

Fysisch brandmodel

Achtergronden:
Normalisatie fysische brandmodel
Submodellen

i.o.v.

NEN Bouw
Postbus 5059
2600 GB DELFT

Adviesburo Nieman B.V.

Dr. Eeftinck Schattenkerkstraat 19
Postbus 40147
8004 DC ZWOLLE

zwolle@nieman.nl
www.nieman.nl

Datum	juni 2007
Projectnr	u040430aa
Documentnr	Wu040430aaA2.rhe

Opdrachtgever

NEN Bouw
Postbus 5059
2600 GB DELFT
T (015) 269 03 90
F (015) 269 01 90
vertegenwoordigd door:
de heer ir. R.H.M. Nouwen

Omschrijving project

Achtergronden
Normalisatie fysische brandmodel
Submodellen

Projectnummers

Nieman u040430aa
NEN Bouw

Datum

Juni 2007

Versie

Definitief

Uitgevoerd door

Adviesburo Nieman B.V.
Vestiging Zwolle

Ir. N.J. Voogd
Ir. R.A.P. van Herpen

Het rapport omvat:

158 pagina's

Inhoudsopgave

	Pagina
Symbolenlijst	8
Begrippenlijst	14
Hoofdstuk 1 Inleiding	18
Hoofdstuk 2 Warmte- en massatransport ter plaatse van de ruimtebegrenzingsen	20
2.1 Convectief transport via openingen	24
2.2 Stralingstransport via openingen	27
2.3 Convectief warmtetransport naar de ruimtebegrenzingsen	29
2.4 Stralingstransport naar de ruimtebegrenzingsen	30
2.5 Warmtetransport in de ruimtebegrenzingsen	32
Hoofdstuk 3 Warmte- en massatransport binnen de ruimte	34
3.1 Bron: het verbrandingsmodel	34
3.2 Beïnvloeding van de bron door automatische blusinstallatie	38
3.3 Overdracht: het pluimmodel	41
Hoofdstuk 4 Lokale modellen	44
4.1 Lokale convectie en straling	44
4.2 Lokale opwarming van constructies	46
4.3 Thermische detectie	47
Hoofdstuk 5 Uitslaande vlammen vanuit gevelopeningen	49
Literatuurlijst	51
Bijlage A Convectief warmtetransport via openingen	
Bijlage B Convectie en straling naar de ruimtebegrenzingsen	
Bijlage C Opwarming en afkoeling van de ruimtebegrenzingsen	
Bijlage D Chemisch verbrandingsmodel	
Bijlage E Invloed van een automatische blusinstallatie	
Bijlage F Pluimmodel	
Bijlage G Lokale convectie en straling	
Bijlage H Thermische detectie	
Bijlage I Uitslaande vlammen vanuit gevelopeningen	
Bijlage J Configuratiefactor	
Bijlage K Voorstel aanpassing extern vlammodel (Nu040430aaA1.lwi)	

Symbolenlijst

Latijnse hoofdletters

A	oppervlakte [m^2]
A_{eff}	effectieve oppervlakte [m^2]
A_f	vloeroppervlakte van een brandcompartiment [m^2]
A_v	totale oppervlakte van verticale openingen in alle wanden ($A_v = \sum A_{v,i}$) [m^2]
$A_{v,i}$	oppervlakte van raam "i" [m^2]
Bi	Biot-modulus [-]
C	beschermingscoëfficiënt [-]
C_d	stromingscoëfficiënt [-] (standaardwaarde = 0,60)
D	diepte van het brandcompartiment [m], diameter [m] (bij niet-cirkelvormige brand of opening: equivalente diameter [m])
E	evenredigheidsconstante [-] (standaardwaarde = 0,196)
G	evenredigheidsconstante [-] (standaardwaarde = 2,9)
H	verticale afstand tussen brandstof en plafond [m]
$H_{f,eff}$	verbrandingsefficiëntie [-]
L	karakteristieke dimensie voor warmteoverdracht, gegeven door de verhouding van het volume tot de oppervlakte van een object [m]
L_c	lengte van de kern [m]
L_f	vlamlengte langs de as [m]
L_H	horizontale projectie van de vlam (vanaf de gevel) [m]
L_L	vlamhoogte (vanaf het bovenzijde van het raam) [m]
L_x	aslengte vanaf het raam naar het punt waar de berekening wordt gemaakt [m]
O	openingsfactor van het brandcompartiment [-]
\dot{Q}	brandvermogen [kW] (in bijlage I [MW])
\dot{Q}_c	convectief afgegeven deel van het brandvermogen [kW]
\dot{Q}_r	door straling afgegeven deel van het brandvermogen [kW]
$\dot{Q}_{c,min}$	minimaal convectief gedeelte van het brandvermogen voor opstijgen van de rook tot hoogte H in ruimte met stratificatie [kW]
$d\dot{Q}/dt$	verandering van het brandvermogen in de tijd [kW/s]
T	temperatuur [K]
T_0	initiële temperatuur [K] (standaardwaarde = 293 K)
$T_{c,max}$	maximale temperatuur in de ceiling jet (op afstand r) [K]
T_d	detectortemperatuur [K]
$T_{d,i}$	detectortemperatuur aan het eind van interval i [K]
T_f	temperatuur van het brandcompartiment [K]
T_g	temperatuur van de rook ter plaatse van de detector [K]

T_r	reactietemperatuur [K]
T_w	vlamtemperatuur bij het raam [K]
T_z	vlamtemperatuur langs de vlamas [K]
$T_{\infty 1}$	omgevingstemperatuur ter hoogte van het brandoppervlak [K]
ΔT_0	temperatuurverschil tussen de centrale as van de rookpluim en de omgeving [K]
ΔT_c	temperatuurverschil tussen de centrale as van de rookpluim en de omgeving ter hoogte van het plafond [K]
$\Delta T_{\infty H}$	temperatuurstijging in de ruimte door stratificatie vanaf de hoogte van het brandoppervlak tot de hoogte H [K]
$\Delta T_{\infty z}$	temperatuurstijging in de ruimte door stratificatie vanaf de hoogte van het brandoppervlak tot de hoogte z_m [K]
dT_{∞}/dz	temperatuurgradiënt in de ruimte door stratificatie [K/m]
V	snelheid (door openingen in scheidingsconstructies) [m/s]
\dot{V}	volumedebiet [m ³ /s]
W	breedte van de wand waarin ramen zijn opgenomen (W_1 en W_2) [m]
W_1	breedte van wand 1, aangenomen dat deze de grootste raamoppervlakte bevat [m]
W_2	breedte van de wand van het brandcompartiment, loodrecht op wand W_1 [m]
W_a	horizontale projectie van een zonnescherm of een balkon [m]
W_c	breedte van de kern [m]
W_f	omtrek van de brand [m]

Latijnse kleine letters

b	straal van de rookpluim [m]
b_u	straal van de rookpluim tot het punt waar de snelheid is gedaald tot $0,5 \cdot u_0$ [m] (bijlage H: straal van de rookpluim ter hoogte van het plafond [m])
$b_{\Delta T}$	straal van de rookpluim tot het punt waar het temperatuurverschil met de omgeving is gedaald tot $0,5 \cdot \Delta T_0$ [m]
c_p	soortelijke warmte van lucht [kJ/kgK]
d_f	vlamdikte [m]
g	gravitatieconstante [m/s ²] (standaardwaarde = 9,81 m/s ²)
h	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt [kW/m ² K]
h_{eq}	gewogen gemiddelde van raamhoogten in alle wanden ($h_{eq} = (\sum A_{v,i} h_i) / A_v$) [m]
h_{i1}	} zie figuur A.3 en vergelijkingen (A.11) en (A.12)
h_{i2}	
h_{i3}	
h_{i4}	

h_{j1}	} zie figuur A.14 en vergelijkingen (A.100), (A.101), (A.102) en (A.102a)
h_{j2}	
h_{j3}	
h_{j4}	
h_{j5}	
h_{j6}	
h_c	hoogte van het dak boven de vloer [m]
h_l	hoogte van het interface boven de vloer [m]
h_n	hoogte van het neutrale vlak boven de vloer [m]
h_s	hulpfactor [m]
$i_{T_d \geq T_r}$	aantal intervallen tot de temperatuur van de detector (minimaal) gelijk is aan de reactietemperatuur [-]
k	thermische geleiding binnen een object [kW/mK]
m	massa [kg]
\dot{m}	massastroom [kg/s]
\dot{m}_{ent}	massastroom aan ingezogen omgevingslucht door de doorsnede van de pluim (op hoogte z) [kg/s]
\dot{m}_{fi}	massastroom door pyrolyse [kg/s]
\dot{m}_p	massastroom in de rookpluim ter hoogte van het interface [kg/s]
p_a	luchtdruk ter hoogte van de vloer buiten de brandruimte [Pa]
p_e	luchtdruk ten gevolge van uitzetting [Pa]
p_f	luchtdruk ter hoogte van de vloer in de brandruimte [Pa]
$\Delta p_{FLOOD,i}$	minimaal drukverschil over dakopening i voor stroming in één richting [Pa]
Δp	drukverschil tussen de brandruimte en de omgeving (van <i>binnen</i> naar <i>buiten</i>) [Pa]
Δp_{nc}	drukverschil ten gevolge van natuurlijke convectie [Pa]
$q_{f,d}$	ontwerp vuurbelasting gerelateerd aan vloeroppervlakte A_f [MJ/m ²]
\dot{q}_{tot}	totale warmtestroom naar een detector [kW]
\dot{q}_{cond}	warmtestroom door geleiding [kW]
\dot{q}_{conv}	warmtestroom door convectie [kW]
\dot{q}_{rad}	warmtestroom door straling [kW]
r	horizontale afstand tot de centrale as van de rookpluim [m]
t	tijd [s]
t_{det}	detectietijd van de detector op positie r [s]
$t_{T_d=T_r}$	tijdstip waarop de temperatuur van de detector gelijk is de reactietemperatuur [s]
t_f	transporttijd van de rook van de brandstof tot positie r in de ceiling jet [s]
t_{int}	tijdsduur van één interval [s]
u	snelheid (in de brandruimte) [m/s]; windsnelheid [m/s]; vochtgehalte [-]

u_0	gemiddelde axiale snelheid op de centrale as van de rookpluim [m/s]
$u_{c,max}$	maximale snelheid in de ceiling jet (op afstand r) [m/s]
w_f	vlambreedte [m]; de ventilatiefactor [-]
w_i	breedte van opening i [m]
w_t	som van de raambreedtes in alle wanden ($w_t = \sum w_i$); de ventilatiefactor die betrekking heeft op A_t [m]
z	hoogte boven de brandstof [m] (bijlage A: hoogte boven vloerniveau)
z_0	virtuele oorsprong [m]
z_m	maximale stijghoogte van de rookpluim [m]

Griekse hoofdletters

Φ	configuratiefactor [-]
Φ_f	totale configuratiefactor van een constructiedeel voor warmtestraling vanuit een opening [-]
$\Phi_{f,i}$	configuratiefactor van vlak i voor een gegeven opening [-]
Φ_z	totale configuratiefactor van een constructiedeel voor warmtestraling vanuit een vlam [-]
$\Phi_{z,i}$	configuratiefactor van vlak i voor een gegeven vlam [-]
Ω	$(A_f \cdot q_{f,d}) / (A_v \cdot A_t)^{1/2}$ [MJ/m ⁴]

Griekse kleine letters

α	inmengingscoëfficiënt [-] (bijlage F); tijdconstante voor brandontwikkeling [kW/s ²] (bijlage H)
α_c	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor warmtestraling [-]
ε_f	emissiviteit van vlammen of van de brand [-]
ρ	dichtheid van de lucht [kg/m ³] (in bijlage F: dichtheid in de rookpluim (op hoogte z))
ρ_{fl}	gemiddelde dichtheid in de vlammen [kg/m ³]
ρ_g	interne gasdichtheid [kg/m ³]
$\rho_{\infty 1}$	dichtheid van de omgevingslucht ter hoogte van het brandoppervlak [kg/m ³]
τ	tijdconstante van een detector [s]
T_f	vrije brandduur (wordt verondersteld 1200 s te zijn) [s]

Subscripts

<i>1</i>	in de brandruimte
<i>2</i>	buiten de brandruimte
<i>H</i>	(door) horizontale opening
<i>V</i>	(door) verticale opening
<i>F</i>	(door) mechanische ventilatievoorziening
<i>L</i>	in de koude zone
<i>U</i>	in de hete zone
<i>g</i>	in de gemengde zone
<i>rad</i>	door straling
<i>c</i>	door convectie
<i>ce</i>	door dakopening, dak, ter hoogte van het dak (ceiling)
<i>f</i>	door vloeropening, vloer, ter hoogte van de vloer (floor)
<i>w</i>	door wandopening, wand, ter plaatse van de wand (wall)
<i>p</i>	de scheidingsconstructie
<i>fi</i>	(t.p.v.) de brand
<i>in</i>	de brandruimte in
<i>ox</i>	zuurstof
<i>tot</i>	totaal
<i>uit</i>	de brandruimte uit
∞	in de omgeving

Begrippenlijst

Equivalentente tijd van brandblootstelling

De tijd van blootstelling aan de standaard brandkromme (temperatuur-tijd curve) met hetzelfde thermische effect als een echte brand in het compartiment.

Brandcompartiment

Gedeelte van één of meer gebouwen, bestemd als maximaal uitbreidingsgebied van de brand.

Volledig ontwikkelde brand

Alle brandbare oppervlakken (van de vuurlast of brandstof) binnen een specifieke ruimte nemen deel aan de brand.

Brandwerendheid

Het vermogen van een constructie of een constructieonderdeel om bij blootstelling aan brand gedurende een gegeven tijd de dragende en/of scheidende functie te kunnen vervullen, rekening houdend met de daarbij behorende belastingcombinaties en grenswaarden.

Integriteit (E)

Het vermogen van een scheidingsconstructie bij belasting door brand aan één zijde, de doorgang van hete gassen en vlammen te belemmeren en te voorkomen dat vlammen aan de niet-verhitte zijde ontstaan.

Isolatie (I)

Het vermogen van een scheidingsconstructie bij belasting door brand aan één zijde om de temperatuurstijging van de niet-verhitte zijde beneden de gespecificeerde grenswaarden te houden.

Draagkracht, in stand houding (R)

Het vermogen van een constructie of onderdeel daarvan om tijdens een relevante brand in zijn functie te kunnen voorzien, volgens vastgestelde criteria.

Nominaal temperatuurverloop

De uiteindelijke ontwerplimiet voor omgevingstemperaturen volgens deel 1-2 van NEN-EN 1991.

Scheidingsfunctie

Het vermogen van een scheidingselement om brandverspreiding (bijvoorbeeld ten gevolge van doorgang van vlammen of hete gassen – vergelijk integriteit) of ontsteking achter het scheidingselement (vergelijk isolatie) tijdens de relevante brand te voorkomen.

Scheidingselement

Een dragend of niet-dragend element (bijvoorbeeld een wand) die onderdeel vormt van de scheidingsconstructie van een brandcompartiment.

Standaard brandwerendheid

De tijdsduur in minuten dat een constructie(-onderdeel) bij blootstelling aan opwarming volgens de standaard brandkromme zijn (dragende en/of scheidende) functie kan blijven vervullen bij de belastingen die in geval van brand in rekening moeten worden gebracht.

Temperatuuranalyse

Procedure om temperatuurontwikkeling in constructiedelen op basis van thermische actoren (thermische belasting) en de thermische materiaaleigenschappen van de constructiedelen en de beschermende oppervlakten vast te stellen, waar relevant.

Thermische actoren

Thermische belasting (van een constructie), resulterend in een netto warmtestroom naar de verschillende onderdelen.

Eenvoudig brandmodel

De brand is gebaseerd op een beperkt toepassingsgebied van specifieke fysische parameters.

Geavanceerd brandmodel

Ontwerpbrand, gebaseerd op behoud van massa en energie.

Computational fluid dynamic model

Brandmodel (veldmodel), dat numeriek de partiële differentiaalvergelijkingen oplost en de thermodynamische en de aërodynamische variabelen geeft, op elke plaats in het compartiment.

1-zone model

Brandmodel, waarin homogene gastemperaturen in het compartiment worden verondersteld.

2-zone model

Brandmodel, waarin verschillende zones in een compartiment worden gedefinieerd: een bovenlaag, een onderlaag, de brand en de pluim, het externe gas en de wanden. In de bovenlaag wordt een uniforme gastemperatuur verondersteld.

Verbrandingsfactor

De verbrandingsfactor vertegenwoordigt de efficiency van verbranding, variërend van 1 voor volledige verbranding tot 0 wanneer in het geheel geen verbranding meer optreedt.

Ontwerpbrand

Voor ontwerpdoeleinden veronderstelde gespecificeerde brandontwikkeling.

Ontwerp vuurbelasting

Vuurbelasting bedoeld voor de bepaling van de thermische actoren in het brand ontwerp; er wordt uitgegaan van een karakteristieke waarde die bepaald is op basis van statistische en/of probabilistisch overwegingen of van een deterministische waarde.

Ontwerp brandscenario

Specifiek brandscenario waarop een analyse wordt gebaseerd.

Externe brandcurve

Nominale temperatuurtijd-curve bedoeld voor de buitenzijde van uitwendige scheidingsconstructies die aan brand wordt blootgesteld, bijvoorbeeld vanuit een naburig brandcompartiment.

Brandactiveringsrisico

De parameter die rekening houdt met de waarschijnlijkheid van ontsteking, de functie en de bezetting van het compartiment.

Vuurbelasting

De vuurlast per oppervlakte-eenheid, gerelateerd aan de vloeroppervlakte q_f , of gerelateerd aan de oppervlakte van de totale omhulling, met inbegrip van openingen, q_t .

Vuurlast

De som van de thermische energieën die door verbranding van alle brandbare materialen in een ruimte vrijkomen (gebouwinhoud en constructie-ementen).

Brandscenario

Kwalitatieve beschrijving van het brandverloop waarin de tijdstippen van kenmerkende gebeurtenissen, die de brand onderscheidt van andere branden worden vastgelegd. Het definieert de ontsteking en de brandgroei, het volledig ontwikkelde stadium (indien deze optreedt) en doofstadium, samen met de gebouwomgeving en systemen of installaties die het brandverloop beïnvloeden.

Flash-over

Gelijktijdige ontsteking van de totale vuurlast in een compartiment.

Koolwaterstof brandkromme

Nominale temperatuur-tijd kromme voor een koolwaterstofbrand.

Lokale brand

Brand die slechts een beperkt gebied van de vuurlast beslaat in het compartiment.

Openingsfactor

Factor die de hoeveelheid ventilatie vertegenwoordigt, afhankelijk van de oppervlakte van openingen in de compartimentenwanden, van de hoogte van deze openingen en van de totale omhullende oppervlakte van het compartiment (wanden, vloer en plafond).

Luchtfactor

Factor die de mate van luchttoevoer tot de brandhaard weergeeft in verhouding tot de benodigde luchttoevoer voor een volledige verbranding. De luchtfactor is groter dan 1 voor een overmaatse luchttoevoer bij een brandstofbeheerste brand en kleiner dan 1 voor een ondermaatse luchttoevoer bij een ventilatiebeheerste brand.

Brandvermogen

Vermogen dat vrijkomt bij verbranding als functie van tijd.

Standaard temperatuur-tijd kromme

Nominale temperatuur-tijd kromme, gedefinieerd in prEN 13501-2 voor een volledig ontwikkelde brand in een compartiment.

Temperatuur-tijd krommen

De gastemperatuur nabij een constructieoppervlak als functie van tijd. De temperatuur-tijd krommen kunnen zijn:

- *nominaal*: conventionele krommen, gehanteerd voor classificatie of controle van de brandwerendheid, bijvoorbeeld de standaard temperatuur-tijd kromme, de externe brandkromme, of de koolwaterstof brandkromme.

- *parametrisch*: bepaald op basis van brandmodellen en specifieke fysische parameters die de condities in het brandcompartiment bepalen.

Configuratiefactor

Configuratiefactor voor de warmteoverdracht door straling van oppervlakte A naar oppervlakte B, gedefinieerd als fractie van diffuus uitgestraalde energie vanuit oppervlakte A dat op oppervlakte B valt.

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt

De convectieve warmtestroomdichtheid naar een element, gerelateerd aan het verschil tussen de gastemperatuur grenzend aan de relevante oppervlakte en de temperatuur van die oppervlakte.

Emissiviteit

Gelijk aan absorptiecoëfficiënt van een oppervlakte, de verhouding tussen de stralingswarmte die door een bepaalde oppervlakte wordt geabsorbeerd en dat van een zwarte lichaamsoppervlakte.

Netto warmtestroomdichtheid

Energie, per eenheid van tijd en oppervlakte, die uiteindelijk wordt opgenomen door de constructie-elementen.

Hoofdstuk 1 Inleiding

Dit rapport bevat de beschrijving van de submodellen behorende bij het basismodel van het fysisch brandmodel zoals beschreven in rapport Wu040430aaA1.rhe.

De volgende submodellen worden behandeld:

- warmte- en massatransport ter plaatse van de ruimtebegrenzings:
 - convectief transport via openingen
 - stralingstransport via openingen
 - convectief transport naar de ruimtebegrenzings
 - stralingstransport naar de ruimtebegrenzings
 - warmtetransport in de ruimtebegrenzings

- warmte- en massatransport binnen de ruimte
 - bron: het verbrandingsmodel
 - beïnvloeding van de bron door automatische blusinstallatie
 - overdracht: het pluimmodel

- lokale modellen
 - lokale convectie en straling
 - lokale opwarming van constructies
 - thermische detectie

- uitlaande vlammen vanuit gevelopeningen

Hoofdstuk 2 Warmte- en massatransport ter plaatse van de ruimtebegrenzingsen

In het basismodel van het fysisch brandmodel is in de beschrijving van de energiebalansen voor de verschillende zones rekening gehouden met warmtetransport ter plaatse van de ruimtebegrenzingsen en de openingen hierin. Ter plaatse van de openingen in de begrenzingsen zal het warmtetransport in belangrijke mate door convectie, als gevolg van het massatransport via deze openingen plaatsvinden.

Een adiabatiese situatie, waarin geen warmte-uitwisseling tussen de zones en de omgeving wordt verondersteld, is niet erg realistisch. Vandaar dat in dit hoofdstuk nader invulling wordt gegeven aan de optredende warmtetransportmechanismen tussen de zones en de aangrenzende omgeving.

De volgende figuren geven verticale doorneden weer van de brandruimte, waarin per zone de optredende warmtetransportmechanismen zijn weergegeven. De transportmechanismen worden vervolgens in de navolgende paragrafen beschreven.

In de figuren is de volgende notatie gebruikt:

\dot{Q}	totale brandvermogen
\dot{Q}_c	convectief afgegeven vermogen vanaf de brandhaard
\dot{Q}_{rad}	door straling afgegeven vermogen vanaf de brandhaard
\dot{Q}_e	vermogen van de ingemengde lucht (via de pluim)
\dot{Q}_U	vermogen van/naar de hete zone (upper zone)
\dot{Q}_L	vermogen van/naar de koude zone (lower zone)
\dot{Q}_g	vermogen van/naar de gemengde zone

Voor openingen worden de volgende aanvullende indices gebruikt:

$V_{,in}$	als gevolg van inkomende massastroom via verticale opening
$V_{,out}$	als gevolg van uitgaande massastroom via verticale opening
$H_{,in}$	als gevolg van inkomende massastroom via horizontale opening
$H_{,out}$	als gevolg van uitgaande massastroom via horizontale opening
$V_{,rad}$	als gevolg van straling vanuit verticale gevelopening

Voor scheidingsconstructies worden de volgende aanvullende indices gebruikt:

$p(c,w)$	als gevolg van convectie bij scheidingsconstructie (p) wand (w)
$p(c,fl)$	als gevolg van convectie bij scheidingsconstructie (p) vloer (fl)
$p(c,ce)$	als gevolg van convectie bij scheidingsconstructie (p) dak/plafond (ce)
$p(rad,fl)$	als gevolg van straling bij scheidingsconstructie (p) vloer (fl)

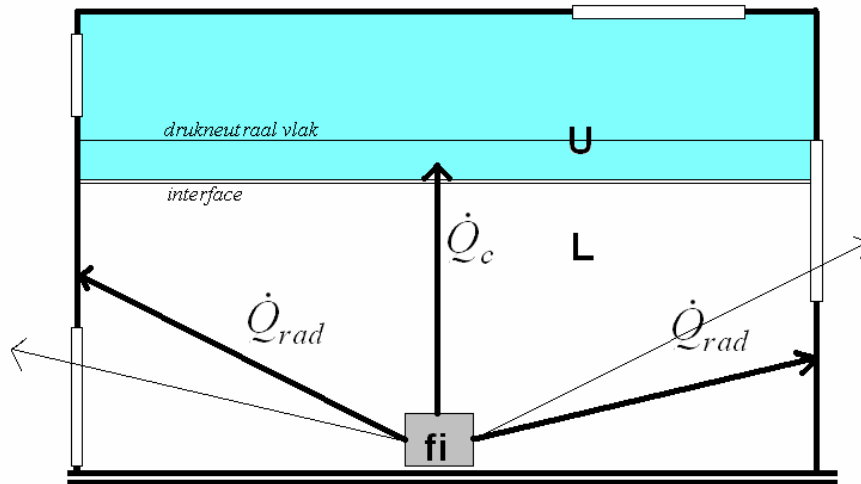


Fig. 2.1: Warmtestromen vanaf de brandhaard in een twee-zone model

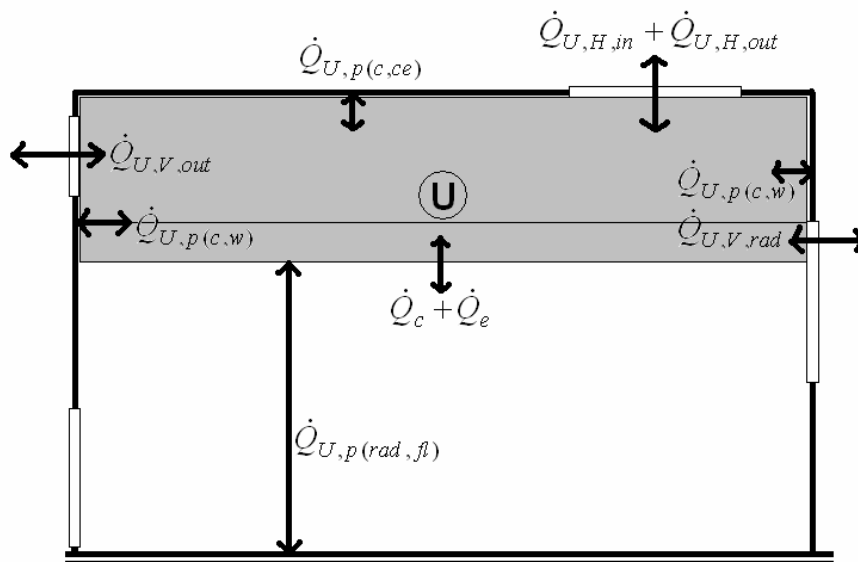


Fig. 2.2: Warmtestromen van en naar de hete zone (U) in het twee-zone model

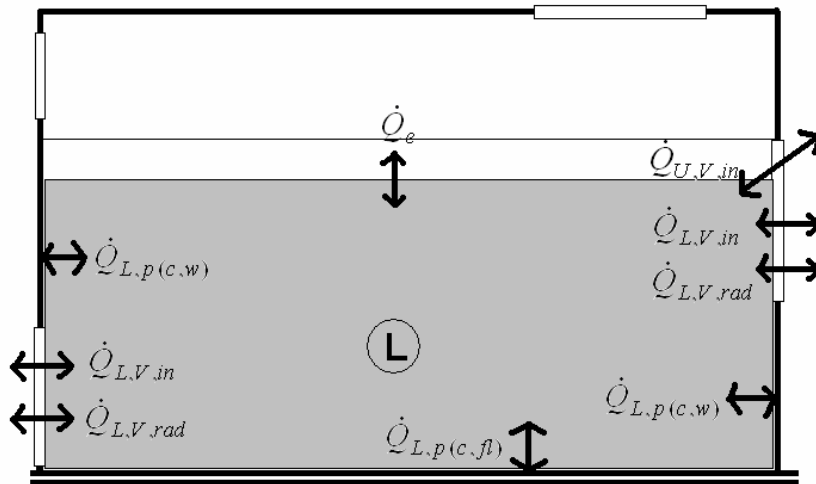


Fig.2.3: Warmtestromen van en naar de koude zone (L) in het twee-zone model

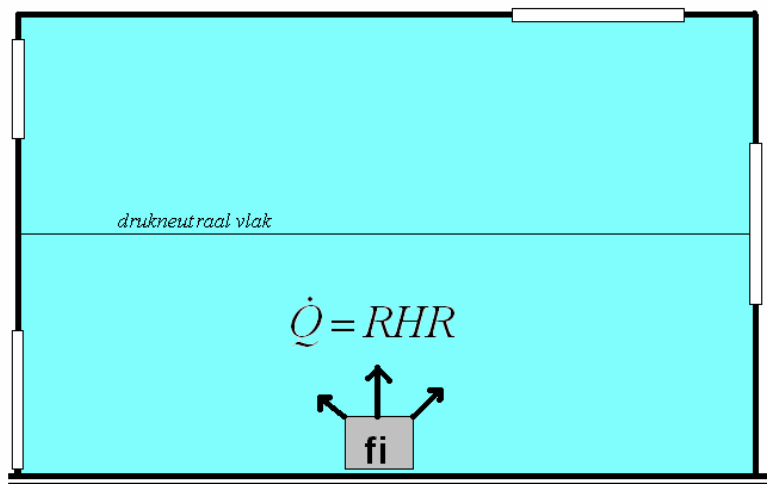


Fig.2.4: Warmtestromen vanaf de brandhaard in het één-zone model

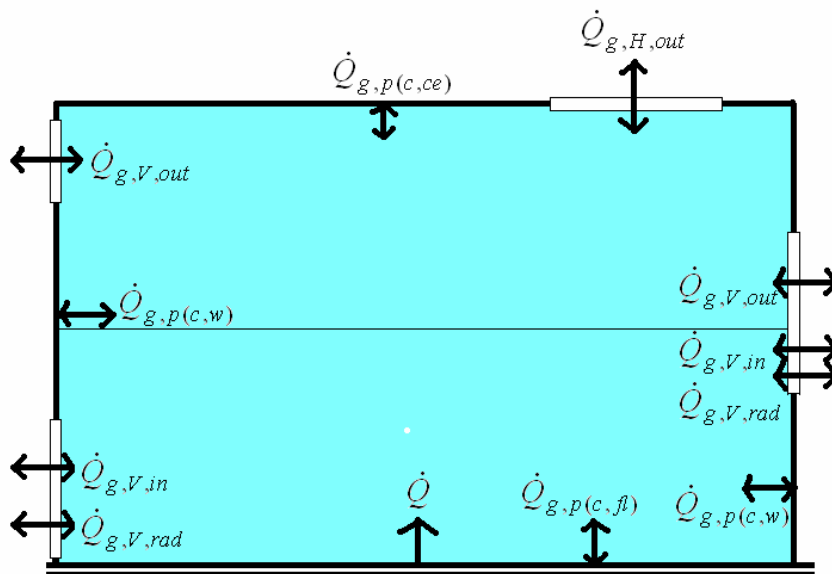


Fig.2.5: Warmtestromen van en naar de gemengde zone (g) in het één-zone model

De voorgaande figuren beschrijven nog niet alle situaties.

Mechanische toevoer- en afvoerstromen zijn niet in de figuren opgenomen, maar duidelijk zal zijn dat hiermee eveneens convectief warmtetransport wordt veroorzaakt.

Daarnaast is het ook mogelijk dat het neutrale vlak in het twee-zone model niet boven de interface ligt (zoals weergegeven in de figuren 2.1 t/m 2.3), maar eronder. Dat levert echter geen wezenlijke verandering op voor de beschouwing van de warmtetransportmechanismen. In dat geval zal $\dot{Q}_{U,V,in}$ vervangen moeten worden door $\dot{Q}_{L,V,uit}$. Bovendien vervalt de term $\dot{Q}_{U,V,rad}$.

2.1 Convectief transport via openingen

Het submodel voor luchtstroming door openingen wordt in het fysisch brandmodel gebruikt om de uitwisseling van massa en energie van de brandruimte met de omgeving te bepalen. Voor de beschrijving van dit model zijn vergelijkingen afgeleid voor de massastromen door verticale en horizontale openingen en door mechanische ventilatievoorzieningen. De energiestromen kunnen vervolgens eenvoudig uit de massastromen bepaald worden. Hiermee staat een volledig model voor de bepaling van de uitwisseling van massa en energie door openingen en mechanische ventilatievoorzieningen voor het fysisch brandmodel ter beschikking.

De volledige beschrijving van het submodel voor luchtstroming is opgenomen in bijlage A. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de toe te passen vergelijkingen (door middel van verwijzingen naar de betreffende vergelijkingen in de bijlage), de randvoorwaarden voor toepassing van het submodel en de in- en outputparameters van het submodel.

2.1.1 Vergelijkingen

De beschrijving van de luchtstroming door openingen en mechanische ventilatievoorzieningen is gesplitst in een beschrijving van deze stroming in één-zone-situaties (na flashover) en twee-zone-situaties (voor flashover). Voor beide situaties zijn vergelijkingen afgeleid voor de massastromen (zowel in- als uitgaand) door verticale gevelopeningen, horizontale dak- en vloeropeningen en mechanische ventilatievoorzieningen.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de verschillende massastromen die onderdeel uit maken van het model in één-zone-situaties met verwijzingen naar de betreffende vergelijkingen.

Tabel 2.1: vergelijkingen voor luchtstroming door openingen en mechanische ventilatievoorzieningen in één-zone-situatie

massastroom	vergelijking(en)
massabalans	(A.1)
uitgaande massastroom door verticale openingen ($\dot{m}_{V,uit}$)	(A.11)
ingående massastroom door verticale openingen ($\dot{m}_{V,in}$)	(A.12)
uitgaande massastroom door horizontale openingen ($\dot{m}_{H,uit}$)	(A.13), (A.20), (A.21), (A.24) en (A.26b) ¹⁾
ingående massastroom door horizontale openingen ($\dot{m}_{H,in}$)	(A.14), (A.23) en (A.25a)
uitgaande massastroom door mechanische ventilatievoorziening ($\dot{m}_{F,uit}$)	(A.27) en (A.28)
ingående massastroom door mechanische ventilatievoorziening ($\dot{m}_{F,in}$)	(A.29) en (A.30)

¹⁾ randvoorwaarde: $\Delta p_c > \Delta p_{FLOOD}$ voor alle dakopeningen en druk door uitzetting verwaarloosbaar ten opzichte van drukverschil door natuurlijke convectie

Tabel 2.2a en 2.2b geven een overzicht van de verschillende massastromen die onderdeel uit maken van het model in twee-zone-situaties voor respectievelijk de hete zone en de koude zone met verwijzingen naar de betreffende vergelijkingen.

Tabel 2.2a: vergelijkingen voor luchtstroming door openingen en mechanische ventilatievoorzieningen in twee-zone-situatie voor de hete zone

massastroom	vergelijking(en)
massabalans	(A.31)
uitgaande massastroom door verticale openingen ($\dot{m}_{U,V,uit}$)	(A.33) en (A.34)
uitgaande massastroom door dakopeningen ($\dot{m}_{U,H,uit}$)	(A.45) en (A.46) ¹⁾
uitgaande massastroom door mechanische ventilatievoorzieningen ($\dot{m}_{U,F,uit}$)	(A.52), (A.56), (A.59), (A.64), (A.68), (A.71) en (A.76)
ingående massastroom door mechanische ventilatievoorzieningen ($\dot{m}_{U,F,in}$)	(A.51), (A.55), (A.57), (A.63), (A.67), (A.69) en (A.75)

¹⁾ randvoorwaarde: $\Delta p_c > \Delta p_{FLOOD}$ voor alle dakopeningen en druk door uitzetting verwaarloosbaar ten opzichte van drukverschil door natuurlijke convectie

Tabel 2.2b: vergelijkingen voor luchtstroming door openingen en mechanische ventilatievoorzieningen in twee-zone-situatie voor de koude zone

massastroom	vergelijking(en)
massabalans	(A.32)
ingående massastroom door verticale openingen onder het neutrale vlak, maar boven het interface ($\dot{m}_{U,V,in}$)	(A.35) en (A.36)
uitgaande massastroom door verticale openingen onder het interface ($\dot{m}_{L,V,uit}$)	(A.37) en (A.38)
ingående massastroom door verticale openingen onder het interface ($\dot{m}_{L,V,in}$)	(A.39) en (A.40)
uitgaande massastroom door vloeropeningen ($\dot{m}_{L,H,uit}$)	(A.48) en (A.50b)
ingående massastroom door vloeropeningen ($\dot{m}_{L,H,in}$)	(A.47) en (A.49a)
uitgaande massastroom door mechanische ventilatievoorzieningen ($\dot{m}_{L,F,uit}$)	(A.54), (A.60), (A.62), (A.66), (A.72), (A.74) en (A.78)
ingående massastroom door mechanische ventilatievoorzieningen ($\dot{m}_{L,F,in}$)	(A.53), (A.58), (A.61), (A.65), (A.70), (A.73) en (A.77)

2.1.2 Randvoorwaarden

De hierboven genoemde vergelijkingen zijn geldig bij de volgende randvoorwaarden (zie ook §A.1):

- Er zijn alleen rechthoekige openingen in verticale scheidingsconstructies (met de onder- en bovenzijde van iedere gevelopening evenwijdig aan een horizontaal vlak) en/of openingen van willekeurige vorm in horizontale scheidingsconstructies van een brandruimte.
- Er is geen invloed van wind op de luchtstromingen.

2.1.3 Input

Om de berekeningen in het submodel voor luchtstroming uit te kunnen voeren zijn verschillende parameters als input vereist. Vele parameters zijn tijdsafhankelijk; voor deze parameters dient dan ook de waarde op tijdstip t bekend te zijn. De input dient bekend te zijn vanuit de invoer door de gebruiker, uit het hoofdmodel of uit andere submodellen.

De volgende input is vereist:

- algemeen:

- massastroom door pyrolyse ($\dot{m}_{\dot{f}}$);
- druk door uitzetting op tijdstip t (p_e);
- omgevingstemperatuur (T_∞);

- gravitatieconstante (g);
 - hoogte van de brandruimte (h_c)
 - breedte, hoogte, hoogte boven de vloer en stromingscoëfficiënt van alle gevelopeningen, eventueel tijd- of temperatuurafhankelijk (diverse parameters, zie betreffende vergelijkingen);
 - oppervlakte en stromingscoëfficiënt van alle dak- en vloeropeningen, eventueel tijd- of temperatuurafhankelijk (A_H en C_d);
 - volumestromen van alle mechanische ventilatievoorzieningen, eventueel tijd- of temperatuurafhankelijk ($\dot{V}_{F,in}$ en $\dot{V}_{F,uit}$);
- specifiek voor de één zone situatie:
- massaverandering van de gemengde zone (\dot{m}_1);
 - temperatuur van de brandruimte (T_1);
- specifiek voor de twee zone situatie:
- massastroom in de rookpluim ter hoogte van het interface (\dot{m}_p);
 - massaverandering van de hete zone (\dot{m}_U);
 - massaverandering van de koude zone (\dot{m}_L);
 - temperatuur van de hete zone (T_U);
 - temperatuur van de koude zone (T_L).

2.1.4 Output

Als output levert het submodel voor elke opening en elke mechanische ventilatievoorziening de grootte van de uitgaande en/of ingaande massastromen (en als afgeleide daarvan eveneens de energiestromen).

2.2 Stralingstransport via openingen

Stralingstransport via openingen in de ruimtebegrenzings treedt enerzijds op vanaf de brandhaard en anderzijds vanaf de aan de opening grenzende zone. Immers, stralingsuitwisseling kan niet alleen van en naar vaste oppervlakken optreden, maar ook van en naar gasvormige lichamen optreden.

Als referentie geldt een lichaam met de omgevingstemperatuur. Stralingsuitwisseling met de omgeving treedt hier niet op. In de twee-zone situatie is de temperatuur van de koude zone in het beginstadium gelijk aan de omgevingstemperatuur en speelt stralingsuitwisseling tussen de koude zone en de omgeving geen rol. De koude zone blijft daarbij relatief schoon (vrij van rookdeeltjes) en is dus doorlatend voor stralingstransport vanaf de brandhaard.

De consequentie hiervan is dat via openingen in de ruimtebegrenzing van de koude zone stralingstransport vanaf de brandhaard naar de omgeving kan optreden. Via openingen in de ruimtebegrenzing van de hete zone kan stralingstransport optreden vanaf de hete zone naar de omgeving. Dit stralingstransport is overigens allen mogelijk wanneer de opening als toevoer functioneert. Indien de opening als afvoer functioneert wordt de warmtestraling door rookdeeltjes in de afvoeropening afgevangen. Het stralingstransport wordt in dit geval nihil verondersteld, er blijft alleen convectief transport over in de opening.

2.2.1 Vergelijkingen

Stralingstransport vanaf een zone naar de omgeving (van binnen naar buiten), via openingen in de begrenzing van die zone, voor zover deze zijn gelegen onder het drukneutrale vlak van de brandruimte:

$$\dot{Q}_{i,V,rad} = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_\infty^4) A_{i,V,rad} \quad \text{voor } i=U, L \text{ of } g.$$

Hierin is:

$A_{i,V,rad}$ de oppervlakte van de opening onder het drukneutrale vlak van de brandruimte (toevoer).

ε de emissiecoëfficiënt tussen zone en omgeving (=1)

σ de constante van Stefan-Boltzman (=5,67.10⁻⁸)

Stralingstransport vanaf de brandhaard naar de omgeving (van binnen naar buiten), via openingen in de begrenzing van de koude zone:

$$\dot{Q}_{rad,V} = \phi \cdot \dot{Q}_{rad} \quad \text{met:} \quad \dot{Q}_{rad} = 0,3 \cdot \dot{Q} = 0,3 \cdot RHR$$

Hierin is:

ϕ de zichtfactor vanuit de brandhaard via de openingen naar de omgeving.

De zichtfactor kan worden benaderd door:

$$\phi = \frac{A_{L,V}}{A_{L,W}}$$

Met andere woorden: de verhouding van de openingsoppervlakte in de begrenzing van de koude zone met de totale wandoppervlakte van de begrenzing van de koude zone. Straling van de brandhaard naar de vloer wordt verwaarloosd (theoretische zichtfactor nihil) evenals straling van de brandhaard naar de hete zone (wordt grotendeels door de rookpluim afgevangen).

Straling vanaf de brandhaard naar de omgeving via openingen die aan de hete zone (U) grenzen of aan de gemengde zone (g) in geval van een één-zone situatie, treedt niet op.

2.2.2 Randvoorwaarden

De hierboven genoemde vergelijkingen zijn geldig indien de openingen in de begrenzing van de betreffende zone ook voor straling als open te beschouwen is. De transmissiecoëfficiënt van de opening voor warmtestraling dient dus circa 1 te bedragen. Voor daglichtopeningen, afgesloten met glas (nog niet bezweken), moet derhalve een correctie worden toegepast.

2.2.3 Input

De volgende input is vereist:

- de omgevingstemperatuur
- de temperatuur van de hete zone (twee-zone model) of de gemengde zone (één-zone model)
- de oppervlakte van de verticale scheidingsconstructies van de koude zone (twee-zone model) en de openingen hierin.

2.2.4 Output

Als output wordt de grootte van de uitgaande energiestromen door straling vanuit de brandruimte geleverd.

2.3 Convectief warmtetransport naar de ruimtebegrenzingsen

In een brandruimte is vaak een turbulente stromingssituatie aanwezig. Daardoor kan warmte-uitwisseling optreden tussen de ruimtelucht en de ruimtebegrenzing. Immers, de mate van turbulentie beïnvloedt de warmte-overdrachtscoëfficiënt (α_c) tussen de lucht en de begrenzing.

De mate waarin vervolgens warmtetransport optreedt hangt af van het temperatuurverschil tussen de ruimtelucht en de binnenoppervlakte van de begrenzing. De temperatuur aan de binnenoppervlakte van de begrenzing wordt mede bepaald door de materiaaleigenschappen van de begrenzing (massa, soortelijke warmte, warmtegeleiding), zie hiervoor paragraaf 2.5.

2.3.1 Vergelijkingen

Convectief warmtetransport vanaf een zone naar de begrenzing (van binnen naar buiten):

$$\dot{Q}_{i,p(c)} = \alpha_c (T_i - T_{p,opp}) A_{i,p} \quad \text{voor } i=U, L \text{ of } g.$$

Hierin is:

$A_{i,p}$ de oppervlakte van de scheidingsconstructies (p), grenzend aan de zone (i)
 $T_{p,opp}$ de temperatuur aan de binnenoppervlakte van de scheidingsconstructies (p)
 α_c de convectieve warmte-overdrachtscoëfficiënt aan de binnenoppervlakte

2.3.2 Randvoorwaarden

De binnenoppervlaktetemperatuur van de scheidingsconstructie kan alleen berekend worden indien dit warmtetransportmechanisme wordt gekoppeld aan een model voor warmtetransport in de begrenzende constructies (zie paragraaf 2.5).

2.3.3 Input

Naast de temperatuur van de betreffende zone en de oppervlakte van de begrenzende constructies dient de warmte-overdrachtscoëfficiënt bekend te zijn. Vanwege de turbulente condities in een brandruimte wordt daarvoor standaard een waarde gehanteerd van:

$$\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

2.3.4 Output

Als output levert het submodel de convectieve energiestromen tussen de verschillende zones en de begrenzende scheidingsconstructies.

2.4 Stralingstransport naar de ruimtebegrenzingsen

In de twee zone situatie wordt naast het via de rookpluim convectief afgevoerde brandvermogen (Q_c) een aanzienlijk gedeelte van het brandvermogen door straling (Q_{rad}) afgegeven aan de ruimtebegrenzingsen van de koude zone (circa 70% convectief, 30% straling).

Stralingstransport vanaf de brandhaard naar de begrenzingsen van de hete zone treedt niet op. Deze begrenzing is belemmerd door de hete zone, waardoor warmtestraling wordt afgevangen. Stralingstransport vanaf de brandhaard naar de hete zone (rooklaag) treedt om dezelfde reden evenmin op. De hete zone is, vanuit de brandhaard gezien belemmerd door de rookpluim. Stralingstransport naar de vloer van de koude zone is verwaarloosbaar, omdat de zichtfactor hiervan verwaarloosbaar is.

Naast stralingstransport vanaf de brandhaard kan stralingstransport vanaf de hete zone (rooklaag) optreden. Dit stralingstransport treedt op naar de begrenzingsen van de koude zone. De vloer van de koude zone bezit hiervoor de grootste zichtfactor. De zichtfactoren van de begrenzende wanden zijn zoveel kleiner dat deze buiten beschouwing worden gelaten. Dit houdt in dat er vanaf de hete zone (rooklaag) alleen warmtestralingstransport naar de vloer van de koude zone optreedt.

In het gemengde zone model komt het totale brandvermogen (convectie en straling) ten laste van de gemengde zone. De straling bereikt de ruimtebegrenzingsen niet, maar wordt afgevangen door rookdeeltjes in het ruimtevolumen.

De figuren in bijlage B illustreren het bovenstaande.

2.4.1 Vergelijkingen

Stralingstransport vanaf de brandhaard naar de omgeving (van binnen naar buiten), in dit geval de begrenzing van de koude zone:

$$\dot{Q}_{rad,v} = \dot{Q}_{rad} \quad \text{met:} \quad \dot{Q}_{rad} = 0,3 \cdot \dot{Q} = 0,3 \cdot RHR$$

Hierin is:

$\dot{Q}_{rad,v}$ de naar de wanden (begrenzing) van de koude zone optredende warmtestroom door straling

Stralingstransport vanaf de hete zone (rooklaag) naar de vloer van de koude zone:

$$\dot{Q}_{U,p(rad,fl)} = \varepsilon \sigma (T_U^4 - T_{fl}^4) A_{fl}$$

Hierin is:

A_{fl} de vloeroppervlakte van de brandruimte

T_U de temperatuur van de hete zone

T_{fl} de temperatuur van de vloeroppervlakte

ε de emissiecoëfficiënt tussen hete zone en vloer (=0,8)

σ de constante van Stefan-Boltzman (=5,67.10⁻⁸)

2.4.2 Randvoorwaarden

De hierboven genoemde vergelijkingen zijn geldig indien de straling vanaf de brandhaard geheel ten goede komt aan de wanden van de koude zone. Eventueel kan gecorrigeerd worden op openingen in deze wanden (zie ook paragraaf 2.2). Daarnaast komt de straling vanaf de hete zone (rooklaag) geheel ten goede aan de vloer van de koude zone.

2.4.3 Input

De volgende input is vereist:

- de temperatuur van de hete zone (twee-zone model)
- de temperatuur van de vloeroppervlakte in de koude zone
- de oppervlakte van de verticale scheidingsconstructies van de koude zone

2.4.4 Output

Als output wordt de grootte van de energiestromen door straling van en naar de begrenzingen van de brandruimte geleverd.

2.5 Warmtetransport in de ruimtebegrenzingsen

De warmteverliezen vanuit de brandruimte naar de omgeving en naar de begrenzingsen hebben een belangrijke invloed op het verloop van de brandtemperatuur. Warmteverliezen naar de begrenzingsen treden op onder invloed van convectie en straling. De begrenzingsen warmen daardoor op, ze bufferen een deel van de energie in de brandruimte. Daarnaast kan de begrenzingsen ook warmtetransport optreden als gevolg van geleiding in het materiaal. De thermische eigenschappen van de begrenzingsen zijn hierin bepalend. De volgende materiaaleigenschappen spelen hierbij een rol:

- de soortelijke warmte, c
- de dichtheid, ρ
- de warmtegeleiding, λ

2.5.1 Vergelijkingen

De warmtegeleiding en de warmtecapaciteit hangen af van de temperatuur. In eenvoudige modellen, wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde thermische traagheid (b), om het effect van het warmtetransport naar de omhullende constructie in rekening te brengen. Er geldt:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c}$$

Het hierbij optredende warmtetransport bedraagt voor een half-oneindige begrenzing (een ideaal thermisch dikke constructie: Karlsson and Quintiere, 2000):

$$\dot{Q}_p = \frac{b}{\sqrt{\pi t}} \cdot A_p (T_g - T_\infty) \quad (2.5.1)$$

In een ideale thermisch dunne constructie (en ook in stationaire situaties) treedt geen warmtebuffering op. In dat geval treedt er warmtetransmissie door geleiding op via de constructie:

$$\dot{Q}_p = \frac{\lambda}{d} \cdot A_p (T_g - T_\infty) \quad (2.5.2)$$

De meeste constructies zijn niet precies thermisch dik of thermisch dun. De thermische penetratiediepte kan worden gedefinieerd als de limiet tussen vergelijking (2.5.1) en vergelijking (2.5.2). Deze hangt af van de thermische diffusiteit of temperatuurvereffeningscoëfficiënt (α):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

De thermische penetratiediepte bedraagt:

$$d_p = 2\sqrt{\alpha t}$$

Hierin is t het tijdsinterval waarover de temperatuurbelasting wordt beschouwd.

De grootte $\sqrt{\alpha \cdot t}$ is de karakteristieke thermische geleidingsdiepte (of karakteristieke thermische indringingsdiepte) van het materiaal. Wanneer het materiaal meer dan tweemaal zo dik is als de karakteristieke thermische geleidingsdiepte kan het worden beschouwd als thermisch dik. Is dit niet het geval, dan is het materiaal thermisch dun.

2.5.2 Randvoorwaarden

De vergelijkingen in de voorgaande paragraaf kunnen alleen worden toegepast wanneer de begrenzingsen als ideaal thermisch dik kunnen worden beschouwd, of ideaal thermisch dun. In het geval van thermisch dunne constructies moet met warmtetransmissie door geleiding worden gerekend, in elk geval wanneer de constructie niet of slecht thermisch geïsoleerd is van de omgeving.

Een goed geïsoleerde thermisch dunne constructie kan eventueel adiabatisch beschouwd worden, onder de voorwaarde dat de isolatielaag intact blijft bij de temperatuurbelasting. Zie tabel 2.3.

Tabel 2.3: relevante warmtetransportmechanismen bij thermisch dikke en thermisch dunne constructies

scheidingsconstructie	isolatieniveau	Consequentie
Thermisch dik	Ongeïsoleerd	Alleen warmtebuffering is relevant. Omdat de constructie thermisch traag is warmt de niet-verhitte zijde niet op en speelt transmissie geen rol. Het maakt dus niet uit of de constructie geïsoleerd of ongeïsoleerd is.
	Geïsoleerd	
Thermisch dun	Ongeïsoleerd	Warmtebuffering speelt een kleinere rol. Er is een grotere warmtestroom dan gebufferd kan worden in de constructie. Het overschot wordt door transmissie aan de buitenlucht afgegeven.
	Geïsoleerd	Warmtebuffering speelt een kleinere rol. Er is een grotere warmtestroom dan gebufferd kan worden in de constructie. Transmissie is echter verwaarloosbaar bij geïsoleerde scheidingsconstructies. De temperatuur in de constructie aan de binnenzijde van de isolatielaag benadert de temperatuur van de aangrenzende hete zone.

Veel begrenzendende constructies zijn opgebouwd uit verschillende materiaallagen. De thermische traagheid is dan niet goed meer als een eigenschap van de begrenzing te definiëren. In dat geval wordt aangeraden de begrenzing in de verschillende materiaallagen onder te verdelen en per laag voor elke tijdstap de opwarming en de daarbij behorende buffering en geleiding te bepalen. Een dergelijke numerieke methode kan worden geïntegreerd in een numerieke simulatieberekening van het fysisch brandmodel. Zie bijlage C.

2.5.3 Input

Voor zowel gedetailleerde numerieke berekeningen als meer globale berekeningen gebaseerd op paragraaf 2.5.1 zijn materiaaleigenschappen benodigd:

- de dikte van elke materiaallaag in de ruimtebegrenzing
- de warmtegeleidingscoëfficiënt van elke materiaallaag
- de soortelijke warmtecapaciteit van elke materiaallaag
- de soortelijke massa van elke materiaallaag
- de oppervlakte van elke constructie in de begrenzing
- de temperaturen van de zones en de omgeving

2.5.4 Output

Als output levert het submodel de binnenoppervlaktetemperaturen en energiestromen vanaf de binnenoppervlakte van de begrenzingen naar de begrenzingen (energiebuffering) en de omgeving (warmtetransmissie).

Hoofdstuk 3 Warmte- en massatransport binnen de ruimte

3.1 Bron: het verbrandingsmodel

Een brand wordt gekenmerkt door het brandvermogen, de afbrandsnelheid, de pyrolysesnelheid en de brandoppervlakte. Het brandvermogen is van belang voor de energiebalans van het zonemodel en de afbrandsnelheid en pyrolysesnelheid voor de massabalans van het zonemodel. De brandoppervlakte is van belang in sommige pluimmodellen en lokale modellen.

Uit rapport Wu040430aaA1.rhe is gebleken dat op basis van het type brandstof een brandstofbeheerst brandscenario kan worden gedefinieerd. Dit brandscenario bestaat uit een brandvermogenscurve, die vanaf $t = 0$ (ontstaan van de brand) de brandontwikkeling weergeeft tot het maximale uitbreidingsgebied van de brand is bereikt. Vervolgens ontstaat een stationaire situatie, totdat circa 70% van de brandstof is verbrand en de dooffase (lineaire afname) inzet.

Omdat het een brandstofbeheerst brandscenario betreft komt de afbrandcurve (pyrolysecurve) overeen met de brandvermogenscurve. Dit is in de onderstaande figuur geïllustreerd.

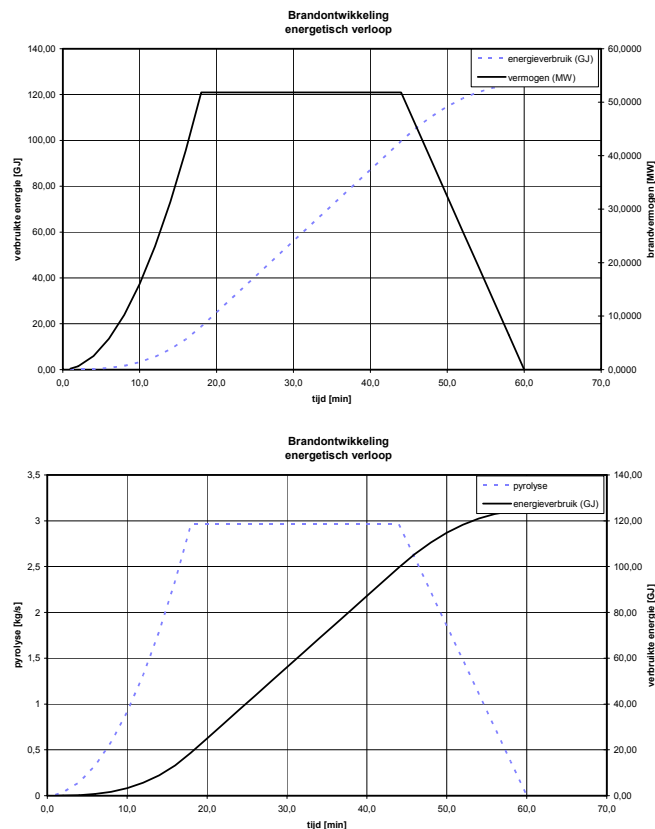
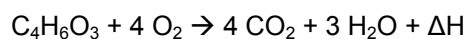


Fig. 3.1: Brandstofbeheerst brandvermogensscenario; het brandvermogen en de afbrandsnelheid (pyrolyse) zijn equivalent

Als brandstof wordt $C_4H_6O_3$ aangehouden. Dit is een fictieve brandstof, die in samenstelling overeenkomt met hout. De chemische reactie bij volledige verbranding hiervan is:



Hieruit kan worden afgeleid:

1 kg brandstof + 1,27 kg zuurstof \rightarrow 2,27 kg verbrandingsproducten en warmte.

Volledige verbranding treedt op zolang er voldoende zuurstof aanwezig is. In beginsel bevat lucht circa 21% (v/v) zuurstof (circa 23% (m/m)). Tijdens het verbrandingsproces kan de verandering van de in de lucht aanwezige zuurstof worden bepaald op basis van de volgende vergelijking:

$$\dot{m}_{ox} = \dot{m}_{ox,in} - \dot{m}_{ox,uit} - 1,27\dot{m}_{fi}$$

waarin: \dot{m}_{ox} = verandering van massa zuurstof in de brandruimte [kg/s]

$\dot{m}_{ox,in}$ = ingaande massastroom zuurstof door openingen [kg/s]

$\dot{m}_{ox,uit}$ = uitgaande massastroom zuurstof door openingen [kg/s]

\dot{m}_{fi} = massastroom door pyrolyse [kg/s]

Door deze vergelijking te integreren over kleine tijdsintervallen kan op elk gewenst tijdstip van het brandscenario de aanwezige massa zuurstof worden bepaald. Wanneer onvoldoende zuurstof aanwezig is voor het verbrandingsproces zal de massa zuurstof nul worden en ontstaat een ventilatiebeheerste brand.

Er kunnen drie eenvoudige verbrandingsmodellen gedefinieerd worden die geschikt zijn om in een zonemodel opgenomen te worden:

1. voorgedefinieerd brandstofbeheerst verbrandingsmodel;
2. brandstofbeheerst – ventilatiebeheerst verbrandingsmodel met verlengde brandduur (extended duration);
3. brandstofbeheerst – ventilatiebeheerst verbrandingsmodel met uitslaande vlammen (external flaming).

3.1.1 Voorgedefinieerd brandstofbeheerst verbrandingsmodel

Het voorgedefinieerde brandstofbeheerste verbrandingsmodel (ook vaak aangeduid als no-combustion model) houdt geen rekening met de aanwezige massa zuurstof. De brand blijft daardoor altijd brandstofbeheerst. Het brandvermogensscenario en pyrolyses scenario zijn equivalent en wijken niet af van het opgelegde scenario:

$$\dot{m}_{fi}(t) = \dot{m}_{fi,data}(t)$$

$$\dot{Q}_{fi}(t) = \dot{Q}_{fi,data}(t) = \dot{m}_{fi}(t) \cdot H_{f,eff}$$

waarin: $\dot{m}_{fi,data}$ = voorgedefinieerde massastroom door pyrolyse [kg/s]

$\dot{Q}_{fi,data}$ = voorgedefinieerd brandvermogen [kW]

$H_{f,eff}$ = verbrandingsefficiëntie [-]

3.1.2 Brandstofbeheerst – ventilatiebeheerst verbrandingsmodel met verlengde brandduur (extended duration)

Het voorgedefinieerde verbrandingsmodel wordt in dit geval ventilatiebeheerst wanneer onvoldoende zuurstof aanwezig is. Het brandvermogensscenario wordt hierdoor kleiner. De brand wordt doorgaans ventilatiebeheerst wanneer deze volledig ontwikkeld is (dus in de stationaire fase, na flash-over). In de stationaire fase is het brandvermogen daardoor kleiner dan bij een brandstofbeheerste brand.

In dit verbrandingsmodel wordt ook de pyrolyse in deze fase gereduceerd, zodanig dat pyrolyse en brandvermogen gelijke tred houden met elkaar. Het gevolg hiervan is dat het langer duurt voordat alle brandbare materiaal is verbrand. De brandduur wordt hierbij dus verlengd.

Tijdens de ventilatiebeheerste fase geldt:

$$\dot{m}_{fi}(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1,27}$$

$$\dot{Q}_{fi}(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1,27} \cdot H_{f,eff}$$

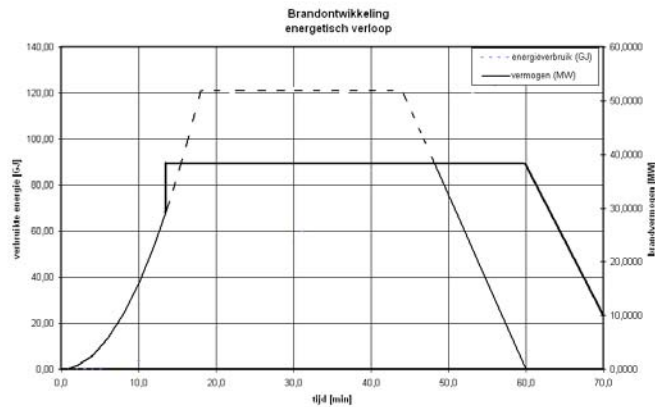


Fig.3.2: Aangepast brandvermogensscenario bij een ventilatiebeheerste stationaire fase met verlengde brandduur.

3.1.3 Brandstofbeheerst – ventilatiebeheerst verbrandingsmodel met uitslaande vlammen (external flaming)

In dit verbrandingsmodel wordt eveneens het brandvermogen gereduceerd indien de brand ventilatiebeheerst is. De pyrolyse wordt niet gereduceerd. De verbrandingsgassen bevatten nu naast de (volledige) verbrandingsproducten ook brandstof.

Bij uitstroming van deze verbrandingsgassen uit (gevel)openingen kan zuurstof toetreden, waardoor de hierin aanwezige brandstof verder verbrand. Dit levert uitslaande vlammen op vanuit deze openingen. Naast het brandvermogen binnen de brandruimte komt zo ook een deel van het brandvermogen buiten de brandruimte vrij in de uitslaande vlammen. Het model voor de berekening van de uitslaande vlammen moet hierop zijn afgestemd.

Het gesommeerde ventilatiebeheerste brandvermogen binnen en buiten de brandruimte is gelijk aan het brandstofbeheerste brandvermogen. De pyrolyse wordt dus niet gereduceerd tijdens de ventilatiebeheerste brand, zodat ook geen verlengde brandduur optreedt.

Tijdens de ventilatiebeheerste fase geldt:

$$\dot{m}_{fi}(t) = \dot{m}_{fi,data}(t)$$

$$\dot{Q}_{fi}(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1,27} \cdot H_{f,eff}$$

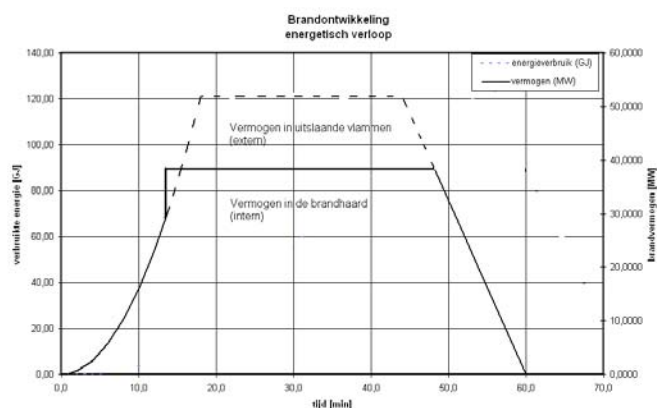


Fig 3.3: Aangepast brandvermogensscenario bij een ventilatiebeheerste stationaire fase met uitslaande vlammen. Een deel van het brandvermogen komt buiten de brandruimte tot stand, waardoor er geen verlengde brandduur is.

3.1.4 Opmerkingen bij de verbrandingsmodellen

De besproken verbrandingsmodellen zijn gedefinieerd door een massastroom (pyrolyse) en een brandvermogen vanaf de brandhaard. De verbrandingsgassen bevatten in deze opzet alleen volledige verbrandingsproducten (voornamelijk CO_2 en H_2O) en, in het model met uitslaande vlammen, pyrolyseproduct (brandstof).

In werkelijkheid ontstaan bij een ventilatiebeheerste brand (luchtfactor kleiner dan 1) onvolledige verbrandingsproducten (zoals CO , H_2 en C), die in de uitslaande vlammen als gevolg van zuurstoftoetreding verder zullen verbranden tot hun volledige verbrandingsproducten. Dit is een ander mechanisme, dat overigens voor de massastroom en het brandvermogen vanaf de brandhaard geen grote verschillen geeft, zie bijlage D.

Bij een luchtfactor van 0 is er nog wel pyrolyse (indien de temperatuur van de brandruimte hoog genoeg is) maar geen verbranding meer. Bij een luchtfactor tussen 0 en 0,1 kan in theorie enige verbranding optreden, maar is de verbrandingsenthalpie lager dan de vormingsenthalpie van de brandstof, zodat vermogen aan de brandhaard wordt onttrokken. Ook dit proces kan alleen optreden indien de temperatuur van de brandruimte hoog genoeg is. Bij een te lage temperatuur dooft de brand en stopt dus ook de pyrolyse.

In de praktijk kunnen ook bij een luchtfactor groter dan 1 (waarbij dus een brandstofbeheerste brand wordt verondersteld) onvolledige verbrandingsproducten ontstaan. Om dit effect te ondervangen wordt als praktische grenswaarde tussen ventilatiebeheerste brand en brandstofbeheerste brand een luchtfactor van 1,2 gehanteerd.

3.2 Beïnvloeding van de bron door automatische blusinstallatie

Er bestaan verschillende typen automatische blusinstallaties, zoals sprinklerinstallaties, blusschuiminstallaties of blusgasinstallaties. In het fysisch brandmodel zullen alleen sprinklerinstallaties opgenomen worden. Reden hiervoor is dat alleen sprinklerinstallaties een breed toepassingsgebied hebben. Andere automatische blusinstallaties hebben specifieke toepassingsgebieden, bijvoorbeeld serverruimten of opslag van gevaarlijke stoffen, en worden derhalve veel minder toegepast¹.

Deze paragraaf zal ingaan op de beschrijving van het effect van een automatische sprinklerinstallatie op een brand. Na een korte inleiding worden de verschillende typen sprinklerinstallaties toegelicht. Vervolgens worden de mogelijke brandscenario's na activering van een sprinklerinstallatie beschreven. Op basis van in bijlage E opgenomen onderzoek wordt ten slotte de gekozen beschrijving van het effect van een sprinklerinstallatie op een brand voor het fysisch brandmodel toegelicht.

3.2.1 Inleiding

Van alle mogelijke middelen om branden te blussen wordt water veruit het meeste toegepast. Behalve het feit dat water op grote schaal voorradig is en goedkoop is, is een belangrijke reden voor het gebruik van water het grote vermogen om warmte aan een brand te onttrekken, vanwege de hoge soortelijke warmte en hoge latente verdampingswarmte.

Automatische sprinklerinstallaties worden beschouwd als de meest effectieve en economische methode voor het onderdrukken van branden met water (Fleming, 2002). Ze worden vooral toegepast in gebouwen met een verhoogd brandgevaar of gebouwen waarin een brand zich zo snel kan ontwikkelen (in vermogen en omvang) dat de brand na een standaard melding aan de alarmcentrale niet meer binnen redelijke grenzen te houden is door de brandweer.

Het belangrijkste doel van sprinklerinstallaties was oorspronkelijk het beperken van materiële schade. Uit diverse onderzoeken (...) blijkt dat sprinklerinstallaties ook een bijdrage leveren in het beperken van het aantal slachtoffers van branden. In de VS (Rohr en Hall, 2005) geldt voor materiële schade een daling van 50% tot 66% voor gebouwen met sprinklerinstallatie in vergelijking tot gebouwen zonder sprinklerinstallatie; het aantal dodelijke slachtoffers als gevolg van brand in gebouwen met een sprinklerinstallatie ligt 50% tot 75% lager dan in gebouwen zonder sprinklerinstallatie;.

3.2.2 Typen sprinklerinstallaties

Sprinklerinstallaties kunnen onderverdeeld worden in vier verschillende systemen (Fleming, 2002; Harteloh et al., 2000). Tabel 3.1 geeft een korte beschrijving van de werking van de verschillende typen.

¹ Blusgasinstallaties zijn overigens relatief eenvoudig in het fysisch brandmodel op te nemen.

Tabel 3.1: typen sprinklerinstallaties en werking

type installatie	omschrijving werking
nat systeem	leidingennetwerk gevuld met water onder druk in combinatie met automatische sprinklerkoppen; zodra een sprinklerkop geactiveerd wordt, stroomt water uit door die sprinklerkop
droog systeem	leidingennetwerk gevuld met lucht of stikstof onder druk in combinatie met automatische sprinklerkoppen; zodra een sprinklerkop geactiveerd wordt, stroomt water het leidingennetwerk in en daarna door de geactiveerde sprinklerkop uit (toegepast wanneer water in het leidingennetwerk zou kunnen bevriezen)
deluge systeem	open, niet-gevuld leidingennetwerk in combinatie met open sprinklerkoppen; zodra een brand gedetecteerd wordt (door een separaat detectiesysteem) stroomt water het leidingennetwerk in en via alle sprinklerkoppen uit
pre-action systeem	leidingennetwerk gevuld met lucht of stikstof onder druk in combinatie met automatische sprinklerkoppen; zodra een brand gedetecteerd wordt (door een separaat detectiesysteem) stroomt water het leidingennetwerk in; zodra vervolgens een sprinklerkop geactiveerd wordt stroomt water uit door die sprinklerkop (o.a. toegepast in ruimten met waardevolle apparatuur)

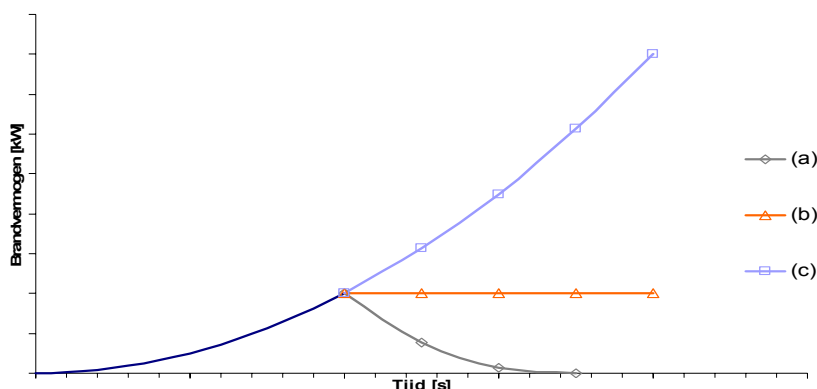
Sprinklerinstallaties volgens het natte systeem worden veruit het meeste toegepast (Fleming, 2002). Een installatie kan hierbij ontworpen worden vanuit het oogpunt om een brand te blussen, dan wel de uitbreiding van een brand te beperken (bijvoorbeeld totdat blussing door de brandweer kan plaatsvinden).

3.2.3 Mogelijke brandscenario's na activering sprinklerinstallatie

Wanneer een brand zich ontwikkelt in een ruimte met een automatische sprinklerinstallatie, zal deze installatie de brand op een bepaald moment detecteren en geactiveerd worden.² Het tijdstip van activering van een sprinklerinstallatie kan bepaald worden met behulp van het in paragraaf 4.3 beschreven model voor automatische branddetectie. Vanaf het tijdstip van activering is minimaal één sprinklerkop open en wordt water aan de brand toegevoerd. Er zijn nu in principe drie scenario's mogelijk voor het effect van de geactiveerde sprinklerinstallatie op de ontwikkeling van de brand:

- de brand wordt geblust door de sprinklerinstallatie;
- de brand wordt gecontroleerd door de sprinklerinstallatie; dat wil zeggen: de brand wordt niet geblust, maar breidt ook niet verder uit;
- de sprinklerinstallatie slaagt er niet in de brand te controleren, zodat de brand (eventueel na een periode waarin de brandontwikkeling geremd wordt) kan uitgroeien tot een volledig ontwikkelde brand.

Figuur 3.4 geeft de drie mogelijke scenario's schematisch weer, uitgedrukt in het brandvermogen.



Figuur 3.4 Schematisch verloop van het brandvermogen in de drie mogelijke scenario's na sprinkleractivering: brand wordt geblust (a), brand wordt gecontroleerd (b), brand ontwikkelt zich verder (c)

² Er wordt hierbij van uit gegaan dat de sprinklerinstallatie ook daadwerkelijk geactiveerd wordt indien de brand daarvoor een voldoende grote omvang heeft, zie ook bijlage E, §E.3.

De situatie dat de sprinklerinstallatie er niet in slaagt om de brand te controleren kan bijvoorbeeld voorkomen wanneer de kracht van het vallende water uit de sprinklerkop(pen) onvoldoende is om door de opstijgende rookpluim te dringen en dus de brandhaard niet kan bereiken. Indien te kleine waterdruppels uit de sprinklerkop(pen) stromen kan het ook gebeuren dat het water verdampt in de hete rook (Drysdale, 2002).

3.2.4 Modelling van sprinklerinstallaties in het fysisch brandmodel

Ten behoeve van de beschrijving van het effect van een automatische sprinklerinstallatie op een brand is literatuuronderzoek verricht (zie bijlage E). Uit dit onderzoek volgt dat het met de huidige kennis nog niet mogelijk is een beschrijving van deze repressie te geven die gebaseerd is op fysische of empirische beschouwingen van de optredende verschijnselen. Een statistische analyse van het effect van automatische sprinklerinstallaties op een brand is wel mogelijk. Hieruit blijkt dat een geactiveerde sprinklerinstallatie vrijwel altijd effectief is, wat inhoudt dat de brand ten minste gecontroleerd wordt of zelfs geblust wordt. Door het goed ontwerpen van sprinklerinstallaties, het navolgen van voorschriften en het regelmatig plegen van onderhoud kan het risico dat een installatie niet geactiveerd wordt of er na activering niet in slaagt om de brand te controleren grotendeels weggenomen worden.

Voor het fysisch brandmodel wordt als standaard beoordeling van het effect van een sprinklerinstallatie geadviseerd er van uit te gaan dat de installatie geactiveerd wordt (afhankelijk van de brandomvang, berekend volgens model voor thermische detectie) met vervolgens als veilige benadering dat de sprinklerinstallatie het brandvermogen constant houdt (scenario (b) in figuur 3.4).

In een zeer gering percentage van de situaties (circa 2%) wordt een sprinklerinstallatie niet geactiveerd of slaagt de installatie er niet in de brand onder controle te houden. Indien gewenst kan de ontwikkeling van het brandvermogen in deze situaties berekend worden door de aanwezigheid van een sprinklerinstallatie niet in rekening te brengen (scenario (c) in figuur 3.4), waarna op de rekenresultaten van deze twee fysische scenario's eventueel een risicoanalyse uitgevoerd kan worden. Voor een benadering op basis van risicofactoren zie rapport Wu040430aaA3.rhe.

3.3 Overdracht: het pluimmodel

Het pluimmodel wordt in de twee zone situatie van het fysisch brandmodel gebruikt om het transport van massa en energie van de koude zone onder in de ruimte naar de hete zone boven in de ruimte te bepalen. Om dit te kunnen bepalen zijn vergelijkingen afgeleid voor de massastroom in de rookpluim ter hoogte van de grens van de koude en de hete zone. De energiestroom in de rookpluim is in het hoofdmodel eenvoudig te berekenen uit de massastroom en het brandvermogen. Hiermee staat een volledig model voor de bepaling van het transport van massa en energie van de koude naar de hete zone voor het fysisch brandmodel ter beschikking.

De volledige beschrijving van het submodel voor de rookpluim is opgenomen in bijlage F. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de toe te passen vergelijkingen (door middel van verwijzingen naar de betreffende vergelijkingen in de bijlage), de randvoorwaarden voor toepassing van het submodel en de in- en outputparameters van het submodel.

3.3.1 Vergelijkingen

Voor de beschrijving van de eigenschappen van de rookpluim moet de pluim onderverdeeld worden in drie regio's: de pluimregio boven de vlammen en de 'intermittent flame'- en 'persistent flame'-regio's in de vlammen. De 'persistent flame'-regio is het gebied onderin de vlammen waar altijd vlammen aanwezig zijn; de 'intermittent flame'-regio is het gebied tussen de 'persistent flame'-regio en de pluimregio. Per regio zijn de eigenschappen van de rookpluim anders, zodat ook per regio vergelijkingen opgesteld zijn voor de verschillende parameters.

De vergelijkingen die gebruikt worden voor de beschrijving van de rookpluim zijn onafhankelijk van de tijd. Dit betekent dat veranderingen in parameters van het verbrandingsmodel (bijvoorbeeld een toename van het brandvermogen) instantaan merkbaar zijn in de gehele rookpluim. Voor stationaire branden is deze aanname (uiteraard) geldig. Ook voor quasi-branden, waarvoor veranderingen in de parameters van de verbranding klein zijn in vergelijking tot de transporttijd van de rook in de rookpluim, is deze aanname gerechtvaardigd. In vrijwel alle gevallen kan een brand als quasi-stationair beschouwd worden en kunnen de vergelijkingen uit dit hoofdstuk voor de beschrijving van de rookpluim dus toegepast worden (Zukoski, 1995, pp. 130).

3.3.2 Pluimregio

Voor de pluimregio zijn naast de massastroom in de rookpluim tevens vergelijkingen nodig voor de gemiddelde vlamlengte en de virtuele oorsprong. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de aanbevolen vergelijkingen voor de parameters geldig onder normale atmosferische omstandigheden ($T_{\infty} = 293 \text{ K}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $c_p = 1,00 \text{ kJ/kgK}$, $\rho_{\infty} = 1,2 \text{ kg/m}^3$). De energiestroom in de rookpluim is in het hoofdmodel eenvoudig te berekenen uit de massastroom en het brandvermogen.

Tabel 3.2: vergelijkingen voor pluimmodel in pluimregio

parameter	vergelijking
massastroom (\dot{m}_{ent})	(F.20) ^{1) 2) 2)}
gemiddelde vlamlengte (L)	(F.24) ⁴⁾
gemiddelde vlamlengte (opslag) (L)	(F.24) en (F.25)
virtuele oorsprong (z_0)	(F.27)
virtuele oorsprong (opslag) (z_0)	(F.33)

¹⁾ geldig voor $z > L$

²⁾ voorwaarde dicht boven vlammen: $L/D > 0,9$; ver van vlammen geen beperking aan L/D

³⁾ vergelijking (F.17) indien in vlamregio's massastromen volgens McCaffrey gebruikt worden (zie tabel 3.3)

⁴⁾ voorwaarde: $L/D > 1$

3.3.3 'Persistent flame'- en 'intermittent flame'-regio's

Voor de 'persistent flame'- en 'intermittent flame'-regio's zijn verschillende vergelijkingen voor de massastroom gegeven in bijlage F. Reden hiervoor is dat er voor de beschrijving van de massastroom in de vlamregio's weinig overeenstemming bestaat tussen de verschillende onderzoekers. Aangeraden wordt om berekeningen uit te voeren met verschillende vergelijkingen voor de massastroom in de vlamregio's en de rekenresultaten te vergelijken. Indien de rekenresultaten met verschillende pluimvergelijkingen grote verschillen vertonen moeten alle rekenresultaten als onbetrouwbaar beschouwd worden. De energiestroom in de vlamregio's is in het hoofdmodel eenvoudig te berekenen uit de massastroom en het brandvermogen (met dezelfde onzekerheid als de massastroom).

Tabel 3.3 geeft een overzicht van verschillende geadviseerde vergelijkingen voor de massastroom, geldig onder normale atmosferische omstandigheden ($T_\infty = 293 \text{ K}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $c_p = 1,00 \text{ kJ/kgK}$, $\rho_\infty = 1,2 \text{ kg/m}^3$).

Tabel 3.3: vergelijkingen voor pluimmodel in vlamregio's

parameter		'persistent flame'- regio vergelijking	'intermittent flame'-regio vergelijking
massastroom (\dot{m}_{ent})			
Heskestad	$D > 0,3 \text{ m}$	(F.42)	(F.42)
	$D < 0,3 \text{ m}$	(F.43)	(F.43)
McCaffrey		(F.44) ¹⁾	(F.45) ²⁾

$$^1) \text{ voorwaarde: } 0 < \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} < 0,08$$

$$^2) \text{ voorwaarde: } 0,08 < \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} < 0,20$$

3.3.4 Randvoorwaarden

De hierboven genoemde vergelijkingen voor verschillende parameters in de drie pluimregio's zijn geldig onder de volgende randvoorwaarden:

- de brand kan beschouwd worden als stationair of quasi-stationair;
- de rookpluim wordt niet beïnvloed door wanden;
- de rookpluim wordt niet beïnvloed door wind;
- in de brandruimte heerst geen (initiële) stratificatie.

Zie verder ook de specifieke voorwaarden bij diverse vergelijkingen van tabel 3.2 en 3.3.

3.3.5 Input

De volgende input is vereist:

- brandvermogen (\dot{Q});
- convectief gedeelte van het brandvermogen (\dot{Q}_c);
- hoogte van het interface (h_f);
- diameter van de brand (D);
- voor opslag: horizontale oppervlakte van de brand (A_f);

3.3.6 Output

De belangrijkste output van het pluimmodel is de massastroom (\dot{m}_{ent}) ter hoogte van het interface.

Deze parameter is nodig voor het berekenen van het transport van massa en energie van de koude zone naar de hete zone.

Hoofdstuk 4 Lokale modellen

4.1 Lokale convectie en straling

De temperatuur in de bovenste zone zoals deze wordt berekend in een twee-zone brandmodel kan worden beschouwd als de gemiddelde waarde van de temperatuur van de gassen in de bovenste laag. Terwijl het thermische effect van lokale opwarming een grotere invloed heeft voor constructieve elementen in de nabijheid van vlammen dan het temperatuurseffect van hete verbrandingsgassen. De consequentie hiervan is dat de gehele stabiliteit van de constructie wordt bedreigd wanneer een constructie element nabij een vuurhaard bezwijkt, er moet dus rekening worden gehouden met het effect van lokale opwarming.

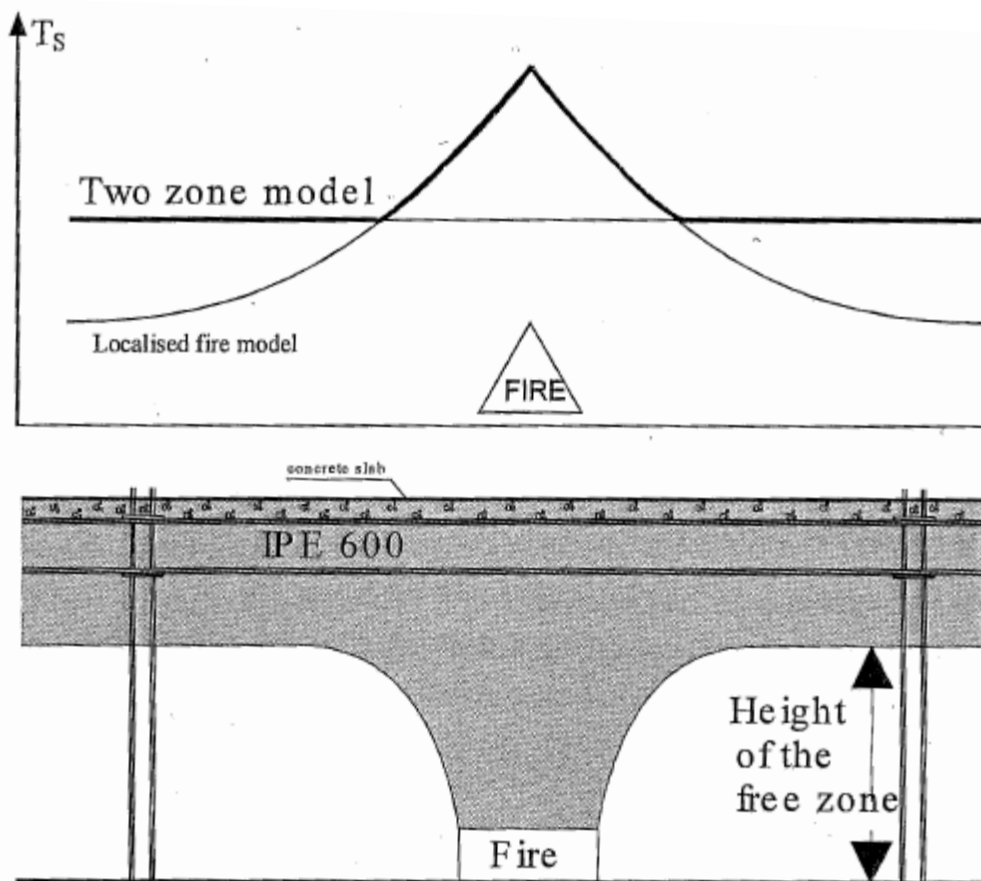
De correlatie formule voorgesteld door Alpert (1972) staat toe een maximum gas temperatuur te berekenen in de plafondluchtstroming welke wordt gevormd door een verticale vuurpluim beïnvloed door een horizontaal plafond en lateraal verspreide gassen. Maar toch zoals ook blijkt uit de titel van Alpert's publicatie was het doel van zijn werk het voorspellen van de reactietijd van detectors en niet het voorspellen van het (bezwijk)gedrag van de constructie. Hoewel de lokale gas temperatuur een goede indicator is voor de reactietijd van een detector is de temperatuur van de constructie, welke hier interessant is, niet alleen afhankelijk van de temperatuur van de langs de oppervlakte stromende gassen maar ook de radiatie van het vuur zelf. Wanneer de temperatuur van de constructie moet worden berekend is het aan te bevelen een model te gebruiken dat de directe warmtestroom op de oppervlakte berekend.

Hasemi heeft een voorstel gedaan voor een dergelijk empirisch model dat gebaseerd is op tests waarbij de directe stroom is gemeten (Hasemi et al., 1984 & 1995; Ptchelintsev et al., 1995 & Wakamatsu et al., 1996). Franssen et al. (1997 & 1998 en CCP 1997) heeft modificaties aangebracht op het originele model om de originele tests beter te benaderen. Franssen et al. (1998) heeft dit aangepaste model vergeleken met vier praktijktests en vond hierbij acceptabele resultaten.

Myllymäki & Kokkala (2000) deden nog eens 10 tests en vergeleken de resultaten met berekeningen met het verbeterde model en kwamen tot de conclusie dat het verbeterde model een veilige inschatting geeft voor de uitgevoerde tests.

De combinatie van het lokale (Hasemi) en het globale (2 zone-model) effect van brand op een constructie-element is weergegeven in figuur 4.1. Warmtetransport naar constructie-elementen nabij een brandhaard kan worden ingeschat met het Hasemi model, terwijl het effect van de ruimte wordt ingeschat met de temperatuur van de bovenste laag (hete zone). Dit model houdt echter geen rekening met de longitudinale warmtestroom in de stalen elementen.

De warmtestroom naar een element q'' wordt in het model van Hasemi uitgedrukt in de warmteafgifte van de brand, RHR , de diameter van de brand, D , en de relatieve positie van het stalen element en de brand, r . Het model van Hasemi is weergegeven in bijlage G.



Figuur 4.1 Combinatie van het lokale en het globale effect van vuur op een stalen element (bron: Cadorin, 2003)

In plaats van het model van Hasemi kunnen ook veldmodellen toegepast worden om de lokale thermische consequenties voor constructies vast te stellen.

4.2 Lokale opwarming van constructies

Wanneer de randvoorwaarden (thermische belasting ten gevolge van straling en convectie) bepaald zijn, kan de lokale opwarming van constructies berekend worden. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van thermodynamische veldmodellen.

Voor homogene constructiematerialen (zoals staal) kunnen ook eenvoudigere methoden worden toegepast, gebaseerd op de profielfactor (verhouding van aangewarmde oppervlakte en masa-inhoud van de constructie).

4.3 Thermische detectie

Binnen het fysisch brandmodel wordt het model voor automatische branddetectie toegepast voor het bepalen van de detectietijd van brand door detectoren. Dit kunnen verschillende typen detectoren zijn, die op verschillende eigenschappen van de brand reageren.

In verband met de opbouw van het hoofdmodel bestaat het model voor automatische branddetectie op dit moment uit een beschrijving van de detectie van brand door 'vaste temperatuur'-detectoren (fixed temperature detectors). Deze beschrijving wordt ook toegepast voor het bepalen van de activering van sprinklerkoppen in een sprinklerinstallatie. In een later stadium kan het model eventueel uitgebreid worden met een beschrijving van de detectie door andere typen detectoren (bijvoorbeeld rookmelders).

De volledige beschrijving van het submodel voor branddetectie is opgenomen in bijlage H. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de toe te passen vergelijkingen (door middel van verwijzingen naar de betreffende vergelijkingen in de bijlage), de randvoorwaarden voor toepassing van het submodel en de in- en outputparameters van het submodel.

4.3.1 Vergelijkingen

De beschrijving van de detectietijd door 'vaste temperatuur'-detectoren is gesplitst in een beschrijving van de detectietijd voor situaties met een stationaire brand, situaties met een quasi-stationaire brand en situaties met een kwadratisch in de tijd groeiende brand. Voor het fysisch brandmodel wordt standaard uit gegaan van een kwadratisch in de tijd groeiende brand. Voor andere branden kan onder voorwaarden gebruik gemaakt worden van de beschrijving voor stationaire of quasi-stationaire branden, zodat het voor veel situaties mogelijk is de detectietijd te berekenen.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de aanbevolen vergelijkingen.

Tabel 4.1: vergelijkingen voor beschrijving van automatische branddetectie met 'vaste temperatuur'-detectoren

Parameter	vergelijking(en)
<i>Stationaire branden</i>	
temperatuur van detector op tijdstip t (T_d)	(H.15)
temperatuur in ceiling jet ($T_{c,max}$)	(H.8a) en (H.8b) ¹⁾
snellheid in ceiling jet ($u_{c,max}$)	(H.9a) en (H.9b) ¹⁾
detectietijd (t_{det})	(H.16)
<i>quasi-stationaire branden</i> ²⁾	
temperatuur van detector aan het eind van interval $(i+1)$ ($T_{d,i+1}$)	(H.17)
temperatuur in ceiling jet ($T_{c,max}$)	(H.8a) en (H.8b) ³⁾
snellheid in ceiling jet ($u_{c,max}$)	(H.9a) en (H.9b) ³⁾
detectietijd (t_{det})	(H.18)
<i>kwadratisch groeiende branden</i>	
temperatuur van detector op tijdstip t (T_d)	(H.19) ⁴⁾
detectietijd (t_{det})	(H.16)

¹⁾ uitgaande van het brandvermogen op tijdstip t .

²⁾ voorwaarde: $\frac{\dot{Q}}{d\dot{Q}/dt} > t_f$

³⁾ uitgaande van het gemiddelde brandvermogen voor tijdinterval i .

⁴⁾ uitgaande van het convectieve gedeelte van het brandvermogen op tijdstip t .

4.3.2 Randvoorwaarden

De hierboven genoemde vergelijkingen zijn geldig onder de volgende randvoorwaarden (zie ook bijlage H §H.2.3.1):

- De detectoren bevinden zich in de warme rookstroom onder het plafond (ceiling jet).
- Het plafond van de brandruimte is geheel horizontaal en bevat geen obstakels.
- Het plafond van de brandruimte is onbrandbaar.
- In de brandruimte heerst geen stratificatie.
- De horizontale afstand van de rookpluim tot alle wanden van de ruimte bedraagt minimaal 1,8 maal de ruimtehoogte; indien deze afstand voor alle wanden kleiner dan 1,8 maal de ruimtehoogte is kunnen bovengenoemde vergelijkingen als veilige benadering toegepast worden; voor ruimtes met grote lengte/breedte-verhoudingen, waarbij de kortste zijde minder dan 1,8 maal de ruimtehoogte lang is en de andere zijde veel langer (bijvoorbeeld gangen), zijn de vergelijkingen toepasbaar tot het tijdstip dat het rookfront van de ceiling jet de dichtstbijzijnde wand bereikt.
- De rookstroming onder het plafond wordt niet beïnvloed door wind.

4.3.3 Input

De volgende input is vereist:

- activeringstemperatuur van de detector (T_r);
- respons time index van de detector (RTI);
- positie van de detector (r);
- verticale afstand tussen bovenzijde brandstof en plafond (H), eventueel voor veilige benadering te vervangen door de ruimtehoogte (h_c);
- brandvermogen (\dot{Q}) (voor vgl (H.8) en (H.9)), of convectief gedeelte van het brandvermogen (\dot{Q}_c) (voor vgl. (H.19));
- omgevingstemperatuur (T_∞); voor een veilige schatting van de detectietijd dient uit gegaan te worden van de laagst mogelijke omgevingstemperatuur;
- gravitatieconstante (g);
- soortelijke warmte van de lucht (c_p).

4.3.4 Output

Als output levert het detectiemodel de detectietijd van een specifieke 'vaste temperatuur'-detector berekend in een stationaire situatie, een quasi-stationaire situatie of een situatie met een zich kwadratisch in de tijd ontwikkelende brand

Hoofdstuk 5 Uitslaande vlammen vanuit gevelopeningen

Uitslaande vlammen kunnen optreden in geval van (bezweken) openingen in de scheidingsconstructies (begrenzingsen) na flash-over. Dit betekent dat er sprake is van één gemengde zone in de brandruimte met een ventilatiebeheerste brand (onvolledige verbranding). Wanneer daarbij het verbrandingsmodel 'external flaming' wordt gehanteerd komt een deel van het brandvermogen tot ontwikkeling buiten de brandruimte, namelijk in de uitslaande vlammen.

Wat hiervan de consequenties zijn voor de uitslaande vlammen kan worden bepaald op basis van het Model van Law, dat is opgenomen als bijlage B in NEN-EN 1991-1-2. Deze bijlage is bijgevoegd in bijlage I. Daarnaast is ook de rekenmethode voor de configuratiefactoren toegevoegd in bijlage J. In notitie Nu040430aaA1.lwi van 12 april 2006 is een voorstel gedaan om dit submodel beter te laten aansluiten op het fysisch brandmodel, zodanig dat het gesommeerde interne en externe brandvermogen niet groter is dan het maximale brandstofbeheerste brandvermogen dat in de brandruimte tot ontwikkeling kan komen. Deze notitie is in bijlage K toegevoegd.

Te overwegen valt nog om het model beter af te stemmen op NEN 6068. Zinvolle aanvullingen/aanpassingen zijn in dit verband toevoeging van het neutrale vlak en de effectieve diepte. Vooralsnog is deze aanpassing niet doorgevoerd. Er wordt dan afgeweken van een empirisch model, validatie van de aanpassing is niet goed mogelijk.

Literatuurlijst

- Alpert, R.L. (1972), Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors, *Fire Technology*, 8, pp. 181-195.
- Alpert, R.L. (2002), Ceiling Jet Flows, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 2-18 – 2-31.
- Beyler, C.L. (1986), Fire Plumes and Ceiling Jets, *Fire Safety Journal*, 11, pp. 53-75.
- Cadorin, J.-F. (2003), *Compartment Fire Models for Structural Engineering*, Liège: Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.
- Cadorin, J.-F., D. Pintea en J.M. Franssen (2001), *The Design Fire Tool OZone V2.0 – Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests*, Liège: Université de Liège, département M&S.
- Cetegen, B.M., E.E. Zukoski en T. Kubota (1984), Entrainment in the Near and Far Field of Fire Plumes, *Combustion Science and Technology*, 39, pp. 305-331.
- Cooper, L.Y. (1995), Combined Buoyancy- and Pressure-Driven Flow Through a Horizontal, Circular Vent, *Journal of Heat Transfer*, 117, pp. 659-667.
- Cooper, L.Y. (1996), Calculating Combined Buoyancy- and Pressure-Driven Flow Through a Shallow, Horizontal, Circular Vent : Application to a Problem of Steady Burning in a Ceiling-vented Enclosure, *Fire Safety Journal*, 27, pp. 23-35.
- Cooper, L.Y. (1997), VENTCF2 : an Algorithm and Associated FORTRAN 77 Subroutine for Calculating Flow through a Horizontal Ceiling/Floor Vent in a Zone-type Compartment Fire Model, *Fire Safety Journal*, 28, pp. 253-287.
- Cooper, L.Y. (2002), Smoke and Heat Venting, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-219 – 3-242.
- Drysdale, D (2002), *An Introduction to Fire Dynamics*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Emmons, H.W. (2002), Vent Flows, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 2-32 – 2-41.
- Fleming, R.P. (2002), Automatic Sprinkler System Calculations, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 4-72 – 4-87.
- Fontana, M., et al. (1998), *Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concept – Part 4: Statistics*, Zürich: ETH-Zürich.
- Harteloh, H., J.J.N.M. Hogeling en C. Meeuwissen (2000), *Jellema Hogere Bouwkunde 6A – Elektrotechnische en sanitaire installaties - Bouwtechniek*, Utrecht: ThiemeMeulenhoff.
- Heskestad, G. (1983), Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames, *Fire Safety Journal*, 5, pp. 103-108.
- Heskestad, G. en M.A. Delichatsios (1989), Update: The Initial Convective Flow in Fire, *Fire Safety Journal*, 15, pp. 471-475.
- Heskestad, G. en T. Hamada (1993), Ceiling Jets of Strong Fire Plumes, *Fire Safety Journal*, 21, pp. 69-82.

Heskestad, G. (2002), Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 2-1 – 2-17.

Hinkley, P.L. (1986), Rates of 'Production' of Hot Gases in Roof Venting Experiments, *Fire Safety Journal*, 10, pp. 57-65.

ISO/DIS 16734 (2005) Draft international standard, *Fire Safety engineering – Requirements governing algebraic formulas – Fire plumes*, Geneva: ISO copyright office.

Jones, W.W., et al. (2005), *CFast – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) (Special Publication 1026)*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Madrzykowski, D. en R.L. Vettori (1992), *A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System (NISTIR 4833)*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

McCaffrey, B.J. (1983), Momentum Implications for Buoyant Diffusion Flames, *Combustion and Flame*, 52, pp. 149-167.

NEN 6068:2004 inclusief wijzigingsbladen A1:2005 en A2:2005, *Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

NEN 6093:1995 inclusief wijzigingsblad A1:2004, *Brandveiligheid van gebouwen - Beoordelingsmethode van rook- en warmteafvoerinstallaties*, Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

NIST GCR 05-875 (2004), *Research Investigation for Determination of Residential Sprinkler Performance*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Oerle, N.J. van, E.W. Janse, P.H.E. van de Leur (1996a), *Richtlijn vultijdenmodel grote brandcompartimenten (TNO-rapport 96-CVB-R0330(1))*, Delft: TNO-Bouw.

Oerle, N.J. van, E.W. Janse, P.H.E. van de Leur (1996b), *Achtergronden vultijdenmodel grote brandcompartimenten (TNO-rapport 96-CVB-R0330(2))*, Delft: TNO-Bouw.

Rohr, K.D. en J.R. Hall, Jr. (2005), *U.S. Experience with Sprinklers and Other Fire Extinguishing Equipment*, Quincy: National Fire Protection Association.

SAVE (2001), *De bijdrage van Sprinklers binnen "Beheersbaarheid van Brand"*, Apeldoorn: Ingenieurs/adviesbureau SAVE.

Schifilliti, R.P., et al. (2002), Design of Detection Systems, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 4-1 – 4-43.

Thomas, P.H. (1995), The Growth of Fire – Ignition to Full Involvement, in: Cox, G. (ed), *Combustion Fundamentals of Fire*, London: Academic Press Limited, pp. 273-328.

Walton, W.D. (2002), Zone Computer Fire Models for Enclosures, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-189 – 3-193.

Zukoski, E.E. (1995), Properties of Fire Plumes, in: Cox, G. (ed), *Combustion Fundamentals of Fire*, London: Academic Press Limited, pp. 101-219.

Websites

http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_detector

<http://www.nedcc.org/plam3/leaf32.htm>

