens termen die de eigenschappen van roosters beschrijven door elkaar gehaald. Hieronder enkele definities:
 - K-factor (weerstand coëfficiënt): een waarde die de aerodynamische weerstand tegen de luchtstroom beschrijft. Deze waarde beschrijft het verband tussen de snelheid (debiet) die door een rooster stroomt en de bijbehorende drukval. Dit is meestal de meest geschikte waarde om in een CFD toe te passen.
 - C-waarde (subscript e voor 'entry' en d voor 'discharge'): Dit is de verhouding van de effectieve luchtdoorlaat van een rooster ten opzichte van de theoretische luchtdoorlaat. Deze waarde is meer bruikbaar voor handberekeningen, maar kan wel worden omgerekend naar een voor een CFD-brandsimulatie geschikte weerstandcoëfficiënt.
 - Fysische vrije doorlaat: Deze waarde moet nooit in een CFD-brandsimulatie gebruikt worden. Ze zegt alleen iets over de werkelijke (geometrische) doorlaat van een rooster, maar niets over de weerstand die dit rooster oplevert.

2.4.5 Lekkage

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. In de praktijk wordt het bezwijken of vervormen van gebouwdelen niet gemodelleerd in de CFD-brandsimulatie. Het drukverloop in de brandruimte zoals berekend in de CFD-brandsimulatie kan daardoor minder betrouwbaar zijn.

Let op dat lekkage zowel een positieve als negatieve invloed op de uitkomst kan hebben, afhankelijk van het doel van de simulatie. Moet er bijvoorbeeld een bepaalde luchtsnelheid door een opening gaan, dan zorgt een lek er veelal voor dat er minder lucht door deze opening komt en is het modelleren van veel lek een conservatief scenario. Wil men echter een ruimte met beperkte luchttoevoer ventileren, dan heeft lekkage juist een positieve bijdrage. Ook nu zal door het lek de druk worden beïnvloed, maar dit geval is het modelleren van weinig lek wellicht een conservatief scenario.

- > Lekkagenaden rondom bijvoorbeeld ramen en deuren zijn in de praktijk kleiner dan de afmeting van de rekencellen. Er is daardoor een vereenvoudiging van lekkagestromen nodig. Deze vereenvoudig kan niet tot grote afwijkingen leiden.²¹ Voor het bepalen van lekkageoppervlakken kan hoofdstuk 16 uit het *Ashrae handbook HVAC fundamentals* gebruikt worden.²² NEN-EN 12101-6 (versie 2005) geeft ook verschillende waarden die als lekkage voor deuren en de constructie kunnen worden aangenomen.

2.5 Menselijk gedrag

CFD-brandsimulaties houden doorgaans geen tot beperkt rekening met menselijk gedrag. Ook bij het ontwerpen en verifiëren van RWA-installaties door middel van CFD wordt doorgaans geen rekening gehouden met vluchtende mensen en/of bijvoorbeeld het openen en sluiten van deuren. De gebruiker is verantwoordelijk om dit op een juiste manier in te voeren. Omdat menselijk gedrag onvoorspelbaar is en kan variëren, moet worden gekeken welke variaties er mogelijk zijn en of er een significante invloed wordt verwacht op het

²¹ 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.

²² <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2021-ashrae-handbook-fundamentals>.

resultaat. Indien dat het geval is, dient te worden onderbouwd welke variaties maatgevend kunnen zijn.

Er kan in een CFD-brandsimulatie (beperkt) rekening worden gehouden met menselijk gedrag. Bij tijdsafhankelijke simulaties kunnen afhankelijk van het softwarepakket deuren worden geopend en gesloten. Zo kan een realistisch beeld van de condities op vluchtroutes en het effect van menselijk gedrag op de rookverspreiding worden verkregen. De momenten van het open en sluiten van deuren of ramen kan, gezien het instantane karakter ervan, tot instabiliteit in het model zorgen.²³ Daarom is het raadzaam om de convergentie en CFL-conditie rondom deze tijdstippen nadrukkelijk te controleren (zie paragraaf 2.6.3 voor nadere uitleg).

Indien het CFD-model wordt gehanteerd voor het bepalen van de ASET en een losstaand evacuatiemodel wordt gehanteerd voor het bepalen van de RSET is het van belang om, los van een vergelijking van de tijden, na te gaan of de vluchtcondities in alle gehanteerde uitgangen en vluchtroutes ook daadwerkelijk blijven voldoen. Hoewel dit triviaal lijkt, kan het voorkomen dat deze controle niet is uitgevoerd als de evacuatie en CFD-modellen niet direct zijn gekoppeld.²⁴ In bijlage 5 is een globaal overzicht gegeven van de realistische vluchtsnelheden. Een verdere beoordeling van de vluchttijd valt echter buiten de doelstelling van dit rapport.

2.6 CFD-modellering

Naast de fysische modellering en bijbehorende aannamen is een CFD-brandsimulatie een numerieke oplossing van de vooraf opgestelde som. Er worden submodellen gebruikt voor het modelleren van bijvoorbeeld (sub-grid)turbulentie, de brand en straling, et cetera. Er worden tevens solvers toegepast die per type of pakket andere oplossingsstrategieën gebruiken. Het doorgronden ervan wordt al snel erg theoretisch en veelal complex. In dit hoofdstuk wordt getracht te beschrijven wat de CFD op welke manier doet en hoe op praktische wijze beoordeeld kan worden of de simulatie op basis van de goede uitgangspunten is uitgevoerd. Bij twijfel wordt geadviseerd om ondersteuning te zoeken bij een collega, bij een lid van de COP-FSE, of een second opinion bij derden te overwegen.

2.6.1 CFD-softwarepakket

Er bestaan verschillende CFD-softwarepakketten. Elk softwarepakket kent zijn rekenmethodieken en toepassingsgebied. Welk pakket en welke versie zijn gebruikt, moet vastgelegd en onderbouwd worden. Ten aanzien van de versie is het zinvol om na te gaan of er geen verouderde versie is gebruikt.

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' (klopt het model

²³ Het verkleinen van de tijdstappen kan dit voorkomen.

²⁴ FDS zet in op koppeling met Pathfinder. Smartfire kan gekoppeld worden aan Exodus.

- rekenkundig) en is 'gevalideerd'²⁵ (komen de resultaten overeen met een werkelijke situatie) voor de toepassing waar de software voor gebruikt wordt.
- > De ontwikkelaar moet kunnen aantonen dat de gehanteerde software geschikt is voor hetgeen hij of zij wil berekenen. De opsteller moet kunnen onderbouwen waarom het pakket dat hij gebruikt heeft geschikt is voor het probleem dat wordt opgelost.
 - > 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 brand-scenario in. Het brandverloop ligt daarmee vast en verandert niet door de omstandigheden tijdens de brand in de CFD-brandsimulatie.
 - (Sterk) ondergeventileerde branden: de exacte grens is niet aan te geven, maar wanneer bekend is dat het gaat om een sterk ondergeventileerde situatie, moet er nauwkeurig gekeken worden hoe de gebruikte software en het (eventueel gehanteerde) verbrandingsmodel hiermee omgaan. Het modelleren van een brand met uitslaande vlammen is doorgaans goed mogelijk. Lastig is het modelleren van een smorende brand en de beïnvloeding van pyrolyse door zuurstof en water.
 - > 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.²⁶

Een (niet volledige) lijst met softwarepakketten geschikt voor CFD-brandsimulaties staat weergegeven in bijlage 1.

2.6.2 Turbulentie

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

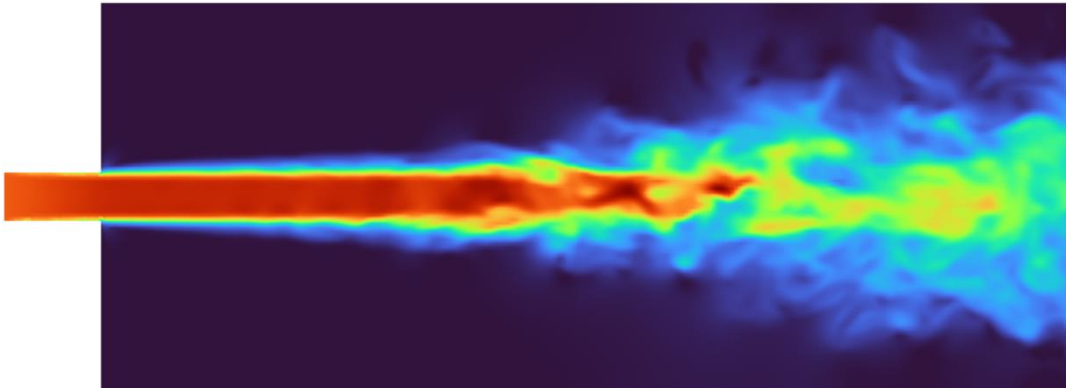
1. Een directe numerieke simulatie (DNS): hierbij worden zowel de grote als kleine turbulente wervels ('eddy's') rekenkundig bepaald. Dit vraagt zeer kleine rekencellen en daardoor veel rekencapaciteit. DNS wordt daarom niet gebruikt voor praktische problemen, maar meer voor academische onderzoeken en productontwikkeling.
2. LES-model (Large eddy simulation): dit wordt bijvoorbeeld gebruikt in FDS. Hierbij worden de grote turbulente wervels rekenkundig opgelost en kleinere wervels (sub-grid) worden met een turbulentiemodel gemodelleerd. De toegepaste afmeting van de rekencellen bepaalt tot welke maat wervels gesimuleerd worden. Een typisch kenmerk van LES is dat er tijdsafhankelijk stromingsvelden worden verkregen.
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 met name dat er geen exacte tijdsafhankelijke oplossing, maar een tijdgemiddelde oplossing wordt verkregen: de invloed van turbulentie op de stroming wordt tijdgewogen opgelost. Grote tijdstappen zijn

²⁵ Voor FDS staat in de *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference guide, Verification and Validation guide* (Mc Grattam, K. et al., 2024) bijvoorbeeld informatie gegeven over de te verwachte (standaard)afwijkingen.

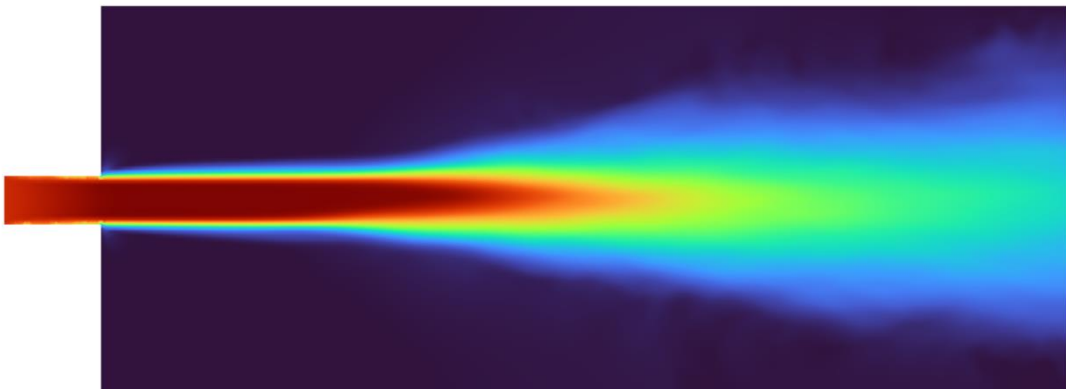
²⁶ Opgemerkt wordt dat in de brandveiligheid regelmatig wordt gesproken over een 'gevoeligheidsanalyse' (sensitivity analysis) wanneer feitelijk een 'onzekerheidsanalyse' (uncertainty analysis) wordt bedoeld. Hoewel de analyses complementair zijn, maakt een onzekerheidsanalyse de spreiding in resultaten gegeven de onzekerheden in de invoerparameters inzichtelijk. Een gevoeligheidsanalyse geeft vervolgens antwoord op de vraag welke invoerparameter de grootste invloed heeft op (de onzekerheden in) het resultaat. Indien slechts één parameter wordt veranderd, is het maken van dit onderscheid minder van belang (zo spreekt met ook in andere domeinen van een gridgevoeligheidsanalyse, aangezien dan in de regel enkel de grid wordt gewijzigd).

daardoor mogelijk. Voor thermiekgedreven stromingsproblemen (brand) zijn k-epsilon- en (SST) k-omega-(sub)modellen vrij gangbaar in gebruik.

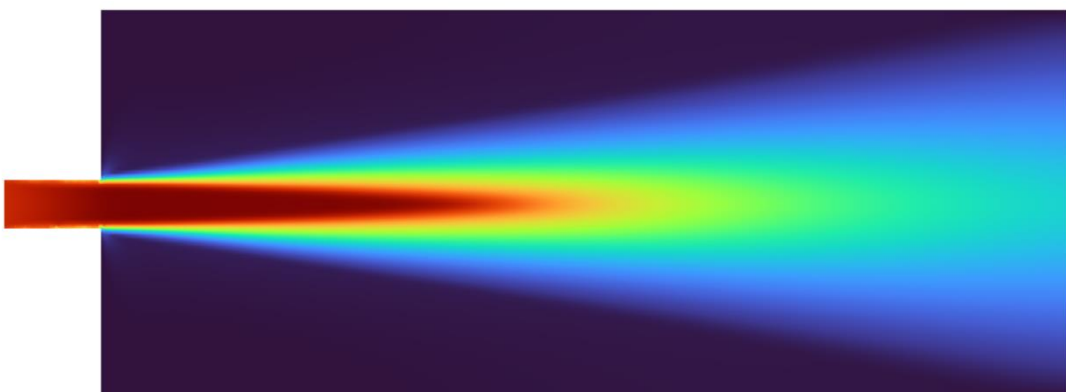
Het verschil tussen LES en RANS wordt geïllustreerd in onderstaande figuren 2.12, 2.13 en 2.14.



Figuur 2.12 LES-simulatie, momentopname



Figuur 2.13 LES-simulatie, tijdsgemiddeld



Figuur 2.13 Rans-simulatie

Verskil tussen een LES- en RANS-turbulentiemodel

Het LES-model gaat anders met turbulentie om en berekent expliciet de kleinere wervels, terwijl een RANS-model een submodel gebruikt. Als echter een tijdsgemiddelde genomen wordt van een LES-simulatie, lijkt dit vaak weer zeer sterk op een RANS-simulatie. Bij eenvoudige stromingspatronen

zijn beide turbulentiemethoden goed bruikbaar. Bij complexe (sterk veranderende) stromingspatronen is dit niet per definitie het geval.

Zowel LES- als RANS-simulaties zijn geschikt voor het uitvoeren van (brand)simulaties. In beide type simulaties kunnen ook verschillende soorten verbrandingsmodellen worden toegepast. Zeker waar lokale omstandigheden relevant zijn voor het resultaat (bijvoorbeeld verbranding) heeft LES de voorkeur. In andere situaties is RANS prima geschikt.

2.6.3 Solver (tijdstappen, cellen, tijdsduur)

Bij elke CFD-brandsimulatie is het van belang dat het gekozen rekenrooster voldoende fijn is. Het is gebruikelijk dat de CFD-gebruiker controleert of de rekencellen klein genoeg zijn voor die specifieke toepassing (of dat er eerder een controle uitgevoerd is bij een gelijksoortige toepassing). Wanneer kleinere rekencellen geen significante veranderingen geven, volstaat de afmeting van de rekencellen (de gridresolutie). Vooraf kan met de CFD-gebruiker afgesproken worden welke maximale verschillen in temperatuur, lichtsnelheid, et cetera nog acceptabel zijn.

LES-turbulentiemodel: Bij een CFD-softwarepakket met een LES-turbulentiemodel is er een vuistregel dat de karakteristieke diameter van de brandhaard ten minste 10 cellen²⁷ dient te bevatten. Hierbij wordt door Overkolt, K. de karakteristieke diameter²⁸ van de brandhaard gegeven door D^* .

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

\dot{Q} is the total heat release rate of the fire

ρ_{∞} is the air density (kg/m^3)

c_p is the air specific heat ($\text{kJ}/\text{kg K}$)

g is the gravitational constant (m/s^2)

T_{∞} is the ambient temperature (K)

Figuur 2.13 Karakteristieke branddiameter, bron: Fdstutorial.com

RANS-turbulentiemodel: Voor een CFD-softwarepakket met een RANS-turbulentiemodel bestaat een dergelijke vuistregel niet. Voor onder andere een tijdsgemiddeld k- ϵ -model (turbulentiemodel, zie het onderdeel turbulentie) is de nauwkeurigheid van de resultaten niet sterk afhankelijk van het brandvermogen, waardoor de hierboven beschreven vuistregel niet geldt. Om enige houvast te geven, wordt doorgaans in eerste instantie nabij de brand een grid van 10cm x 10cm x 10cm gehanteerd en een groeifactor van circa 1.1 (10 %). Met andere woorden: de afmeting van de naastliggende cel is maximaal 10 % groter. Middels een specifieke gridgevoeligheidsanalyse kan een absolute uitspraak worden gedaan over de juiste ruimtelijke discretisatie, hetgeen in de rekenpraktijk echter (nog) niet de standaard is. De groeifactor zou 1.3 niet moeten overschrijden (B. Blocken 2019, *CFD in building engineering, Fundamentals and application in urban physics and wind engineering*). Deze beperking geldt niet wanneer dit in de handleiding van de CFD-software specifiek anders is aangegeven of als het is gevalideerd (zoals bij FDS).

²⁷ 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 kleinere cellen noodzakelijk zijn.

²⁸ Dit is relevant voor het inschatten van de thermische stroming in en boven de brandhaard. Voor alle andere aspecten in het domein zal alsnog een gevoeligheidsstudie moeten plaatsvinden

Expliciete en impliciete rekenschema's: Ten aanzien van de solver kan onderscheid worden gemaakt tussen expliciete rekenschema's waarbij geen iteratie plaatsvindt, en impliciete rekenschema's waarbij wel iteratie plaatsvindt. FDS maakt gebruik van een expliciet rekenschema, terwijl Phoenix en Ansys meestal gebruikmaken van een impliciet rekenschema. Een expliciet schema hanteert de huidige status (t) om de status in de toekomst te bepalen ($t+dt$). Een impliciet schema maakt voor het berekenen van de status in de toekomst zowel gebruik van de huidige als de toekomstige status. Er is geen directe aanleiding waarom een van beide methoden een beter of slechter resultaat geeft. Het rekenschema heeft in de praktijk wel de volgende gevolgen:

- > **Expliciet:** Omdat de status van de volgende tijdstap op basis van de huidige status in combinatie met de gradiënten wordt bepaald, zullen over het algemeen kleine tijdstappen worden gezet waarvan de grootte door het rekenschema wordt bepaald. Zeker bij grote veranderingen en/of gradiënten en snelheden (zoals bij het simuleren van stuwdriventilatoren) zullen zodoende kleine tijdstappen worden gezet en zal de rekentijd significant toenemen. Een expliciet schema waarbij vaste (grote) tijdstappen worden gehanteerd zal naar verwachting onbetrouwbare resultaten geven en zou zodoende in de praktijk ook niet op die manier moeten worden toegepast.
- > **Impliciet:** Bij een impliciet schema worden de tijdstappen handmatig opgelegd, en kunnen groter zijn. Ze worden op basis van de CFL-conditie bepaald. Elke tijdstap wordt vervolgens iteratief opgelost (op basis van de balans voor de gehele grid).

Waar bij een expliciete code de CFL-conditie²⁹ dus maatgevend is, zijn de convergentie criteria dit bij impliciete codes.

Convergentiecriteria in FDS

Volledigheidshalve wordt opgemerkt dat FDS óók gebruikmaakt van 'convergentiecriteria' wanneer meerdere 'gridsoorten' worden toepast. Dit gebeurt om de rekenresultaten vanuit verschillende processoren of grids op elkaar te laten aansluiten. FDS maakt bij toepassing van meerdere grids namelijk geen gebruik van een globale balans maar van een balans per grid of processor. Dit betreft dus een ander gebruik van dezelfde definitie.

Nabij de wanden wordt in CFD gebruikgemaakt van semi-empirische relaties. De toepassing van deze relaties is beperkt tot een bepaald gebied vanaf de wand, hetgeen wordt uitgedrukt in de y^+ waarde.³⁰ Deze y^+ waarde is echter afhankelijk van het stromingsveld, en dient zodoende na afloop te worden gecontroleerd. Dit is met name nodig als de warmteoverdracht naar de wanden van belang is voor de conclusie. Elk CFD-pakket heeft een andere y^+ waarde vermeld in de handleiding. Zo is die van Ansys CFX tussen 30 en 1000, van Fluent tussen 30 tot 60, en van FDS eveneens tussen 30 en 1000, waarbij in de handleiding is gesteld dat waarden boven 1000 in de eerste gridcel onbetrouwbare resultaten opleveren. Voor de praktijk adviseert NIST y^+ waarden rond de 100 als een goede doelstelling.

Zoals reeds gesteld, is bij impliciete rekenschema's de convergentie van belang. Dit betreft een controle van de verandering van de uitkomst bij een toenemend aantal iteraties. Een vaste waarde hiervoor is lastig te geven, en afhankelijk van het rekenpakket, de situatie en het doel van de simulatie. Doorgaans wordt een convergentie van $<10^{-4}$ als voldoende verondersteld. Bij hogere waarden wordt aangeraden om naar een onderbouwing te vragen. Bij

²⁹ Zie toelichting op pagina 34.

³⁰ In FDS een cel.

convergentiewaarden van $<10^{-5}$ is er geen directe aanleiding om hier verder op door te vragen.

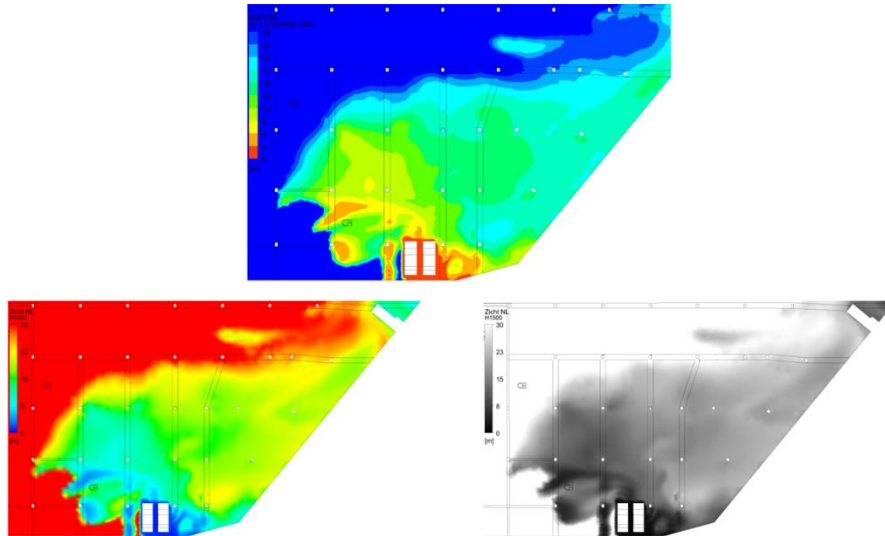
Zoals gesteld is bij expliciete rekenschema's is de CFL-conditie van belang (eigenlijk beter: de CFL-grens). In een notendop betekent deze conditie dat de stroming zich in één tijdstap over niet meer dan één cel mag verplaatsen. Wanneer dat wel het geval is, zou namelijk het expliciete rekenschema niet toepasbaar (en de berekening dus onbetrouwbaar) zijn. Voor de bepaling van de CFL-grens bestaan strikte en minder strikte methodes. Doorgaans gebruiken de expliciete rekenschema's een strikte methode als default. Een verandering daarin geeft reden om daarop door te vragen bij degene die de simulatie heeft uitgevoerd. Het is bij expliciete schema's nadrukkelijk van belang dat er geen vaste tijdstappen worden opgelegd. In dat geval wordt namelijk vrijwel zeker niet aan de CFL-conditie voldaan. In een expliciet rekenschema (zoals FDS) zullen grote snelheden in het veld (vanwege de CFL conditie) altijd leiden tot kleinere tijdstappen en dus tot een toename van de rekentijd. Een simulatie met stuwdrukventilatoren zal zodoende (in een expliciet rekenschema) ook (vrijwel) altijd langer duren dan dezelfde situatie zonder stuwdrukventilatoren.

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

2.7 Uitvoer en 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 acceptatiecriteria. Hierbij gelden de volgende aandachtspunten en tips:

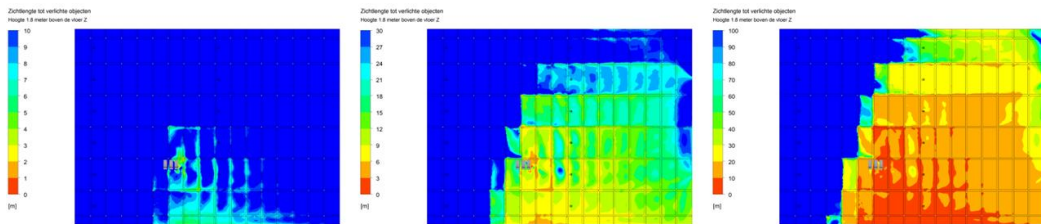
- > Hoe zijn de vooraf bepaalde acceptatiecriteria gedefinieerd en hoe worden de meetresultaten geïnterpreteerd?
 - Waar worden de verschillende meetwaarden bepaald? In het midden van een ruimte, ter plaatse van de vluchtroute, aan het plafond of elders?
 - Is er sprake van een absolute minimum of maximum meetwaarde op één moment? Zeker in LES kan dat resulteren in uitschieters. Of is er sprake van een gemiddelde meetwaarde, al dan niet over verschillende meetpunten? Betreft het een meetwaarde over een bepaalde tijdsspanne of een meetwaarde van één moment?
 - Betreft het een gemiddelde van meerdere meetresultaten of meetpunten?
- > 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?
- > Bij een CFD-brandsimulatie dient de concentratie roetdeeltjes vertaald te worden in de zichtlengte binnen het verontreinigde gebied. De gebruikte rekenmethode voor de verhouding tussen zichtlengte en rookconcentratie dient duidelijk te worden gedefinieerd en gemotiveerd. In de reader *Rookdichtheid en zichtlengte* (van Herpen, R. 2007) is daar meer informatie over te vinden.
- > Ten slotte dient men er zich bewust van te zijn dat een CFD-resultaat op vele manieren gepresenteerd kan worden. Naast figuren is een getalsmatige uitvoer vaak nuttig, zoals gegevens van bepaalde meetpunten. In de onderstaande figuur wordt geïllustreerd hoe eenzelfde resultaat op een andere manier gepresenteerd tot een ander gevoel kan leiden en mogelijk zelfs tot een andere conclusie.



Figuur 2.14 De rookdichtheid en zichtlengte van hetzelfde resultaat

De rookdichtheid en zichtlengte van hetzelfde resultaat

In bovenstaande figuren wordt hetzelfde resultaat weergegeven. Eerst wordt de rookdichtheid gepresenteerd en vervolgens tweemaal de zichtlengte, waarvan een keer met blauw als grote zichtlengte en een keer met rood als grote zichtlengte. De eerste indruk is sterk verschillend.



Figuur 2.14 Drie keer de zichtlengte van hetzelfde resultaat

Drie keer de zichtlengte van hetzelfde resultaat

Wederom staan dezelfde resultaten weergegeven, maar hier wordt drie keer de zichtlengte gepresenteerd. Daarbij staat blauw voor veel zicht en rood voor weinig zicht (links 0-10m, middel 0-30m, rechts 0-100m). Bovendien is nu drie keer een andere maximale zichtlengte als donkerblauw ingevoerd. Het resultaat lijkt verschillend, maar is hetzelfde. Er dient over te worden nagedacht wat 10 m of 100 m zichtlengte werkelijk is en welke schaal het beste bij het doel past.

Literatuurlijst

- Alpert, R.L. (1972). [Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors](#). *Fire technology* 8, 181-195.
- Ashrae (2023). *Ashrae handbook HVAC fundamentals*, chapter 16 *Ventilation and infiltration: expanded discussion of residential ventilation and infiltration*.
- Blocken, B. (2019). *CFD in building engineering, Fundamentals and application in urban physics and wind engineering*. Eindhoven University of Technology
- Brandweer Nederland. (2023). [Risicogericht werken, het doelgericht beïnvloeden van risico's die er toe doen](#). Brandweer Nederland.
- Brandweeracademie. (2020). *Basisprincipes van brandbestrijding*. IFV.
- Brandweeracademie. (2020). *Rookverpreiding in woongebouwen*. IFV.
- Hamerlinck, A.F. (2016). *Veilige waarden voor de kritieke staaltemperatuur bij ontwerp en aanbesteding*. Bouwen met Staal.
- Heskestad, G. Bill, R.G. (1988). Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects. *Fire Safety Journal*, 14, 113–125.
- Gradén, M., Liljedahl, J. (2007). [Räddningsmanskapets säkerhet under insats - kriterier för analytisk dimensionering](#). Bachelorthesis, Universiteit van Lund.
- Klein, M., van de Leur, P. (2015). *Niet- besloten ruimten in relatie tot brandveiligheid*. DGMR.
- McGrattam, K., Hostikka, S., Floyd, J., Mc Dermott, F., Vanella, M. Mueller, E. (2024). *Fire Dynamics Simulator -Technical Reference Guide, Verification and Validation guide*. NIST.
- Mc Grattam, K., Hostikka, S., Floyd, J., Mc Dermott, F., Vanella, M. Mueller, E. (2024). *Fire Dynamics Simulator -User's Guide*. NIST.
- Meinster, J.A. (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.
- Karlsson, B., Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.
- Staffansson, L. (2010). *Selecting design fires*. Lund University
- van Herpen, R. (2007). *Rookdichtheid en zichtlengte*. Kennisbank Bouwfysica.
- van Herpen, R., de Witte, L. (2015) *Toolbox brandweerinzet, Consequenties per gebouwtype voor opkomsttijden en brandweerinzet*. Nieman.
- van Mierlo, R.J.M., Tromp, A.J. (2021). *Fire Safety Engineering, Handboek voor de bouw*.

Eburon.

van Rede, P., van Liempd, R., & de Witte, L. (2024). *Handreiking toepassen doelgerichte brandveiligheid bij gebouwen*. Manuscript in voorbereiding. NIPV.

Bijlage 1 Informatie CFD-softwarepakketten

Pakket	Toelichting
Autodesk CFD	Relatief nieuw
ANSYS CFD (CFX/FLUENT)	Alle typen grid, RANS, LES, DNS
CHAM/ Phoenix	Gestructureerd grid RANS
FDS (NIST)	Gestructureerd grid LES, DNS, expliciet
FireFoam/OpenFoam	Alle typen grid, OpenFoam voornamelijk stedenbouwkundig/wind RANS, LES, DNS
Jasmine	Wordt niet / nauwelijks gebruikt
Smartfire	Wordt niet / nauwelijks gebruikt
Sofie	Wordt niet / nauwelijks gebruikt

Bijlage 2 Indicatieve acceptatiecriteria

Het doel van een CFD-brandsimulatie 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 acceptatiecriteria voor deze zaken van groot belang.

In deze bijlage worden daarom enkele criteria benoemd die bij het beoordelen van een CFD-brandsimulatie 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-brandsimulatie. Het is in dat geval vaak beter om de acceptatiecriteria te bepalen op basis van literatuur dan op basis van normen.

Tabel B2. 1 Acceptatiecriteria 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 ²)
Niet besloten vluchtroute* ¹	-	45 °C (op 1,8 m)	1,0 kW/m ² (op 1,8 m)	100 m	(TNO, 1997)
Niet besloten vluchtroute Vluchten onder rooklaag* ⁶	2.5 m	-	2,0 kW/m ²	-	Bbl 2024 (Klein, M., et al, 2015)
Niet besloten vluchtroute Vluchten door rook* ⁷	-	45 °C (nergens in de rook(laag))	-	30m	Bbl 2024 (Klein, M., et al, 2015)

	Rookvrije hoogte	Temperatuur	Straling	Zichtlengte (niet lichtgevend)	Bron
Niet besloten brandweerinzet* ⁸	-	60 °C op ooghoogte	3,0 kW/m ²	100m op ooghoogte	Bbl 2024 (Klein, M., et al., 2015)
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?	(Meinster, J.A., 2016) (Herpen, R., et al., 2015) TNO-Dv3 3006 C024 PGS 29 (Gradén, M., et al. 2007)

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	Verschildt per brandstof en is afhankelijk van de gastemperatuur. Zie ook NEN 6055: 2011 bijlage B.5

Tabel B2. 4 Criteria constructie- of bouwdelen

Onderwerp	Temperatuur	Temperatuur	Bron
Ontbranding isolatie* ⁵	500-700 °C EPS, PUR en glaswol	1100 °C Steenwol	
Bezwijken onbeschermdde staalconstructiedelen* ^{4,5}	Kritieke temperatuur kolom 490 °C	Kritieke temperatuur kolom n.t.b.	Brandinformatiesysteem (Hamerlinck, A.F., 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. van betonkwaliteit)	NFPA 502

*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 van veel factoren afhankelijk (Brandweeracademie, 2020¹).

*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) op juiste wijze wordt berekend door het CFD-softwarepakket. Hier dient zorgvuldig mee te worden omgegaan.

*6: Voor de tijdsduur dat de niet-besloten ruimten voor vluchten wordt gebruikt. Als de hoogte van een ruimte boven de vloer lager is dan 2,5 m, geldt een rookvrije hoogte van ten minste 2 m.

*7: In het geval van vluchten door rook, bijvoorbeeld bij een rooklaag van minder dan 2,5 tot 2 m of in het geval van homogene opmenging (geen rookvrije laag maar verspreiding van rook door de hele ruimte).

*8: Tijdsduur: overeenkomend met de WBDBO vanuit de aangrenzende ruimte.

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 B3.1 Aandachtspunten bij het bepalen van de grid

Keuze	Aandachtspunten
Bouwkundige situatie	In hoeverre is het mogelijk om schuine en ronde vormen te modelleren? In veel CFD-programma's is dit moeilijk of onmogelijk. 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).
Gridgroottes	Een grid dient vaak (afhankelijk van het onderzoeksdoel) 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 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. Een robuustheidsonderzoek, waarbij cellen stapsgewijs worden verkleind totdat er geen significante verandering in de uitkomst meer plaatsvindt, is noodzakelijk.
Celkwaliteit	Een cel bestaat uit drie dimensies. De X-, Y- en Z-dimensies dienen ongeveer gelijk te zijn. De celvorm en afmetingen moeten van voldoende kwaliteit zijn en passen bij het doel.

Bijlage 4 Inlegvel CFD

Project	Projectgegevens
Projectnaam	
Opdrachtgever voor uitvoeren CFD-brandsimulatie	
Projectleider	
Datum	
Doelstelling:	
Model	Algemene gegevens van het model
Omvang gemodelleerd(e) gebouw/omgeving	
Opgenomen objecten in gebouw/omgeving	
Afmetingen model	
Onderzochte scenario's	
Stuwdrukventilatie opgenomen	Ja/Nee
Windinvloeden opgenomen	Ja/Nee
Sprinkler gemodelleerd	Ja/Nee
Maximale Y+ waarde gecontroleerd in resultaat	Ja/Nee, namelijk:
Massa en Energie balans gecontroleerd	Ja/Nee
HRR gecontroleerd aan invoer	Ja/Nee/n.v.t.
Rekenschema	Specifieke gegevens
Programma	Software: Versie: RANS / LES (sub-grid) Turbulentie model: Impliciet / Expliciet Convergentie: / CFL conditie: Log-wall / enhanced wall treatment: Maximale Y+ waarde rekenschema: Wel/Geen verbrandingsmodel opgenomen, namelijk: ... /n.v.t. Stralingsmodel:
Rekenrooster	Gestructureerd / Ongestructureerd Aantal cellen: Kleinste afmeting: Grootste afmeting: Maximale groeifactor:
Randvoorwaarden	Gehanteerde randvoorwaarden
Maximaal brandvermogen	
Gesimuleerde brandduur	
Representatieve brandstof	
Yields	
Wanden & eigenschappen	
Plafonds & eigenschappen	
Beoordeling	Grenswaarden
Voor niet besloten ruimte	
Voor vluchten	
Voor repressieve inzet	
Gepresenteerde resultaten	
Opmerkingen die van belang zijn voor conclusie	

Bijlage 5 Loopsnelheden

Voor het bepalen van de RSET dient een goede representatie te zijn gegeven van de te verwachten loopsnelheden van de aanwezige personen. In onderstaande tabel zijn enkele indicatieve waarden van vluchtsnelheden door rookvrije ruimten weergegeven (Fahe en Proulx 2001, Huijzer en van Egmond 2019).

Tabel B5.1 Weergave van vluchtsnelheden (met P25 en P75 wordt als mate van spreiding de interkwartielafstand aangegeven)

Horizontaal vluchten	snelheid [m/s]
Gemiddeld	gemiddeld ca. 1 met P25:0,71 en P75:1,28
Lopend met ondersteuning door anderen	gemiddeld ca. 0,7 met P25:0,58 en P75:1,40
Hulpmiddel krukken	gemiddeld ca. 0,9 met P25:0,67 en P75:1,35
Hulpmiddel wandelstok	gemiddeld ca. 0,8 met P25:0,49 en P75:1,60
Hulpmiddel rollator	gemiddeld ca. 0,6 met P25:0,34 en P75:1,02
Verticaal vluchten	snelheid [m/s]
Gemiddeld	gemiddeld ca. 0,6 met P25:0,42 en P75:0,74
Lopend met ondersteuning door anderen	gemiddeld ca. 0,5 met P25:0,42 en P75:0,70
Hulpmiddel wandelstok	gemiddeld ca. 0,2 met P25:0,38 en P75:0,70