

Fysisch brandmodel

Achtergronden:
Normalisatie fysische brandmodel
Basismodel

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	Wu040430aaA1.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
Basismodel

Projectnummers

Nieman u040430aa
NEN Bouw

Datum

juni 2007

Versie

Definitief

Uitgevoerd door

Adviesburo Nieman B.V.
Vestiging Zwolle

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

Het rapport omvat:

47 pagina's

Inhoudsopgave

	Pagina	
Begrippen en definitities	7	
Symbolen	11	
Hoofdstuk 1	Inleiding	15
Hoofdstuk 2	Opzet en afbakening	17
2.1	Algemeen	17
2.2	Basismodel	18
2.3	Model-input	19
2.4	Model-output	19
Hoofdstuk 3	Model-input	21
3.1	Inleiding	21
3.2	Ruimtekaracteristieken	21
3.3	Brandkaracteristieken	22
Hoofdstuk 4	Basismodel	27
4.1	Inleiding	27
4.2	Zone-modellen	28
4.3	Samenhang met submodellen	30
Hoofdstuk 5	Model-output	31
5.1	Het berekende brandvermogensscenario	31
5.2	Thermische consequenties	31
Literatuur		33
Bijlage A	Zonemodellen	

Begrippen en definities

Equivalente 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 thermo-dynamische 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.

Symbolen

Latijnse hoofdletters

A	oppervlakte van het brandcompartiment [m^2]
A_f	vloeroppervlakte van een brandcompartiment [m^2]
A_t	totale oppervlakte van de omhulling (wanden, plafond en vloer, met inbegrip van openingen) [m^2]
A_v	totale oppervlakte van verticale openingen in alle wanden ($A_v = \sum A_{v,i}$) [m^2]
E	energie [J]
E_g	inwendige energie van gas [J]
H_u	netto calorische waarde (verbrandingswaarde) met inbegrip van vochtigheid [MJ]
H_{ui}	netto calorische waarde (verbrandingswaarde) van materiaal i [MJ]
L	dikte van een materiaal [m]
P_{int}	interne druk [Pa]
\dot{Q}	brandvermogen [W]
\dot{Q}_c	convectieve deel van het brandvermogen \dot{Q} [W]
\dot{Q}_e	vermogen ten gevolge van luchtinmenging (pluim) vanuit de koude zone [W]
\dot{Q}_{in}	inkomend brandvermogen door een gasstroom via openingen [W]
$\dot{Q}_{nett,loss}$	netto warmtetransportstroom naar de ruimtebegrenzing [W]
\dot{Q}_{out}	uitgaand brandvermogen door een gasstroom via openingen [W]
\dot{Q}_r	stralingsdeel van het brandvermogen \dot{Q} [W]
\dot{Q}_{rad}	uitgaand brandvermogen door straling via openingen [W]
$\dot{Q}_{wall} ; \dot{Q}_p$	brandvermogen dat door straling en convectie wordt afgegeven aan de begrenzings van het compartiment (wanden, vloer en plafond) [W]
R	ideale gasconstante (= 287 J/kgK)
S_i	dikte van laag i [m]
S_{lim}	diktelimiet [m]

T	temperatuur [K]
V	volume [m ³]
Y	massafractie van deeltje i [-]

Latijnse kleine letters

b	thermische traagheid van de totale omhulling ($b = \sqrt{\rho c \lambda}$) [J/s ^{1/2} m ² K]
c_p	soortelijke warmte bij gelijkblijvende druk (warmtecapaciteit) [J/kgK]
c_v	soortelijke warmte bij gelijkblijvend volume (warmtecapaciteit) [J/kgK]
h_i	hoogte van raam i [m]
m	massa [kg]; verbrandingsfactor [-]
\dot{m}	massastroom [kg/s]
\dot{m}_{in}	gasmassastroom die door openingen naar binnen komt [kg/s]
\dot{m}_{mat}	afbrandsnelheid [kg/s]
\dot{m}_{out}	gasmassastroom die door openingen naar buiten gaat [kg/s]
\dot{m}_e	ingemengde luchtmassastroom in een pluim [kg/s]
\dot{m}_{fi}	pyrolysemassastroom [kg/s]
\dot{q}_f	referentievermogensdichtheid per m ² gebruiksoppervlak [W/m ²]
q_f	vuurbelasting gerelateerd aan vloeroppervlakte A_f [MJ/m ²]
r	stoichiometrische brandstof/zuurstofverhouding (m/) [-]
t	tijd [s]
t_a	tijdconstante [s/m]
z_i	hoogte van een zone (laag) [m]
z_s	hoogte van de interface tussen twee zones [m]

Griekse hoofdletters

Ψ_i	beschermingsfactor van de vuurlast [-]
----------	--

Griekse kleine letters

α	thermische diffusiteit [m^2/s]
γ	soortelijke warmteverhouding [-]
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK]
ρ	dichtheid [kg/m^3]
$\dot{\omega}_i$	massaproductiestroom van deeltjes, product i [kg/s]
$\dot{\omega}_F$	pyrolysemassastroom van brandstof die wordt verbrand [kg/s]

Subscripts, algemeen

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

Hoofdstuk 1 Inleiding

In de regelgeving worden eisen gesteld aan de brandwerendheid van constructies en de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (WBDBO) tussen de brandruimte en andere ruimten die buiten het brandcompartiment zijn gelegen. De bepalingsmethoden bij deze eisen zijn gebaseerd op de standaard brandkromme of de gereduceerde standaard brandkromme. Deze krommen beschrijven het temperatuurverloop in de brandruimte op een vaste, arbitraire wijze, zie figuur 1.1.

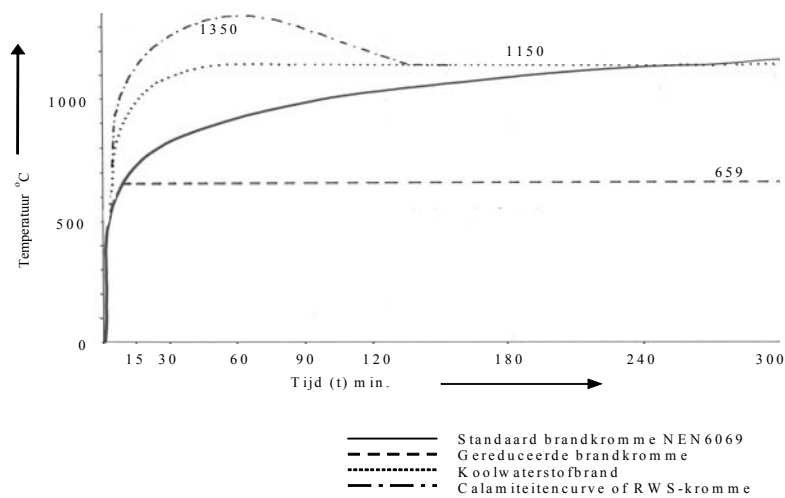


Fig. 1.1: nominale brandkrommen (temperatuur-tijd krommen)

Het werkelijke temperatuurverloop is echter een afgeleide van het brandvermogen (of de afbrandsnelheid) dat in de brandruimte tot ontwikkeling komt. Een brandvermogenskromme, die enerzijds wordt bepaald door de eigenschappen van de aanwezige brandstof en anderzijds door de mate van luchttoevoer tot de brandhaard en het brandcompartiment, geeft dus een meer realistisch brandscenario weer, zie figuur 2.

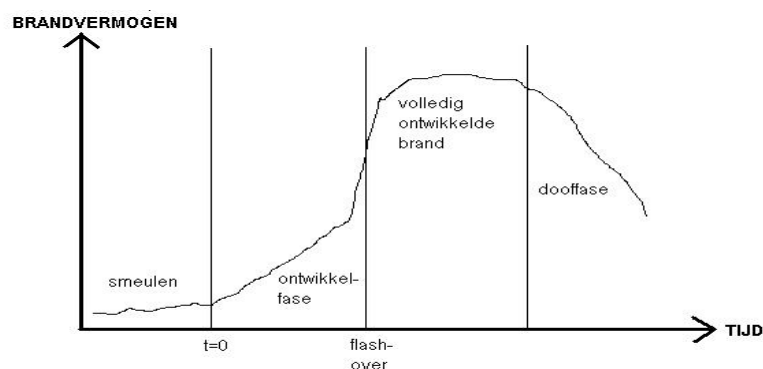


Fig.1.2: Mogelijk brandvermogensscenario

Het vermogensscenario volgens figuur 1.2 hangt dus niet alleen meer af van de gebruiksfunctie, maar ook van de geometrie van de brandruimte, de grootte van de openingen in de scheidingsconstructies, de materialisering en de in-

richting en inventaris. Hoewel dit strijdig lijkt met het uitgangspunt van het Bouwbesluit (hierin zijn alleen bouwtechnische eisen voor de verschillende gebruiksfuncties opgenomen, geen rekening houdend met inrichting en gebruik ervan), biedt artikel 1.5 van het Bouwbesluit de mogelijkheid om een meer realistische en geavanceerde benadering te volgen. Deze meer realistische benadering wordt overigens ook expliciet toegestaan in Eurocode 1 (NEN-EN-1991-1-2). Door een meer realistische benadering ontstaat een betere afstemming van de brandbeveiligingsvoorzieningen op het bouwwerk (gebouw) en het specifieke gebruik ervan. Dit kan in bepaalde gevallen tot een ander voorzieningenniveau leiden, dan rechtstreeks uit de prestatie-eisen van het Bouwbesluit zou volgen.

Hierdoor is er behoefte ontstaan aan een genormeerde aanpak voor het bepalen van een realistisch brandvermogensscenario en de thermische parameters die hieruit volgen. Deze parameters kunnen vervolgens als randvoorwaarden voor respons-modellen worden gebruikt.

Fasering onderzoek

Het onderzoek wordt in twee fasen gesplitst. Het model voor de bepaling van de thermische parameters, waarmee de warmtebelasting op mens en constructie kan worden bepaald, wordt in de eerste fase van het onderzoek opgesteld (thermische actoren). In de tweede fase van het onderzoek worden de binnenmilieu-parameters die voor de mens van belang zijn daaraan toegevoegd (binnenmilieu-actoren). Uit oogpunt van vluchtveiligheid gaat het hier om de rookdichtheid en de zichtlengte.

Leeswijzer

Dit rapport (Wu040430aaA1.rhe) bevat het basismodel van de eerste fase van het onderzoek. Om vervolgens de thermische actoren voor mens en constructie goed te kunnen bepalen zijn submodellen nodig, die op dit basismodel moeten aansluiten. De toepasbare submodellen zijn opgenomen in rapport Wu040430aaA2.rhe.

Tenslotte zijn de statistische gegevens en de probabilistische aspecten opgenomen in rapport Wu040430aaA3.rhe. Dit betreft gegevens ten aanzien van vuurlast/vuurbelasting, vermogensdichtheden en tijdconstanten en risicofactoren ten aanzien van activering van brand en brandveiligheidsvoorzieningen.

Hoofdstuk 2 Opzet en afbakening

2.1 Algemeen

De klassering van brandmodellen is in de onderstaande figuur weergegeven. Uitgangspunt voor het fysisch brandmodel is een natuurlijke brand. Omdat het brandvermogen niet stationair is, is een geavanceerd brandmodel noodzakelijk.

Brandmodellen		
Nominale temp-tijd krommen (conventioneel)	Standaard brandkromme	
	Externe brandkromme	
	Koolwaterstof brandkromme	
Natuurlijke branden (prestatiegericht)	Eenvoudige brandmodellen	Compartiment-branden
		Plaatselijke branden
	Geavanceerde brandmodellen	Zonemodellen
		Veldmodellen (CFD)

Fig 2.1: Klassering van brandmodellen, van nominale temperatuur-tijd-krommen tot meer geavanceerde brandvermogensscenario's op basis van natuurlijk branden.

Het fysisch brandmodel wordt gebaseerd op zonemodellen. Dit zijn modellen waarin de brandruimte homogeen gemengd (1 zone) of gestratificeerd (2 zones) wordt verondersteld. Daarmee kunnen tevens de randcondities en uitgangspunten worden gegenereerd voor veldmodellen, die aansluiten op het natuurlijk brandconcept dat met zonemodellen wordt beschreven.

Met de in de zonemodellen bepaalde thermische parameters (actoren) kan de respons van mens en constructie worden bepaald. Hiervoor bestaan responsmodellen die als volgt kunnen worden geklasseerd:

- Thermodynamische modellen (thermische respons)
- Hydrodynamische modellen of CFD-modellen (hydraulische respons)
- Dynamische mechanica- of constructiemodellen (mechanische respons)
- Geavanceerde verbrandingsmodellen (chemische respons)

De bovenbeschreven respons-modellen zijn in het algemeen veldmodellen en maken geen onderdeel uit van het fysisch brandmodel. Alleen die onderdelen van de respons-modellen die interactie bezitten met het fysisch brandmodel (wisselwerking vertonen) worden in het fysisch brandmodel opgenomen. Het betreft met name:

- Lokale opmenging van verbrandingslucht met de ruimtelucht boven de brandhaard (in de pluim)
- Convectieve warmteafvoer en verbrandingsluchttoevoer via openingen
- Afkoeling van de brandruimte door convectie en straling naar aangrenzende constructies

2.2 Basismodel

Zoals in hoofdstuk 1 is aangegeven is het brandvermogen niet stationair. In het algemeen onderscheidt men een ontwikkelfase van de brand, waarna een min of meer stationaire situatie ontstaat nadat de brand het maximale uitbreidingsgebied bereikt heeft. Wanneer de aanwezige vuurlast opgebrand raakt wordt de dooffase van de brand bereikt.

In het geval van een ontwikkelende brand wordt een hete zone bovenin die brandruimte opgebouwd. Dit leidt tot een 2-zone model, waarbij de hete zone wordt gevoed door een convectieve pluim vanaf de brandhaard, die zich in de koude zone bevindt. Er is dus voldoende luchttoevoer mogelijk tot de brandhaard. Het brandvermogen wordt in dit geval geheel door de eigenschappen van de brandstof bepaald en heet dan ook brandstofbeheerst.

In de stationaire situatie is doorgaans een opgemengde situatie aanwezig (1-zone model). De brandhaard bevindt zich in deze gemengde zone. Het brandvermogen wordt daarbij in de regel bepaald door de mate van luchttoevoer tot de brandruimte. De brand heet dan ventilatiebeheerst.

Ook tijdens de dooffase blijft de opgemengde zone in stand. Het brandvermogen neemt geleidelijk af omdat de hoeveelheid brandbaar materiaal in de brandruimte op raakt.

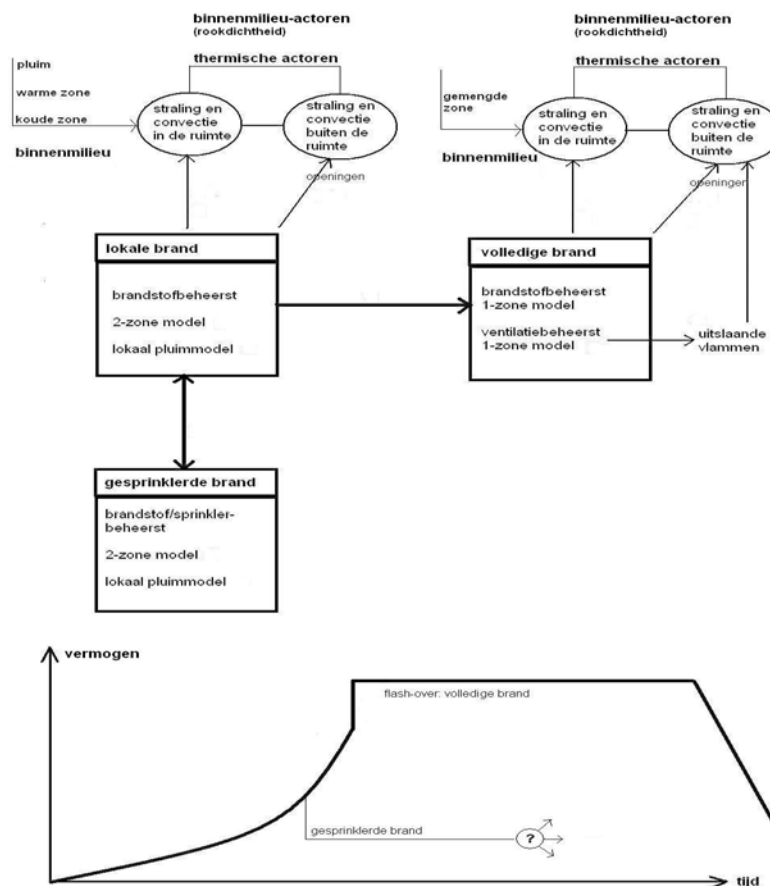


Fig. 2.2: De relatie tussen de fysische actoren en het basismodel

2.3 Model-input

De bepalingmethode houdt rekening met de geometrie, de materialisering van de scheidingsconstructie en de openingen van de brandruimte. De brandparameters (vuurbelasting/vuurlast, referentie vermogensdichtheid, tijdconstante en zuurstofbehoefte) vormen de belangrijkste randvoorwaarden. In hoofdstuk 3 wordt kort nader ingegaan op de in rekening te brengen ruimtekarakteristieken en de (thermische) brandparameters.

De overgangsvoorwaarden tussen een 2-zone en een 1-zone model zijn eveneens van belang (zie hoofdstuk 4).

Voor de binnenmilieu-actoren is daarnaast het rookpotentieel van de brandstof als parameter van belang.

In principe zijn de brandparameters brandstof-afhankelijk. Om aansluiting op de publiekrechtelijke regelgeving te verkrijgen wordt deze brandstof-afhankelijkheid vertaald naar gebruiksfunctie-afhankelijkheid, met de mogelijkheid tot verdere differentiatie (zie rapport Wu040430aaA3.rhe).

2.4 Model-output

Als model-output worden de volgende grootheden verlangd, die in geavanceerde responsmodellen (veldmodellen) als randvoorwaarden dienst kunnen doen (zie hoofdstuk 5):

- Het berekende brandvermogensscenario
- Thermische actoren in de brandruimte:
 - Stralingsbelasting en convectieve belasting ten gevolge van de pluim (brandhaard)
 - Stralingsbelasting en convectieve belasting ten gevolge van de warme zone (2-zone model) of de gemengde zone (1-zone model)
 - Activeringstijden van thermische detectoren (brandmelders, sprinklerkoppen e.d.)
- Binnenmilieu-actoren in de brandruimte:
 - Rookdichtheid en zichtlengte in het rookverspreidingsgebied (warme zone of de gemengde zone)
 - Activeringstijden van optische detectoren (rookmelders)
- Thermische actoren buiten de brandruimte:
 - Stralingsbelasting en convectieve belasting vanuit de brandruimte via openingen in de scheidingsconstructies
 - Stralingsbelasting en convectieve belasting ten gevolge van vlammen vanuit openingen in de scheidingsconstructies

Vooralsnog blijven de binnenmilieu-actoren in het fysisch brandmodel buiten beschouwing. Het is echter relatief eenvoudig om het model hiermee uit te breiden.

Hoofdstuk 3 Model-input

3.1 Inleiding

In het fysisch brandmodel wordt het (constructieve) brandveiligheidontwerp gebaseerd op een thermische belasting die op fysische gronden is vastgesteld. Dit betekent dat – anders dan bij de conventionele benadering, uitgaande van de standaard brandparameters zoals aard en hoeveelheid van de brandbare materialen, de afbrandsnelheid en de ventilatiecondities een belangrijke rol spelen. Daarnaast is de specificatie van een zinvol en realistisch brandscenario van het grootste belang. Met nadruk wordt gesteld dat met name de aannamen m.b.t. het scenario een cruciale invloed kunnen hebben op de uitkomst van de berekeningen en daarmee op het uiteindelijke ontwerp.

Het aantal mogelijke brandscenario's is in het algemeen zeer groot. Daarom moet een selectie gemaakt worden. Hierbij wordt het principe gehanteerd van "credible worst case", d.w.z. dat de meest kritische realistische situatie geanalyseerd wordt. Hierbij wordt ook de kans dat zo'n situatie zal optreden meegewogen. Indien de ontwerp-brandsenario's zijn vastgelegd, kan de thermische belasting.

3.2 Ruimtekaracteristieken

3.2.1 Begrenzungen van de brandruimte

In het fysisch brandmodel wordt de brandontwikkeling in de brandruimte beschreven. Verondersteld wordt dat de brand tot deze ruimte beperkt blijft. Of dat ook inderdaad het geval is, hangt af van het brandgedrag van de constructiedelen die de brandruimte omhullen (vloeren en wanden, inclusief deuren, enz.). Inzicht in het vermogen van deze constructiedelen om als brandscheiding te fungeren is daarom noodzakelijk.

De volgende methoden staan ter beschikking:

- Ad-hoc proeven:
De scheidingsconstructie (wand, vloer, deur, enz.) wordt blootgesteld aan een temperatuur-tijd-kromme zoals berekend voor het maatgevende brandscenario.
- Deskundig oordeel:
Bij deze benadering wordt gebruik gemaakt van resultaten van standaard brandwerendheidsproeven.
- Directe toepassingen van het ISO/EN/NEN classificatiesysteem op basis van de standaard brandkromme. In de nationale regelgeving worden aan scheidingsconstructies eisen gesteld inzake de brandwerendheid m.b.t. de scheidende functie, e.e.a. afhankelijk van het gebruik en de geometrie van het gebouw.

De eerste twee opties kunnen worden ingezet voor een beperkt aantal situaties en zullen in het algemeen leiden tot hoge kosten. In de praktijk zal men daarom veelal zijn aangewezen op de derde optie.

3.2.2 De thermische eigenschappen van de ruimtebegrenzing

De thermische eigenschappen van de ruimtebegrenzing hebben een belangrijke invloed op het verloop van de temperatuur in de brandruimte. Warmtetransport vanuit de brandruimte naar de omhullende constructies treedt op onder invloed van convectie en straling. Voor het bepalen van dit warmtetransport is het van belang te weten of de scheidingsconstructies thermisch dik of thermisch dun zijn en of de constructies geïsoleerd zijn.

Wanneer een ruimtebegrenzing thermisch dik is kan deze warmte goed accumuleren en warmt de begrenzing relatief traag op. Als de temperatuur in de ruimte stijgt wordt warmte opgenomen in de constructie; als de ruimte afkoelt wordt weer warmte afgegeven. Een thermisch dunne constructie heeft nauwelijks capaciteit om warmte op te nemen. Wanneer een thermisch dunne constructie echter ongeïsoleerd is, zal warmte door de constructie naar de omgeving stromen.

In rapport Wu040430aaA2.rhe (paragraaf 2.3) wordt ingegaan op de beschrijving van de thermische eigenschappen van de ruimtebegrenzing.

3.2.3 Openingskarakteristieken

Openingen in de omhullende constructie van een brandruimte kunnen bestaan uit raam-, deur- en ventilatieopeningen. Deze openingen kunnen grote invloed op het brandvermogen hebben. Door de openingen kunnen verbrandingsgasen uitstromen en kan verse lucht toegevoerd worden.

Van belang voor het model zijn de afmetingen en posities van alle openingen. Tevens dient opgegeven te worden of openingen altijd aanwezig zijn of mogelijk temperatuur- of tijdafhankelijk zijn.

In rapport Wu040430aaA2.rhe (paragraaf 2.1) wordt ingegaan op de beschrijving van het convectieve massa- en warmtetransport via openingen.

3.2.4 Mechanische ventilatie

Ook door mechanische brandventilatie kan convectief massa- en warmtetransport optreden. Daarbij moet worden gedacht aan mechanische rook- en warmteafvoersystemen (RWA), maar ook aan overdruksystemen (met name voor de bescherming van trappenhuizen) en onderdruksystemen.

Anders dan bij openingen in de omhullende constructie van de brandruimte, waardoor volume- en massastromen op basis van een drukverschil tot stand komen, kan mechanische ventilatie worden gezien als opgelegde volume- en massastromen.

3.3 Brandkarakteristieken

Het bepalen van de brandkarakteristiek van een ruimte of een gebouw komt erop neer dat de in de tijd vrijkomende energie ten gevolge van de brandhaard moet worden bepaald. Het is mogelijk deze energie vast te stellen met behulp van een realistische brandproef. Dit is een zeer kostbare benadering, waarmee bovendien slechts informatie wordt verkregen over één van de vele mo-

gelijke branden die in een gebouw kunnen worden verwacht. Veel praktischer is het informatie van brandproeven te combineren met beschikbare fysische modellen op een zodanige wijze dat voor verschillende situaties het brandverloop op eenvoudige en snelle wijze kan worden vastgelegd.

3.3.1 Vuurbelasting

Een belangrijke parameter in het brandscenario is de vuurbelasting. De vuurbelasting geeft de totale hoeveelheid energie die bij brand in een ruimte vrij kan komen. Een deel van deze energie wordt opgenomen in het gebouw zelf en zal leiden tot temperatuurstijging van de gassen in de brandruimte en van de constructieonderdelen (wanden, vloeren enz.). De rest van deze energie zal zich, met name via de openingen, buiten de brandruimte verspreiden. Zowel onderdelen van het gebouw (bijvoorbeeld bekleding van wanden en plafonds) als de inhoud van het gebouw (bijvoorbeeld meubels) leveren een bijdrage tot de vuurbelasting.

De vuurbelasting die voor het betreffende ontwerp in rekening gebracht moet worden moet via een deterministische benadering of een statistische benadering vastgesteld worden. Bij de deterministische benadering wordt voor het specifieke gebouw een exacte berekening van de aanwezige vuurbelasting gemaakt. Wanneer de statistische methode toegepast wordt, wordt gebruik gemaakt van in databases aanwezige karakteristieke gegevens (gemiddelde waarde, verhoogd met een standaardafwijking) voor het betreffende gebouwtype.

In rapport Wu040430aaA3.rhe (paragraaf 1.1) wordt ingegaan op de bepaling van de vuurbelasting.

3.3.2 Aard van de brand

Een andere vraag die zich voordoet is welk deel van de totale vuurbelasting aan de verbranding zal deelnemen en hoe hierdoor het temperatuurverloop tijdens brand zal worden beïnvloed.

Met uitzondering van explosies of meerdere tegelijkertijd opzettelijk aangestoken branden (die buiten het bestek van dit model vallen), zullen branden plaatselijk ontstaan en – afhankelijk van zekere voorwaarden – kunnen uitgroeien tot “volledig ontwikkelde branden”. Belangrijke verschillen tussen “plaatselijke” en “volledig ontwikkelde” branden zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 3.1: Onderscheid tussen een plaatselijke en een volledig ontwikkelde brand.

	Brandhaard	Brandtemperatuur
Plaatselijke brand	De brand beperkt zich tot een deel van de ruimte	Twee temperatuurzones: Hete zone bovenin de ruimte, Koude zone onderin de ruimte
Volledig ontwikkelde brand (compartimentsbrand)	De brand woedt in de gehele ruimte (over de totale gebruiksoppervlakte)	Eén temperatuurzone: Gemengde zone in de gehele ruimte

In situaties waarin sprake is van een volledig ontwikkelde brand, wordt de temperatuur in de brandruimte gelijkmatig verdeeld verondersteld. Onder deze omstandigheden nemen alle in de ruimte aanwezige brandbare materialen

deel aan het brandproces en zullen verbrandingsproducten en lucht zo goed gemengd worden, dat deze aanname gerechtvaardigd is.

De consequentie van tabel 3.1 is dat bij een volledig ontwikkelde brand met een één-zone model kan worden volstaan, waarbij de brandhaard zich in de (gemengde) zone bevindt. Dit houdt in dat tot de brandhaard een mengsel van lucht en verbrandingsgassen wordt toegevoerd.

Bij een plaatselijke brand moet in beginsel een twee-zone model worden toegepast, vanwege de stratificatie die optreedt tussen de hete verbrandingsgassen en de omgevingslucht in de ruimte. De brandhaard bevindt zich in het algemeen in de koude zone. Er wordt dan relatief schone lucht tot de brandhaard toegevoerd. De verbrandingsgassen stromen vanaf de brandhaard via een pluim de warme zone in.

In het basismodel worden zowel het één-zone model als het twee-zone model opgenomen.

3.3.3 Brandstofbeheerste en ventilatiebeheerste branden

Door de aanwezige vuurlast wordt de totale hoeveelheid voor het brandproces beschikbare energie vastgelegd. Echter, een hoeveelheid brandbaar materiaal die snel verbrandt, zal tot een volstrekt ander temperatuurverloop leiden dan een zelfde hoeveelheid materiaal die onder smeulende omstandigheden verbrandt.

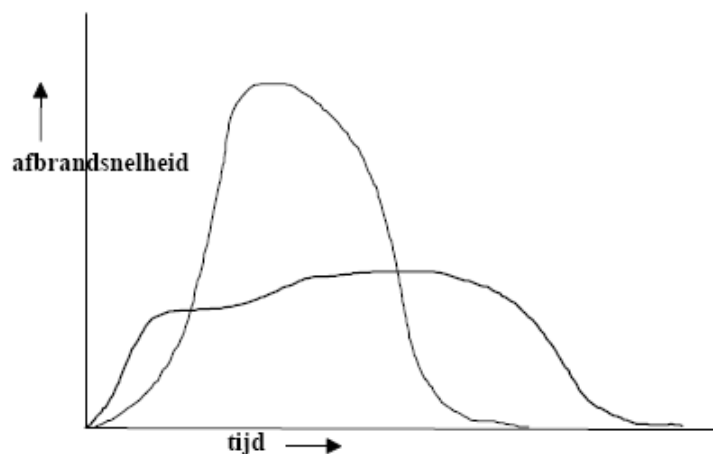


Fig. 3.1: Verschillende krommen voor de afbrandsnelheid bij eenzelfde vuurlast.

De tijdens brand vrijkomende energie veroorzaakt de temperatuurstijging in de brandruimte en is de drijvende kracht achter de verspreiding van hete gassen en rook. In het algemeen zal een brand klein beginnen en een zekere groeifase ondergaan.

Afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare zuurstof, kunnen twee situaties worden onderscheiden:

- de brand bereikt zijn maximale uitbreiding, zonder dat de hoeveelheid zuurstof daarbij een beperkende factor is; gesproken wordt van een **brandstof-beheerste** brand.

- De brand bereikt zijn maximale uitbreiding, maar de afmetingen van de openingen van de brandruimte zijn daarbij van dien aard, dat de hoeveelheid zuurstof de beperkende factor is voor de afbrandsnelheid; gesproken wordt van een **ventilatie-beheerste** brand.

Zowel tijdens een brandstof-beheerste als tijdens een ventilatie-beheerste brand kan vlamoverslag (flash-over) in de brandruimte optreden.

Het verschijnsel vlamoverslag markeert de overgang tussen een plaatselijke en een volledig ontwikkelde brand. Een illustratie van de twee regimes is gegeven in de onderstaande figuur, waarin de afbrandsnelheid is weergegeven als functie van de openingsfactor O . De verschillende curven geven het verband tussen afbrandsnelheid en ventilatie voor verschillende waarden van de vuurbelasting. Bij toenemende ventilatie zal, onder ventilatie-beheerste omstandigheden, ook de afbrandsnelheid toenemen, totdat een waarde bereikt wordt die onder meer door de vuurbelasting wordt bepaald. Bij verdere toename van de ventilatie zal de afbrandsnelheid bij benadering constant blijven (brandstof-beheerste omstandigheden).

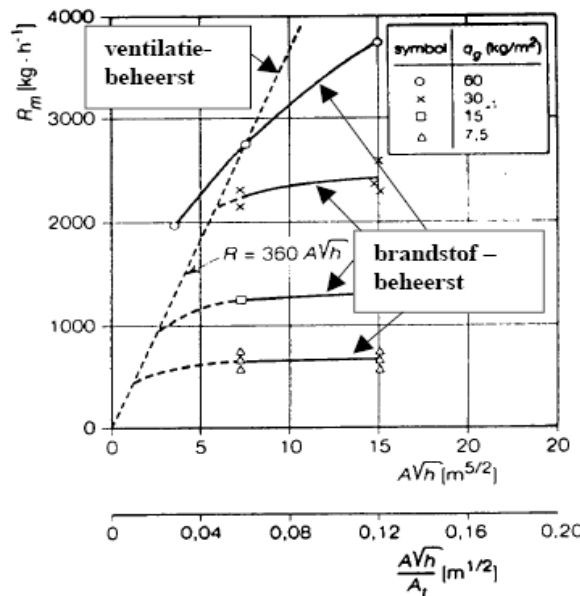


Fig. 3.2: Afbrandsnelheid voor verschillende waarden van de vuurbelasting in kg vurenhout/m² vloeroppervlakte, als functie van de ventilatie (openingsfactor).

3.3.4 branduitbreidingsnelheid en vermogensdichtheid

Het brandscenario wordt in de groeifase bepaald door de branduitbreidingsnelheid en de vermogensdichtheid. Deze worden over het algemeen beide op basis van statistische gegevens vastgesteld (zie Wu040430aaA3.rhe, paragraaf 1.2 en 1.3).

Na de groeifase bereikt de afbrandsnelheid een maximaal niveau met een waarde die correspondeert met hetzij ventilatie-beheerste, hetzij brandstof-beheerste condities. Dit is in figuur 3.3 weergegeven.

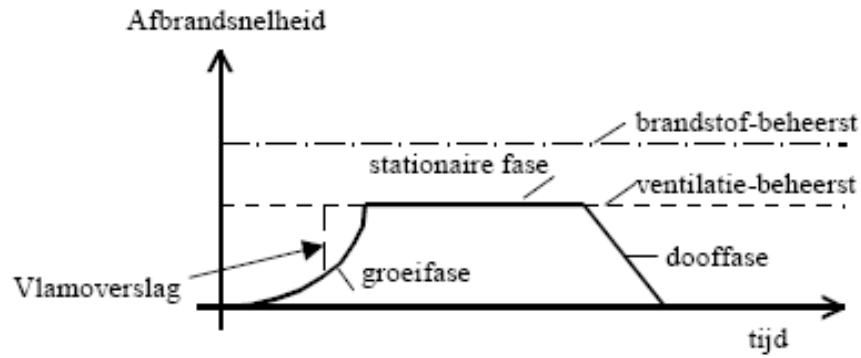


Fig. 3.3: Brandvermogensscenario (afbrandsnelheid als functie van de tijd).

Daarna begint de dooffase. Er wordt verondersteld dat de afbrandsnelheid in deze fase lineair afneemt met de tijd. Uitgaande van resultaten van proeven, wordt aangenomen dat de doofperiode begint indien ongeveer 70% van het aanwezige brandbare materiaal is verbrand.

Hoofdstuk 4 Basismodel

4.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 3 is aangegeven wordt in het geval van een ontwikkelende brand in een ruimte een hete zone bovenin die ruimte opgebouwd. Na verloop van tijd kan deze gestratificeerde situatie overgaan in een gemengde situatie. De brand, die in aanvang brandstofbeheerst is zal daarbij ventilatiebeheerst worden. Figuur 4.1 geeft het proces schematisch weer.

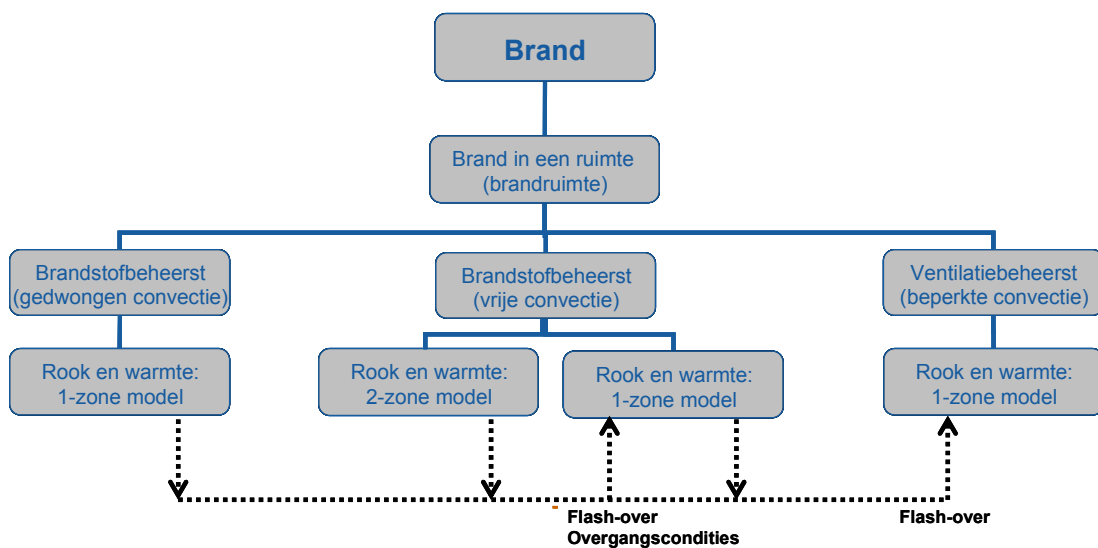


Fig. 4.1: Het zonemodel impliceert zowel en 2-zone als een 1-zone situatie
 Gedwongen convectie: mechanische toevoer met overmaat aan lucht
 Vrije convectie: natuurlijke toevoer met voldoende lucht voor volledige verbranding
 Beperkte convectie: ontoereikende luchttoevoer voor volledige verbranding

De ontwikkeling van de hete zone wordt bepaald door de instroom die vanaf de brandhaard convectief optreedt. Deze instroom kan op basis van een pluimmodel worden bepaald.

Het zonemodel en het pluimmodel vormen dan ook de basis voor het fysisch brandmodel. Het verbrandingsmodel (op basis van referentie vermogensdichtheid, tijdconstante en luchtfactor) levert de bron hiervoor.

Het zonemodel is gebaseerd op de volgende fysische behoudswetten:

- behoud van massa
- behoud van deeltjes (species)
- behoud van energie

In de behoudswetten moet tevens rekening worden gehouden met de buffercapaciteit van een zone voor de betreffende grootheden (instationaire condities).

4.2 Zone-modellen

In het begin van de brand, voordat zich een rooklaag ontwikkelt onder het plafond, kan de brandruimte nog als één zone gezien worden. In deze zone heersen nog de initiële omgevingscondities voor temperatuur en dichtheid. Vanaf het moment dat er een rooklaag onder het plafond ontstaat wordt de brandruimte gemodelleerd met twee zones: een koude zone onder in de brandruimte waar de omgevingscondities van kracht zijn, en een hete zone boven in de brandruimte waar een hogere temperatuur en een lagere dichtheid heersen (zie figuur 4.2). Naarmate de brand verder ontwikkelt wordt de rooklaag steeds dikker. Het volume van de hete zone neemt dus toe en de grens tussen de koude en hete zones komt steeds lager te liggen.

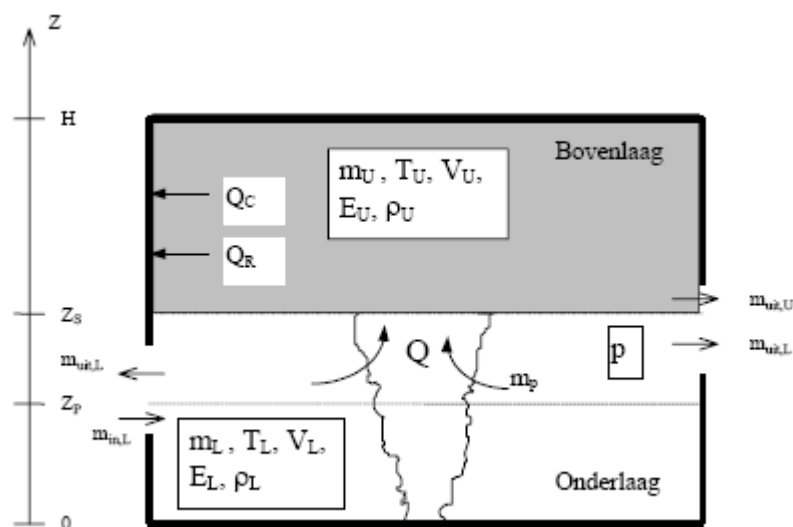


Fig.4.2: Brandruimte in de ontwikkelfase met twee zones.

In bijlage A, onderdeel A.3, zijn de behoudswetten gegeven die voor de verschillende zones van toepassing zijn. Uiteindelijk kunnen dan met de vergelijkingen (A.12) de volgende grootheden op een willekeurig tijdstip vanaf het ontstaan van de brand bepaald worden:

- De temperatuur van de hete zone
- De temperatuur van de koude zone
- De hoogte van de interface (grensvlak) tussen de koude en de hete zone
- De druk in de ruimte

De druk in de ruimte is mede bepalend voor de hoogte van het drukneutrale vlak, welke ook in figuur 4.2 is aangegeven. De exacte situering van dit drukneutrale vlak wordt voorts bepaald door de aanwezigheid van openingen in de begrenzing van de brandruimte (zie submodel *convectief transport via openingen*, rapport Wu040430aaA2.rhe, paragraaf 2.1). Met name voor dit submodel is de hoogte van het drukneutrale vlak van belang: onder het drukneutrale vlak treedt luchttoevoer via openingen op, daarboven luchtafvoer.

Door de toenemende straling van de steeds dikker en langer wordende vlammen zal het brandoppervlak steeds sneller gaan uitbreiden. Ook wordt de

rooklaag wordt steeds heter door de toenemende straling vanaf de brand. Dit zal doorgaan tot het moment dat de straling van de rooklaag naar andere brandbare materialen in de ruimte zo hoog wordt dat deze materialen spontaan ontbranden (flashover). Vanaf dit moment is alle brandstof in een ruimte in het brandproces betrokken (volledig ontwikkelde brand) en kan de brandruimte als één gemengde zone gemodelleerd worden (zie figuur 4.3).

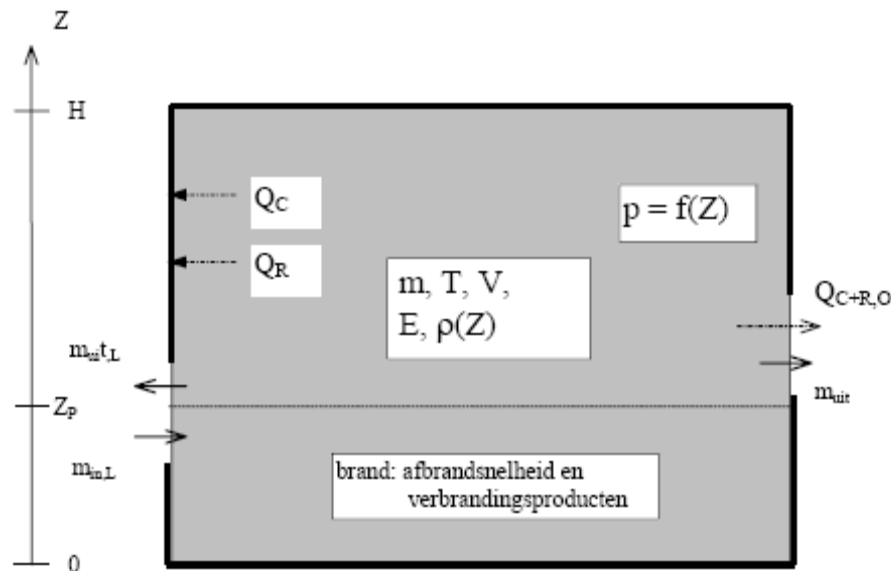


Fig.4.3: Brandruimte in de volledig ontwikkelde fase met een gemengde zone (compartiments-brand).

In bijlage A, onderdeel A.4, zijn de behoudswetten gegeven die voor de gemengde zone van toepassing zijn. Uiteindelijk kunnen dan met de vergelijkingen (A.17) de volgende grootheden op een willekeurig tijdstip vanaf het ontstaan van de brand bepaald worden:

- De temperatuur van de gemengde zone
- De druk in de ruimte

De druk in de ruimte is mede bepalend voor de hoogte van het drukneutrale vlak, welke ook in figuur 4.3 is aangegeven. De exacte situering van dit drukneutrale vlak wordt voorts bepaald door de aanwezigheid van openingen in de begrenzing van de brandruimte (zie submodel *convectief transport via openingen*, rapport Wu040430aaA2.rhe, paragraaf 2.1). Met name voor dit submodel is de hoogte van het drukneutrale vlak van belang: onder het drukneutrale vlak treedt luchttoevoer via openingen op, daarboven luchtafvoer.

De overgangsvoorwaarden tussen een 2-zone en een 1-zone model zijn gegeven in bijlage A, onderdeel A.5.

Het toepassingsgebied van het zonemodel is gegeven in bijlage A, onderdeel A.6. Feitelijk zijn er voor de toepassing van het zonemodel geen grenzen aan de maximale grootte van een brandruimte, maar wel aan de lengte/breedte/hoogte-verhoudingen (Jones et al., 2005).

4.3 Samenhang met submodellen

Om de behoudswetten voor de verschillende zones te kunnen oplossen zijn aanvullende vergelijkingen nodig die de interactie tussen verschillende zones onderling en met de omgeving beschrijven. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van submodellen.

Minimaal zijn submodellen benodigd voor de beschrijving van de verbranding (energie- en massabron) en de rookpluim (transport van energie en massa vanaf de brandstof in de koude zone naar de hete zone). Daarnaast kunnen vele andere submodellen opgenomen worden, bijvoorbeeld voor de beschrijving van uitwisseling van massa en energie door openingen in de brandruimte of het warmtetransport naar de omhulling van de brandruimte.

Voor het fysisch brandmodel moet dus een keuze gemaakt worden welke submodellen opgenomen worden. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de mogelijke submodellen die in het fysisch brandmodel opgenomen kunnen worden.

Tabel 4.1: Mogelijke submodellen voor het fysisch brandmodel (Quiuntiere, 2002)

submodel	korte omschrijving van submodel
verbrandingsmodel	Beschrijving van de pyrolyse van de brandstof
pluimmodel	transport van massa en energie van de brandstof naar de hete zone via de rookpluim
model voor luchtstroming door openingen	uitwisseling van massa en energie van de koude en/of hete zone met de omgeving van de brandruimte via openingen en mechanische ventilatievoorzieningen in de scheidingsconstructies
model voor convectief warmtetransport naar oppervlakken	transport van energie van de hete zone naar de scheidingsconstructies door convectie
model voor warmtetransport door straling	transport van energie van de hete zone en de vlammen naar de scheidingsconstructies door straling
model voor warmtetransport door geleiding	transport van energie door de scheidingsconstructies
detectiemodel	berekening van de detectietijd van een brand door detectoren
repressiemodel	repressie van de brand door een sprinklerinstallatie

Veel van deze submodellen zijn gebaseerd op experimentele meetgegevens en/of observaties van werkelijke branden. De submodellen bepalen in grote mate de nauwkeurigheid van het fysisch brandmodel.

Voor de toepassing van submodellen wordt verwezen naar rapport Wu040430aaA2.rhe.

Hoofdstuk 5 Model-output

5.1 Het berekende brandvermogensscenario

Het brandstofbeheerste brandvermogensscenario wordt bepaald door de referentie brandvermogensdichtheid en de branduitbreidingsnelheid (tijdconstante) in de groeifase. In de stationaire fase is het brandstofbeheerste vermogen gelijk aan het product van referentievermogensdichtheid en (maximale) brandoppervlakte.

Zoals in hoofdstuk 4 is aangegeven wordt de stationaire fase vaak bereikt na een flash-over, waarbij de brand ventilatiebeheerst wordt in plaats van brandstofbeheerst. Omdat er bij een ventilatiebeheerste brand onvoldoende zuurstof aanwezig is voor volledige verbranding wordt het brandvermogen gereduceerd, zie figuur 3.3. Het brandvermogen in de ventilatiebeheerste stationaire fase wordt bepaald door de mate waarin zuurstof voor de verbranding aanwezig is (zie rapport Wu040430aaA2.rhe, paragraaf 3.1).

Het opgelegde brandstofbeheerste brandvermogensscenario wordt door het fysisch brandmodel dus gemodificeerd tot een realistisch brandscenario, rekening houdend met de overgang van een twee-zone naar een één-zone model en de vermogensreductie in de ventilatiebeheerste stationaire fase. Figuur 5.1 geeft hiervan een voorbeeld.

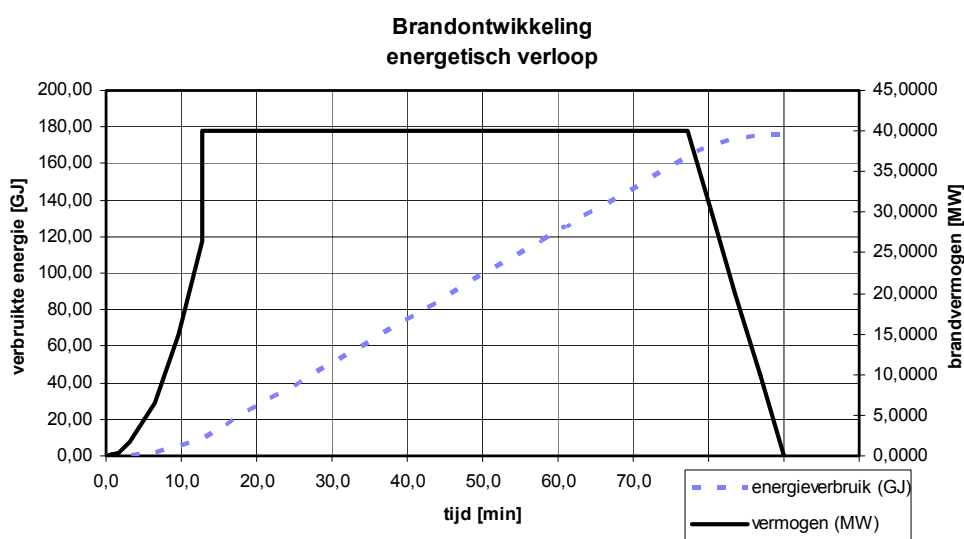


Fig.5.1: Realistisch brandvermogensscenario, op basis van het fysisch brandmodel.

5.2 Thermische consequenties

Uit het berekende brandvermogensscenario, zoals bijvoorbeeld in figuur 5.1 is weergegeven, kunnen de thermische consequenties voor de zones bepaald worden. Daarbij kan rekening gehouden worden met de submodellen die de warmtetransportmechanismen beschrijven tussen de zones onderling en tussen zones en omgeving.

Binnen een zone wordt een homogene temperatuur verondersteld. Uit deze temperatuur kunnen de convectieve thermische belasting en de stralingsbelasting op mens en constructie in de brandruimte worden bepaald. Voor de belasting op mens en constructie buiten de brandruimte moet gebruik worden gemaakt van submodellen, die aansluiten op het zonemodel.

Wanneer het vermoeden bestaat dat binnen een zone niet kan worden uitgegaan van een homogene temperatuur, bijvoorbeeld vanwege de geometrie van de ruimte, moet een geavanceerdere methode worden toegepast. Geavanceerdere methoden zijn gebaseerd op veldmodellen (CFD-modellen). Eventueel kan het brandvermogensscenario, bepaald conform paragraaf 5.1, daarvoor als input dienen.

Literatuur

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.

DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association

Drysdale, D. (1988), *An introduction to fire dynamics*, second edition, Chichester (UK): John Wiley and sons.

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.

McGrattan, K. B., et al. (2002). *Fire Dynamics Simulator (version 3) – technical reference guide, NIST (NISTIR 6783)*, Gaithersburg (USA): Department of Commerce.

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

Quintiere, J.G. (2002), Compartment Fire Modeling, in: DiNenno, P.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Quincy: National Fire Protection Association, pp. 3-162 – 3-170.

Schleich, J.B. et al. (2001), Profil/Arbed 2001 valorisatieproject: *Natuurlijk brandconcept – eindrapport*, Esch/Alzette (L): Centre de Recherches Profil/Arbed.

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.

EN 19911-2:2002, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, Brussels (B): CEN.

Bijlage A

Zonemodellen

A.1 Inleiding

Het basismodel bestaat uit een zonemodel voor de brandruimte. Desgewenst kan dit zonemodel worden uitgebreid met meer ruimten, waardoor meervoudige zonemodellen ontstaan. Een dergelijke uitbreiding kan zinvol zijn om het stromingstransport in gebouwen of bouwwerken inzichtelijk te maken; de brandruimte levert hierin de randcondities voor het meervoudige zonemodel. Met meer dan één brandruimte behoeft volgens de publiekrechtelijke regelgeving niet te worden gerekend.

De beschrijving van het zonemodel blijft daarom beperkt tot een model voor de brandruimte.

A.2 Algemeen

Het kenmerk van een zonemodel is dat de brandruimte wordt onderverdeeld in verschillende zones. Voor elke zone zijn de behoudswetten voor energie, massa en deeltjes van toepassing. Hierbij wordt een zone als homogeen verondersteld; dat wil zeggen dat temperatuur en dichtheid binnen een zone uniform zijn. In werkelijkheid zijn deze eigenschappen niet constant over de gehele zone (bijvoorbeeld: de temperatuur in de rooklaag is hoger dichterbij de brandhaard), maar om de macroscopische eigenschappen in de brandruimte gedurende de brand te kunnen beschrijven, volstaat deze aanname (Quintiere, 2002).

Het basismodel is gebaseerd op de volgende fysische behoudswetten voor een zone (Quintiere, 2002):

- behoud van massa

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{j=1}^J \dot{m}_j + \dot{m}_f$$

met :

(A.1)

$$\frac{dm}{dt} = A \frac{d}{dt}(\rho z_l)$$

- behoud van deeltjes (species)

$$m \frac{dY_i}{dt} = \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (Y_{ij} - Y_i) + \dot{\omega}_i$$

met :

(A.2)

$$m = A \rho z_l$$

- behoud van energie

$$m c_p \frac{dT}{dt} - V \frac{dP}{dt} = c_p \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (T_j - T) + \dot{\omega}_f H_u + \dot{Q}_{net,loss}$$

met :

$$m = A \rho z_l \quad (A.3)$$

$$V = A z_l$$

$$\dot{Q}_{net,loss} = -\dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_{rad}$$

Bij de behoudswet voor energie voor een zone is uitgegaan van de ideale gaswet:

$$P_{int} = \rho RT \quad (A.4)$$

In de behoudswetten (A.1), (A.2) en (A.3) zijn de inkomende massastromen, deeltjesstromen en energiestromen (vermogens) positief beschouwd. De uitgaande stromen zijn negatief. De oppervlakte A wordt gelijk verondersteld aan de oppervlakte van de brandruimte; de hoogte van de zone is z_l .

Ter toelichting op de behoudswetten (A.2) en (A.3):

- massaproductiestroom van deeltjes (product i) ten gevolge van verbranding:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_f Y_{i,fi} \quad (A.5)$$

Y_i is de deeltjesconcentratie (m/m) van product i ;

$Y_{i,fi}$ geldt ter plaatse van de brandhaard, als gevolg van verbranding.

- pyrolysemassastroom van brandstof die wordt verbrand:

$$\dot{\omega}_f = \dot{m}_{fi} \quad \text{indien de zuurstofconcentratie (m/m) } Y_{ox} > 0 \quad (A.6a)$$

Vergelijking (A.6a) geldt dus voor een brandstofbeheerste brand. Wanneer het zuurstofgehalte ontoereikend wordt voor volledige verbranding wordt de pyrolysemassastroom van brandstof die wordt verbrand aangepast. Immers, de zuurstofconcentratie Y_{ox} kan niet kleiner dan 0 worden. In dat geval geldt dus:

$$\dot{\omega}_f = r \cdot \dot{m}_{ox}$$

$$\text{met :} \quad (A.6b)$$

$$\dot{m}_{ox} = m \frac{dY_{ox}}{dt} \quad \text{en} \quad Y_{ox} = 0$$

r = stoichiometrische brandstof/zuurstof verhouding (m/m)

De stoichiometrische constanten zijn brandstofafhankelijk. Hiervoor is een koppeling met een *verbrandingsmodel* (submodel) noodzakelijk.

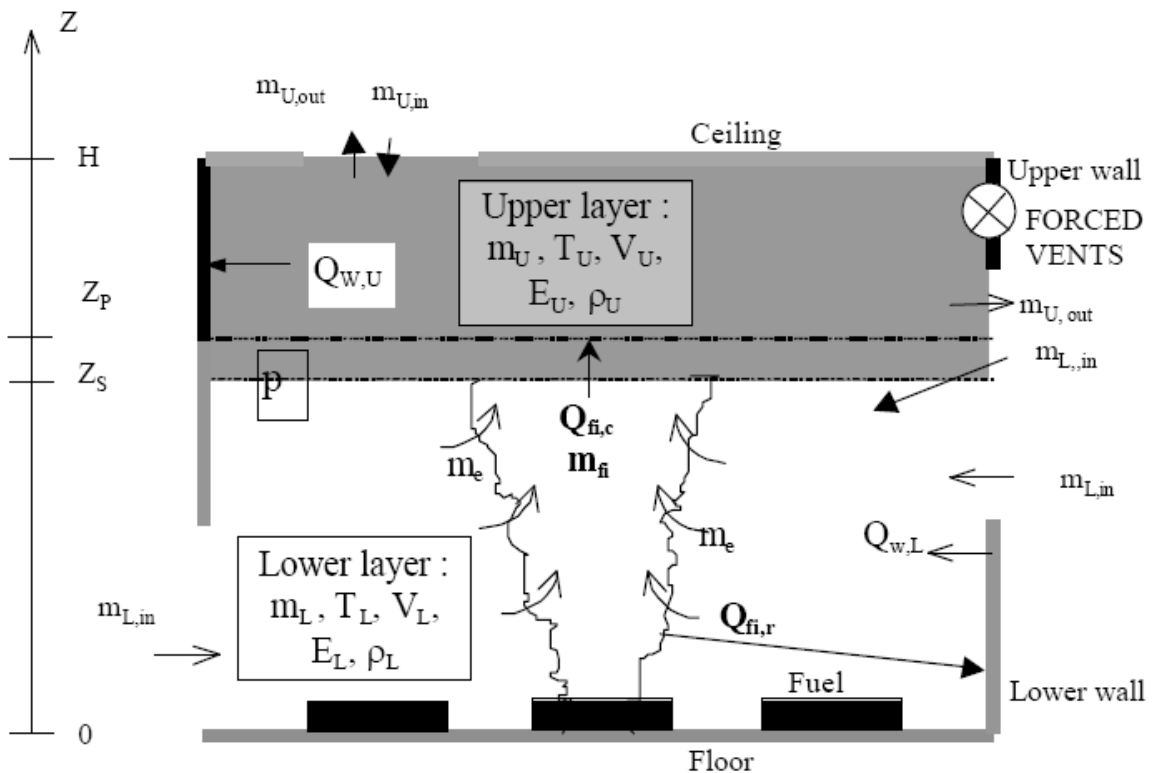
A.3 2-Zone model

Voor aanvang van de brand kan de brandruimte als één zone gezien worden. In deze zone heersen de initiële temperatuurscondities voor temperatuur, dichtheid en druk. Wanneer er een brand ontstaat stijgen de verbrandingsproducten in een pluim boven de brandhaard op. Via een *pluimmodel* (submodel) wordt bepaald met welke massastroom onder het plafond van de brandruimte

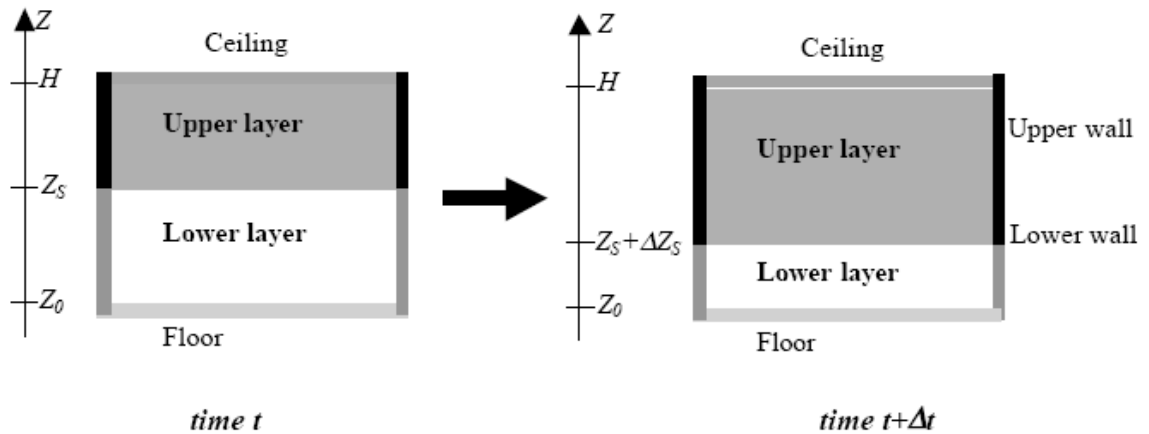
een hete zone wordt opgebouwd. Naarmate de brand zich verder ontwikkelt wordt de hete zone steeds dikker en ook in temperatuur steeds hoger. De koude zone eronder kan in temperatuur ook iets toenemen. Dit wordt veroorzaakt doordat de ruimtebegrenzingsen ten gevolge van straling vanaf de brandhaard opwarmen en deze warmte indirect via convectie aan de koude zone weer afstaan (submodel *opwarming en afkoeling van ruimtebegrenzingsen*). De grens tussen de koude en de hete zone (interface) komt steeds lager te liggen.

In 2-zonemodellen wordt weleens aangenomen dat de interface tevens het drukneutrale vlak vormt (Van Oerle e.a., 1996). Dit is in het algemeen niet het geval. Alleen wanneer er in de begrenzing van de brandruimte openingen aanwezig zijn kan zich een drukneutraal vlak instellen. Dit drukneutrale vlak komt niet overeen met de interface tussen de koude en hete zone. Bij een ontwikkelende brand zal het drukneutrale vlak, afhankelijk van de aanwezige openingen in de begrenzing van de brandruimte, zich vaak onder de interface bevinden. Bij een grotere dikte van de hete zone kan het drukneutrale vlak ook boven de interface komen te liggen, zie figuur A.1. Er is wat dit betreft een duidelijke koppeling met het submodel voor *convectief transport via openingen* aanwezig.

Wanneer in het geheel geen openingen in de ruimtebegrenzing aanwezig zijn is er ook geen drukneutraal vlak in de brandruimte aanwezig. Er ontstaat bij een ontwikkelende brand een temperatuurverhoging en drukverhoging in de brandruimte. Het fictieve drukneutrale vlak ligt dan dus onder het vloerniveau van de brandruimte. Dit verschijnsel kan ook optreden bij relatief kleine openingen in de ruimtebegrenzing.



Figuur A.1: Schematische opbouw van het 2-zone model en interactie met verbrandingsmodel, pluimmodel, convectiemodel via openingen en opwarming en afkoeling van de ruimtebegrenzingsen.



Figuur A.2: Opbouw van de hete zone (upper layer) in de tijd. Ook de interactie met het submodel voor de opwarming en afkoeling van de ruimtebegrenzingen is hierin weergegeven. Het submodel moet per zone worden beschouwd.

In het 2-zone model zijn de volgende 11 variabelen van belang in de beschrijving van de fysische effecten (Cadorin, 2003). De index U staat voor de hete zone (upper layer), de index L voor de koude zone (lower layer):

- De gasmassa in de hete zone en de koude zone m_U en m_L
- De temperaturen in de hete zone en de koude zone T_U en T_L
- De volumes van de zones V_U en V_L
- De interne energieën van de zones E_U en E_L
- De gasdichtheden in de zones ρ_U en ρ_L
- De absolute druk in de ruimte P .

Tussen de variabelen gelden de volgende relaties:

$$\begin{aligned}
 \rho_U &= \frac{m_U}{V_U} & \rho_L &= \frac{m_L}{V_L} \\
 E_U &= c_v(T_U) \cdot m_U T_U & E_L &= c_v(T_L) \cdot m_L T_L \\
 P &= \rho_U R T_U & P &= \rho_L R T_L \\
 V &= V_U + V_L
 \end{aligned}
 \tag{A.7}$$

De soortelijke warmte (warmtecapaciteit) van een gas bij constant volume ($c_v(T)$) en bij constante druk ($c_p(T)$), de gasconstante (R) en de soortelijke warmteverhouding ($\gamma(T)$) hangen als volgt samen:

$$\begin{aligned}
 R &= c_p(T_U) - c_v(T_U) & R &= c_p(T_L) - c_v(T_L) \\
 \gamma(T_U) &= \frac{c_p(T_U)}{c_v(T_U)} & \gamma(T_L) &= \frac{c_p(T_L)}{c_v(T_L)}
 \end{aligned}
 \tag{A.8}$$

Voor de soortelijke warmte van lucht kan, onder verwaarlozing van verbrandingsproducten, de volgende temperatuursafhankelijkheid worden aangehouden (Cadorin, 2003):

$$c_p(T) = 0,187 \cdot T + 952
 \tag{A.9}$$

Voor de massabalans per zone geldt:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_U &= \dot{m}_{\hat{f}} + \dot{m}_e + \sum \dot{m}_j \\
 \sum \dot{m}_j &= -\dot{m}_{U,V,out} + \dot{m}_{U,H,in} - \dot{m}_{U,H,out} + \dot{m}_{U,F,in} - \dot{m}_{U,F,out} \\
 \dot{m}_L &= -\dot{m}_e + \sum \dot{m}_j \\
 \sum \dot{m}_j &= \dot{m}_{U,V,in} + \dot{m}_{L,V,in} - \dot{m}_{L,V,out} + \dot{m}_{L,F,in} - \dot{m}_{L,F,out}
 \end{aligned} \tag{A.10}$$

In de massabalansen (A.10) gaat het om massastromen, dus massadifferenties in de tijd. De index V staat voor verticale openingen, H voor horizontale openingen en F voor mechanische ventilatie (opgelegde massastromen).

Uit de massabalansen blijkt dat de massabuffering van de pluim verwaarloosbaar wordt verondersteld. De massa-instroom via openingen in de hete zone (wanneer het drukneutrale vlak boven de interface ligt) wordt rechtstreeks toegekend aan de koude zone.

De bijbehorende energiebalansen per zone zijn:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_U &= \dot{Q}_c + \dot{Q}_e + \dot{Q}_{U,p} + \dot{Q}_{U,V,rad} + \sum \dot{Q}_j \\
 \sum \dot{Q}_j &= \dot{Q}_{U,V,out} + \dot{Q}_{U,H,in} + \dot{Q}_{U,H,out} + \dot{Q}_{U,F,in} + \dot{Q}_{U,F,out} \\
 \dot{Q}_L &= \dot{Q}_e + \dot{Q}_{L,p} + \dot{Q}_{L,V,rad} + \sum \dot{Q}_j \\
 \sum \dot{Q}_j &= \dot{Q}_{U,V,in} + \dot{Q}_{L,V,in} + \dot{Q}_{L,V,out} + \dot{Q}_{L,F,in} + \dot{Q}_{L,F,out}
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

In de energiebalansen (A.11) gaat het om energiestromen, dus vermogens. Anders dan bij de massabalansen (A.10) zijn in de energiebalansen de grootte-heden niet absoluut, maar richtingsafhankelijk. Inkomende vermogens moeten positief worden genomen, uitgaande vermogens zijn negatief. Dit houdt dus in dat als \dot{Q}_e (vermogen van de in de pluim ingemengde lucht vanuit de koude zone) in de energiebalans voor de hete zone (U) een positieve bijdrage heeft, deze grootte-heden in de energiebalans voor de koude zone (L) een negatieve bijdrage heeft. Overige warmte-uitwisseling tussen de zones onderling, door convectie of straling, treedt niet op.

\dot{Q}_c staat voor het convectief afgegeven vermogen vanaf de brandhaard. Het door straling vanaf de brandhaard afgegeven vermogen komt niet ten goede aan de zones, maar aan de begrenzings van de brandruimte.

Stralingstransport tussen de zones en de omgeving buiten de brandruimte komt alleen tot stand via luchttoevoeropeningen ($\dot{Q}_{U,V,rad}$ en $\dot{Q}_{L,V,rad}$).

Via openingen waardoor convectieve afvoer plaatsvindt (zoals horizontale dak-openingen) treedt geen stralingstransport op.

Het warmtetransport naar de ruimtebegrenzingsen ($\dot{Q}_{U,p}$ en $\dot{Q}_{L,p}$), zowel convectief als door straling, moet met een submodel worden bepaald (zie rapport Wu040430aaA2.rhe).

De temperaturen van de beide zones, de hoogte van de interface tussen de zones en de druk in de brandruimte kunnen uit de volgende differentiaalvergelijkingen worden bepaald (Jones e.a., 2005):

$$\begin{aligned}
 \dot{P}_{\text{int}} &= \frac{(\gamma - 1)}{V} (\dot{Q}_U + \dot{Q}_L) \\
 \dot{T}_U &= \frac{1}{c_p(T_U)\rho_U V_U} (\dot{Q}_U - c_p(T_U)\dot{m}_U T_U + V_U \dot{P}_{\text{int}}) \\
 \dot{T}_L &= \frac{1}{c_p(T_L)\rho_L V_L} (\dot{Q}_L - c_p(T_L)\dot{m}_L T_L + V_L \dot{P}_{\text{int}}) \\
 \dot{V}_U &= \frac{1}{\gamma(T_U)P_{\text{int}}} ((\gamma(T_U) - 1)\dot{Q}_U - V_U \dot{P}_{\text{int}})
 \end{aligned}
 \tag{A.12}$$

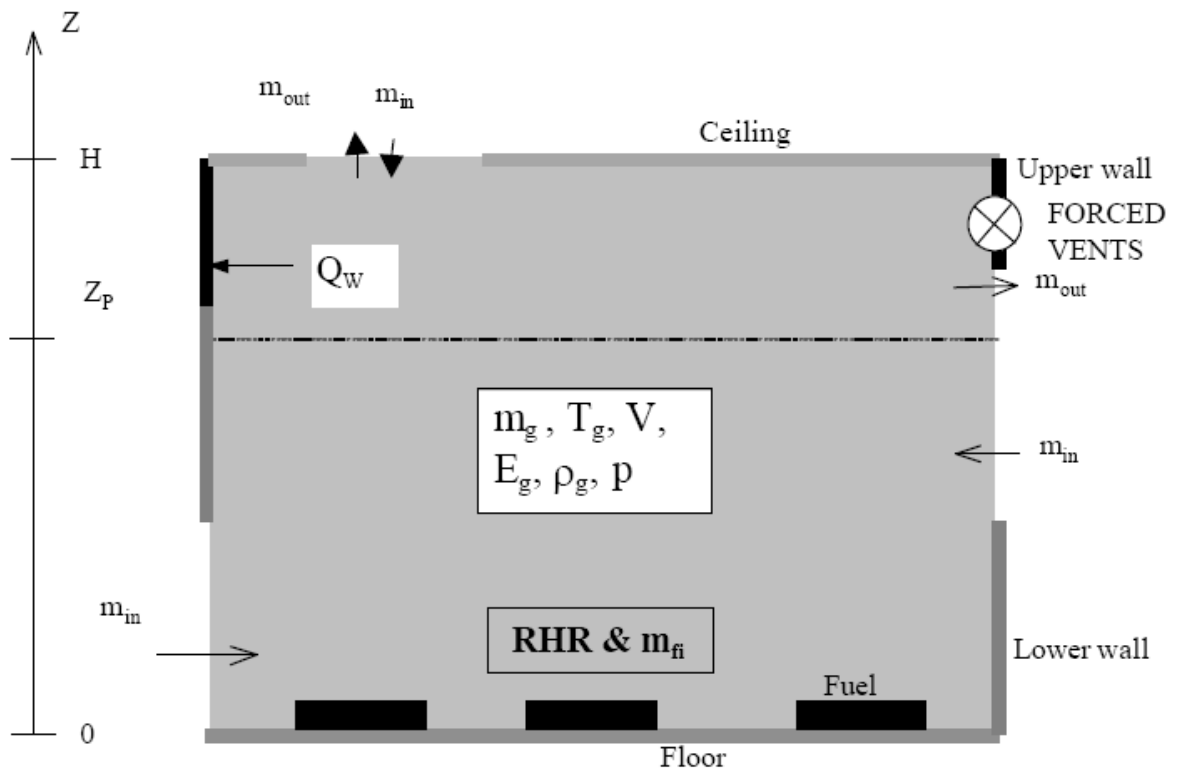
A.4 1-Zone model

Onder voorwaarden, zoals aangegeven in A.5, kan het 2-zone model overgaan in één gemengde zone (1-zone model). Figuur A.3 geeft een schematische doorsnede, waarin ook de interactie met diverse submodellen is weergegeven.

Een belangrijk verschil met het 2-zone model is dat een pluimmodel in de gemengde zone niet relevant is. Immers, brandhaard en verbrandingsproducten bevinden zich in dezelfde (gemengde) zone.

Voor het overige is er overeenkomst met het 2-zone model. Ook in het 1-zone model kan zich een drukneutraal vlak instellen, afhankelijk van de openingen in de ruimtebegrenzing. Er is wat dit betreft een duidelijke koppeling met het submodel voor *convectief transport via openingen* aanwezig.

Wanneer in het geheel geen openingen in de ruimtebegrenzing aanwezig zijn is er ook geen drukneutraal vlak in de brandruimte aanwezig. Er ontstaat bij een ontwikkelende brand een temperatuurverhoging en drukverhoging in de brandruimte. Het fictieve drukneutrale vlak ligt dan dus onder het vloerniveau van de brandruimte. Dit verschijnsel kan ook optreden bij relatief kleine openingen in de ruimtebegrenzing



Figuur A.3: Schematische opbouw van het 2-zone model en interactie met verbrandingsmodel, pluimmodel, convectiemodel via openingen en opwarming en afkoeling van de ruimtebegrenzingsen.

In het 1-zone model zijn de volgende 6 variabelen van belang in de beschrijving van de fysische effecten (Cadorin, 2003). De index g staat voor gemengde zone:

- De gasmassa in de gemengde zone m_g
- De temperatuur in de gemengde zone T_g
- Het volume van de gemengde zone V_g (constant)
- De interne energie van de gemengde zone E_g
- De gasdichtheid in de gemengde zone ρ_g
- De absolute druk in de ruimte P .

Tussen de variabelen gelden de volgende relaties:

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g}$$

$$E_g = c_v(T_g) \cdot m_g T_g \tag{A.13}$$

$$P = \rho_g R T_g$$

$$V = \text{constant}$$

De soortelijke warmteverhouding ($\gamma(T)$) is nu:

$$\gamma(T_g) = \frac{c_p(T_g)}{c_v(T_g)} \tag{A.14}$$

Voor de massabalans van de gemengde zone geldt:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{f_i} + \sum \dot{m}_j \quad (\text{A.15})$$

$$\sum \dot{m}_j = \dot{m}_{g,V,in} - \dot{m}_{g,V,out} + \dot{m}_{g,H,in} - \dot{m}_{g,H,out} + \dot{m}_{g,F,in} - \dot{m}_{g,F,out}$$

In de massabalans (A.15) gaat het om massastromen, dus massadifferenties in de tijd. De index V staat voor verticale openingen, H voor horizontale openingen en F voor mechanische ventilatie (opgelegde massastromen).

De bijbehorende energiebalans voor de gemengde zone is:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q} + \dot{Q}_{g,p} + \dot{Q}_{g,V,rad} + \sum \dot{Q}_j \quad (\text{A.16})$$

$$\sum \dot{Q}_j = \dot{Q}_{g,V,in} + \dot{Q}_{g,V,out} + \dot{Q}_{g,H,in} + \dot{Q}_{g,H,out} + \dot{Q}_{g,F,in} + \dot{Q}_{g,F,out}$$

In de energiebalansen (A.16) gaat het om energiestromen, dus vermogens. Anders dan bij de massabalansen (A.10) zijn in de energiebalansen de grootheden niet absoluut, maar richtingsafhankelijk. Inkomende vermogens moeten positief worden genomen, uitgaande vermogens zijn negatief.

\dot{Q} staat voor het volledige vermogen dat door de brandhaard wordt afgestaan (convectie en straling). Vanwege de opgemengde situatie, waarin de brandhaard zich bevindt, bereikt de warmtestraling vanaf de brandhaard niet de begrenzingen van de brandruimte.

Stralingstransport tussen de gemengde zone en de omgeving buiten de brandruimte komt alleen tot stand via luchttoevoeropeningen ($\dot{Q}_{g,V,rad}$).

Via openingen waardoor convectieve afvoer plaatsvindt (zoals horizontale dak-openingen) treedt geen stralingstransport op.

Het warmtetransport naar de ruimtebegrenzingen ($\dot{Q}_{g,p}$), zowel convectief als door straling, moet met een submodel worden bepaald (zie rapport Wu040430aaA2.rhe).

De temperaturen van de beide zones, de hoogte van de interface tussen de zones en de druk in de brandruimte kunnen uit de volgende differentiaalvergelijkingen worden bepaald (Cadorin, 2003):

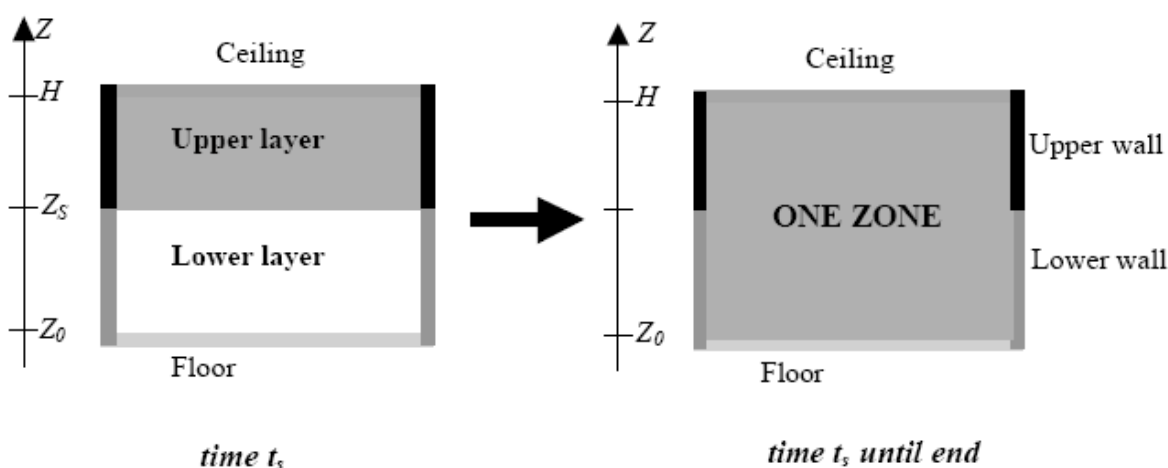
$$\begin{aligned} \dot{P}_{int} &= \frac{(\gamma-1)}{V} \dot{Q}_g \\ \dot{T}_g &= \frac{1}{c_p(T_g)\rho_g V} (\dot{Q}_g - c_p(T_g)\dot{m}_g T_g + V_g \dot{P}_{int}) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

A.5 Overgangsvoorwaarden tussen 2-zone en 1-zone model

In een brandruimte met een uniform verdeelde vuurbelasting zal het 2-zone model overgaan in een 1-zone model in één van de volgende situaties (EN 1991-1-2:2002 en Cadornin, 2003):

1. de gastemperatuur in de hete zone overschrijdt de waarde van 500 °C (flash-over door warmtestraling)
2. de brandstof bevindt zich gedeeltelijk in de hete zone en de gastemperatuur in de hete zone overschrijdt de waarde van 300 °C (ontsteking van alle aanwezige brandstof); of de gastemperatuur in de koude zone overschrijdt de waarde van 300 °C (ontsteking van alle aanwezige brandstof)
3. de dikte van de hete zone bedraagt meer dan 80% van de hoogte van de brandruimte
4. de brandoppervlakte bedraagt meer dan 25% van de oppervlakte van de brandruimte (dit levert zodanige pluimafmetingen dat van een gemengde zone kan worden gesproken)

In het geval van een niet-uniform verdeelde vuurbelasting, maar een lokale vuurlast, leiden de flash-over criteria (1) en (2) wel tot het ontbranden van alle aanwezige brandstof, maar zal dit pas leiden tot een 1-zone model wanneer daarbij de criteria (3) of (4) worden overschreden.



Figuur A.4: Overgang van een 2-zone model naar een 1-zone model op tijdstip t_s .

Bij de overgang van het 2-zone model naar het 1-zone model op tijdstip t_s dient de totale massa en de totale energie in de brandruimte gelijk te blijven:

$$\begin{aligned} m_g(t_s) &= m_U(t_s) + m_L(t_s) \\ E_g(t_s) &= E_U(t_s) + E_L(t_s) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Uit (A.18) kunnen de gemengde zone temperatuur $T_g(t_s)$ en de gemengde zone druk $P_{int,g}(t_s)$ worden bepaald, zie ook (A.13).

A.6 Toepassingsgebied van het zonemodel

Zonemodellen gaan uit van een uniforme verdeling van grootheden (zoals de temperatuur) binnen de zones. De ruimte waarin de zones zich bevinden wordt driedimensionaal beschouwd. Wanneer één van deze dimensies veel groter is dan de andere twee dimensies is de aanname van een uniforme verdeling niet meer terecht.

Als voorbeeld kan worden genoemd een lange smalle ruimte (corridor), waarbij de hete zone zich verder van de brandhaard (de instroom vanuit de pluim) minder snel ontwikkelt. Ook een hoge smalle ruimte (schacht) kan een probleem geven, niet zozeer vanuit de beperkingen van het zonemodel, maar wellicht vanuit de beperkingen vanuit het pluimmodel (zie submodellen in Wu040430aaA2.rhe).

Voor zonemodellen worden daarom de volgende grenzen voor het toepassingsgebied aanbevolen (Jones et al, 2005):

- Verhouding lengte / breedte van de ruimte < 5
- Verhouding lengte / hoogte van de ruimte < 6
- Verhouding breedte / hoogte van de ruimte > 0,2

A.7 Benodigde submodellen bij het zonemodel

In de vergelijkingen van het zonemodel komen diverse grootheden voor die met behulp van submodellen moeten worden bepaald.

Het gaat om de volgende grootheden:

- de massa- en warmtestroom vanaf de brandhaard
- de luchtinmenging in de pluim vanaf de koude zone naar de hete zone
- convectief massa- en warmtetransport via openingen (gevel, plafond) en via mechanische ventilatie
- convectief warmtetransport naar de ruimtebegrenzingsen
- warmtetransport door straling naar de ruimtebegrenzingsen en openingen (gevel, plafond) hierin

