



DEEL 1

THERMISCHE & MECHANISCHE BELASTINGEN

door

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre
PROFILARBED S.A.
Luxemburg

INHOUD

1.	INLEIDING.....	3
2.	ALGEMENE OPZET	6
2.2	<i>Doelstellingen</i>	6
2.3	<i>Methoden ter bepaling van de brandontwikkeling</i>	7
2.4	<i>Constructiegedrag bij brand</i>	7
2.5	<i>Noodzakelijke gegevens</i>	8
3.	EIGENSCHAPPEN VAN DE BRANDRUIMTE	9
3.1	<i>Inleiding</i>	9
3.2	<i>Constructie -onderdelen die de brandruimte omhullen</i>	9
3.3	<i>De thermische eigenschappen van wanden</i>	9
3.4	<i>Openingskarakteristieken</i>	10
3.5	<i>Mechanische ventilatie</i>	11
4.	BRANDKARAKTERISTIEKEN	12
4.1	<i>Vuurbelasting</i>	12
4.2	<i>Aard van de brand</i>	14
4.2	<i>De ontwerpbrand</i>	15
5	PROBABILISTISCHE ASPECTEN.....	19
5.1	<i>Inleiding</i>	19
5.2	<i>Statistiek</i>	19
5.3	<i>Waarschijnlijkheid</i>	20
5.4	<i>Ontwerpprocedure</i>	22
6.	DE BEREKENING VAN HET TEMPERATUURVERLOOP BIJ BRAND.....	28
6.1	<i>Plaatselijke brand</i>	28
6.2	<i>Volledig ontwikkelde brand</i>	32
6.3	<i>Combinatie van één- en twee-zone modellen; keuze van het model</i>	38
7.	MECHANISCHE BELASTING VOLGENS EUROCODE.....	40
8.	SLOTOPMERKINGEN.....	42
	LITERATUUR.....	42

DIFISEK: WP1: Thermische & mechanische belastingen

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre
PROFILARBED S.A., Esch/Alzette, Luxemburg

1. INLEIDING

Naar aanleiding van ernstige branden zoals de brand in het warenhuis “Innovation” in Brussel (meer dan 300 doden) en de discotheek “De 5-7” in Saint-Laurent-du-Pont in Frankrijk, zijn in de zestiger jaren overal in Europa nieuwe brandveiligheidsregelingen ingevoerd

De huidige regelingen hebben betrekking op verschillende onderwerpen, waaronder:

- De vluchtwegen: sommige normen schrijven het aantal nooduitgangen voor, de karakteristieken van de “uit”-bordjes, het aantal (vlucht)trappenhuizen, de breedte van deuren, enz.
- De uitbreiding van brand: onderscheid moet worden gemaakt tussen uitbreiding binnen de brandruimte (zgn. “brandvoortplanting”) en uitbreiding naar andere ruimten (zgn. “brandoverslag” indien deze uitbreiding via de buitenlucht plaats vindt of “branddoorslag” indien dit niet het geval is); de brandwerendheid met betrekking tot de scheidende functie is een eigenschap van constructieonderdelen die een belangrijke rol speelt bij de Weerstand tegen Branddoorslag en Brandoverslag (WBDBO).
 - De bijdrage tot de brandvoortplanting bepaalt de mate waarin bouwproducten bijdragen tot de ontwikkeling van de brand.
 - Brandcompartimenten worden begrensd door “brandwerende” vloeren en wanden, incl. eventueel aanwezige deuren; er worden grenzen gesteld aan de afmetingen van brandcompartimenten, de hoogte van borstweringen enz.
- De brandwerendheid m.b.t. bezwijken: dit is een eigenschap van dragende constructieonderdelen; in de praktijk gelden eisen van 20, 30, 60, 90 en 120 minuten.
- Rook- en warmteafvoersystemen (RWA)
- Actieve brandveiligheidsmaatregelen: gedacht moet hierbij worden aan handblussers, rookmelders, sprinklers enz.
- Toegankelijkheid voor de brandweer.

Ook al vertonen de algemene opvattingen over brandveiligheid binnen Europa veel overeenkomsten, toch leidt dit tot grote verschillen in concrete eisen. Dit is onderzocht in het kader van het NFSC-1 project¹ [11]. De uitkomsten van dit project zijn geactualiseerd in het EGKS project “Risk Based Fire Requirements”, dat recent is afgesloten [18]. Zo kan de brandwerendheids eis voor gebouwen met slechts één bouwlaag in Spanje oplopen tot 120 minuten, terwijl in Zwitserland geen eis geldt. Voor lage kantoorgebouwen in Nederland kan – onder omstandigheden – de brandwerendheids eis beperkt blijven tot 60 minuten; in Frankrijk

¹ NFSC: Natural Fire Safety Concept (Natuurlijk Brandveiligheid Concept)

wordt al gauw 120 minuten gevraagd [11]. De belangrijkste factoren waarop de eisen worden gebaseerd zijn de hoogte van het gebouw en het gebruik ervan.

In het ideale geval zou, bij het stellen van brandwerendheidseisen, rekening gehouden moeten worden met de volgende omstandigheden:

- de brand zelf (d.w.z. de kans op brand, de mogelijkheden van branduitbreiding, de brandduur, de aanwezigheid van brandbaar materiaal (hoeveelheid, verdeling), de intensiteit van de brand (afbrandsnelheid)
- de ventilatiecondities
- de brandcompartimentering (aard, omvang, geometrie)
- de aard van de dragende constructieonderdelen
- de vluchtmogelijkheden
- de veiligheid van brandweer en andere hulpverleners
- het gevaar voor de omringende bebouwing
- de actieve brandveiligheidsmaatregelen.

Dit is echter, zoals uit het onderzoek beschreven in [11], [18] blijkt, vooralsnog niet het geval: zo zijn de de brandwerendheidseisen met of zonder toepassing van sprinklers, op een paar uitzonderingen na, identiek.

Teneinde de bovenstaande factoren op een systematische wijze in rekening te brengen is een meer realistische en geloofwaardige benadering voor de constructieve brandbeveiliging ontwikkeld, rekening houdend met actieve brandveiligheidsmaatregelen en uitgaande van realistische brandomstandigheden. Deze benadering is gebaseerd op het Natuurlijk Brand Concept zoals ontwikkeld in een serie EGKS projecten [11], [12], [13], [18] en maakt gebruik van statistische en deterministische technieken. Ze is in beginsel toepasbaar op alle constructieve systemen & materialen en op alle gebouw-categorieën.

In fig. 1.1 worden de “natuurlijke” brandkrommen in de verschillende configuraties (afmetingen brandcompartiment, vuurbelasting, thermische isolatie van de omhullende constructie, aard van het brandbaar materiaal, enz.) vergeleken met de standaardbrand-kromme.

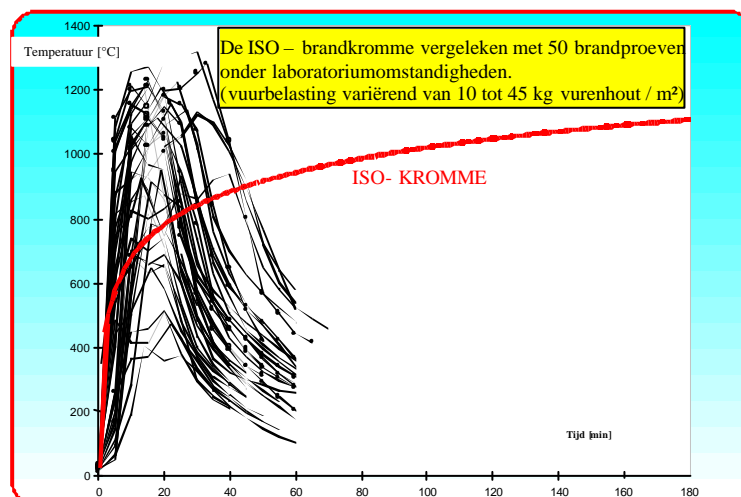


Fig 1.1: Temperatuur-tijdkrommen voor natuurlijke branden en volgens ISO

Fig. 1.1 illustreert de moeilijkheden die men ondervindt bij het begrijpen van het gedrag van constructie-elementen onder realistische brandomstandigheden, indien slechts informatie op basis van de standaardbrandkromme ter beschikking staat. Het blijkt dat het verloop van een natuurlijke brand slechts zeer schematisch door de standaardbrand wordt beschreven. Het karakteristieke verloop van een realistische brand is weergegeven in fig. 1.2. Te onderscheiden zijn:

- de smeulfase: de temperatuurontwikkeling tijdens de eerste fase van de brand (ontsteken, smeulen) is vaak moeilijk in te schatten; deze fase is in fig. 1.1. niet weergegeven.
- de groeifase: de duur van deze fase, die voorafgaat aan (eventuele) vlamoverslag, hangt voornamelijk af van de aard en positie van de in de brandruimte aanwezige materialen; in deze fase zal slechts sprake zijn van een plaatselijke brand.
- vlamoverslag: als gevolg van vlamoverslag (d.w.z. explosieve uitbreiding van de brand in de ruimte van ontstaan) zal de gehele brandruimte in brand geraken.
- de volledig ontwikkelde brand: de duur van deze fase, die aanvangt met het (eventueel) optreden van vlamoverslag, hangt met name af van de vuurbelasting en de ventilatiecondities;
- de dooffase: na verloop van tijd neemt de intensiteit van de brand af, tot het aanwezig brandbare materiaal is opgebrand.

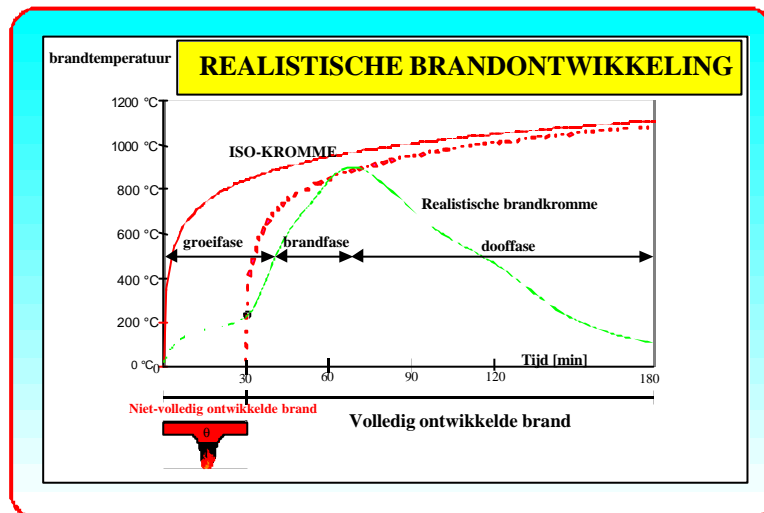


Fig. 1.2: De verschillende fasen van een natuurlijke brand

2. ALGEMENE OPZET

2.1 *Inleiding*

De bepaling van de temperatuurontwikkeling in een brandruimte vergt kennis van een groot aantal parameters. Een aantal daarvan wordt vastgelegd door de bekend veronderstelde eigenschappen van het gebouw. Echter, de belangrijkste eigenschap - de "vuurbelasting" - hangt in het algemeen af van het gebruik, en zal variëren tijdens de levensduur van een gebouw. Daarom dient de vuurbelasting als een statistische grootheid te worden geïnterpreteerd. Dat geldt overigens ook voor de parameters voor het ontwerp onder normale gebruiksomstandigheden (kamertemperatuur), zoals de belasting door eigen gewicht, de veranderlijke belasting, wind enz. Om deze reden is besloten de brandveiligheid van gebouwen langs probabilistische weg te benaderen. In het Natuurlijk Brandconcept wordt uitgegaan van een acceptabele faalkans als doelstelling van de brandbeveiliging. Het doel is niet om het veiligheidsniveau zoals dat thans wordt gerealiseerd te verlagen, maar om vrij te zijn in de wijze waarop dit niveau wordt bereikt, uitgaande van een zekere, realistische kans op bezwijken of veiligheidsindex. Bijvoorbeeld, als alternatief voor de huidige maatregelen, die veelal uitsluitend zijn gebaseerd op passieve brandveiligheidsmaatregelen, zou gekozen moeten kunnen worden uit een combinatie van actieve en passieve maatregelen.

De ontwerpwaarde van de vuurbelasting wordt vervolgens gebruikt in de brandmodellen, waarmee het temperatuurverloop in het brandcompartiment kan worden berekend. Dit temperatuurverloop vormt de basis voor de beoordeling van het constructiegedrag bij brand.

2.2 *Doelstellingen*

Het doel is het bereiken van een acceptabel veiligheidsniveau. Wat in dit verband acceptabel is kan worden beoordeeld door het brandrisico te vergelijken met andere maatschappelijke risico's. Eén van deze geaccepteerde risico's is het risico op instorten van een gebouw onder normale gebruiksomstandigheden. Hiervoor wordt wel een grenswaarde aangehouden van $7,23 \times 10^{-5}$, betrokken op de levensduur van het gebouw [10]. Uitgangspunt is nu:

$$P_f (\text{kans op bezwijken door brand}) \leq P_t (\text{acceptabele kans})$$

Zoals is vastgelegd in de Eurocodes, mag brand worden beschouwd als een incidentele belasting. Een uitgebreid statistisch onderzoek is ingesteld naar de kans op het ontstaan van brand. Deze kans is sterk afhankelijk van het gebruik van het gebouw. De statistische informatie uit verschillende Europese landen blijkt in dit verband goed overeen te stemmen [11]. Gegeven het ontstaan van brand, kan bezwijken van de constructie alleen maar optreden indien de brand kan uitgroeien tot een volledig ontwikkelde brand. Dit is het geval indien vlamoverslag optreedt. Het is van belang om de kans dat dit gebeurt, vast te stellen. In de fase voorafgaand aan vlamoverslag kunnen de aanwezigen, de brandweer en de actieve brandveiligheidsmaatregelen een belangrijke rol spelen. Dit betekent dat in veel gevallen de brand in een vroeg stadium wordt geblust en brandoverslag nooit wordt bereikt. Op basis van beschikbare statistieken, is een schatting gemaakt van het effect van het ingrijpen van de brandweer en van de actieve brandveiligheidsvoorzieningen op de kans op vlamoverslag.

Samenvattend: rekening houdend met actieve maatregelen (automatische melding, blussing), passieve maatregelen (compartimentering), het gebruik van het gebouw, alsmede met de interventie door de brandweer, wordt een ontwerpwaarde voor de vuurbelasting berekend op basis van de als acceptabel beschouwde kans op instorten van het gebouw als gevolg van brand. Voor details wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

2.3 *Methoden ter bepaling van de brandontwikkeling*

De berekening van de brandontwikkeling kan op verschillende niveaus plaats vinden:

- Eenvoudige modellen: het betreft hier voornamelijk parametrische branden
- Zone-modellen: in dergelijke modellen wordt in beginsel rekening gehouden met de belangrijkste parameters die het brandverloop bepalen.
- Veldmodellen: veelal te ingewikkeld als ontwerpgereedschap, echter noodzakelijk bij de beoordeling van de brandveiligheid van gebouwen met een uitzonderlijke vormgeving [19]

In één-zonemodellen wordt uitgegaan van een uniforme temperatuurverdeling in de brandruimte. In twee-zonemodellen wordt stratificatie verondersteld onder invloed van een plaatselijke brand.

De belangrijkste parameter is de hoeveelheid energie die per eenheid van tijd ten gevolge van de brand vrijkomt, de zgn. “afbrandsnelheid” (eng.: Rate of Heat Release, RHR). De afbrandsnelheid wordt uitgedrukt in MW, varieert als functie van de tijd en is afhankelijk van factoren zoals de afmetingen van de vuurhaard, de hoeveelheid en de aard van de toegepaste materialen en de geometrie van de brandruimte. In eerste instantie zal er sprake zijn van een niet volledig ontwikkelde, plaatselijke brand, d.w.z.: er heeft nog geen vlamoverslag plaats gevonden. In deze groeifase wordt vaak uitgegaan van een lineaire uitbreiding van de brand, uitsluitend in een horizontaal vlak. Ook wordt verondersteld dat de afbrandsnelheid per eenheid van brandoppervlak constant is. Dit leidt tot een afbrandsnelheid die kwadratisch verloopt met de tijd; zgn. $(t/t_a)^2$ -branden, waarbij t de tijd en t_a een tijdconstante is. Hoe groter de waarde van de tijdconstante t_a , des te trager ontwikkelt zich de brand. Gebouwen worden m.b.t. de branduitbreidingsnelheid in de groeifase onderverdeeld in 4 categorieën: traag, matig, snel en ultra-snel. Bij de overgang van de groeifase naar de stationaire fase zal de afbrandsnelheid een maximale waarde bereiken. Deze waarde wordt bepaald door de maximaal voor de verbranding beschikbare hoeveelheid zuurstof (ventilatie-beheerste branden) of door verbrandingscondities aan het oppervlak van de brandende materialen (brandstof-beheerste branden). Bij de berekening van het brandverloop gaat het erom aan te geven hoe de afbrandsnelheid zich als functie van de tijd ontwikkelt. Daarbij is het van groot belang of vlamoverslag al dan niet zal optreden. Dit kan beoordeeld worden op basis van de uitkomsten van de berekeningen met het twee-zonemodel.

Het kan voorkomen dat de voorwaarden voor vlamoverslag niet worden bereikt of dat de brand zich anderszins niet over de hele brandruimte kan uitbreiden. Onder deze omstandigheden wordt een twee-zone model gebruikt om de condities in de rooklaag (temperatuur, dikte) te beschrijven. De temperatuur in de rooklaag direct boven de brandhaard, zal hoger zijn dan op enige afstand daarvan. Dit effect wordt in rekening gebracht door de door Hasemi in dit verband experimenteel afgeleide regels [17], te combineren met een bestaand twee-zone model. Voor achtergronden van het aldus ontwikkelde, aangepaste twee-zone model wordt verwezen naar [8].

Op deze wijze kan, door afhankelijk van de omstandigheden gebruik te maken van het (aangepaste) twee-zone model of van het één-zone model, de thermische belasting op de constructie onder natuurlijke brandomstandigheden worden berekend.

2.4 *Constructiegedrag bij brand*

Bij bekend veronderstelde thermische belasting kan het netto warmtetransport naar en het temperatuurverloop in de constructie worden berekend. Hiertoe staan rekenmodellen ter beschikking, waarbij gekozen kan worden uit verschillende niveaus van fysische modellering en nauwkeurigheid. Uit het temperatuurverloop in de constructie kan, in combinatie met de

mechanische belasting zoals die tijdens brand moet worden verwacht, het constructiegedrag bij brand worden bepaald. Ook hiervoor zijn vele rekenmodellen beschikbaar, met verschillende niveaus van verfijning.

In eenvoudige modellen wordt uitgegaan van een uniforme temperatuur-verdeling in de constructie. Bezwijken wordt geacht op te treden indien deze temperatuur een zekere kritieke waarde overschrijdt. Er is sprake van een "go – no-go" situatie.

In meer geavanceerde modellen, bijvoorbeeld gebaseerd op de eindige elementenmethode (FEM), kan een genuanceerd inzicht worden verkregen in de temperatuurverdeling in en de vervorming van constructies of onderdelen daarvan bij brand. Ten aanzien van de criteria ter beoordeling van het brandgedrag van constructies, kan uit verschillende opties worden gekozen: geen bezwijken tijdens brand (bijv.: hoge woongebouwen), voorkómen van voortschrijdende instorting (bijv.: uitgestrekte industriegebouwen), beperken van vervormingen (bijv. in verband met hergebruik), enz.

Voor een nadere bespreking van deze modellen wordt verwezen naar deel 3 van de syllabus.

2.5 *Noodzakelijke gegevens*

Teneinde de ontwikkelde methode te kunnen toepassen, moet een groot aantal gegevens van het gebouw bekend zijn. Een centrale rol hierbij speelt de brandruimte. Daaruit volgt dat de brandruimte goed moet worden omschreven, niet slechts met betrekking tot de geometrie ervan, maar ook waar het de thermische eigenschappen van de omhullende constructie (i.v.m. warmteoverdracht naar de omgeving via geleiding) en raam- en deuropeningen (i.v.m. warmteoverdracht naar de omgeving via straling en convectie) betreft. Hierop wordt in hoofdstuk 3 teruggekomen. In dit hoofdstuk wordt ook ontwerp-informatie verschaft in de vorm van vuistregels en tabellen.

3. EIGENSCHAPPEN VAN DE BRANDRUIMTE

3.1 *Inleiding*

In het “Natuurlijk Brandconcept” 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 standaardbrand - parameters 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 het “credible worst case”, d.w.z. de meest kritische situatie die denkbaar is wordt niet a-priori geanalyseerd; ook de kans dat zo'n situatie zal optreden wordt gewogen. Indien de ontwerp-brandscenario's zijn vastgelegd, kan begonnen worden met het berekenen van de thermische belasting.

3.2 *Constructie-onderdelen die de brandruimte omhullen*

In het Natuurlijk Brandconcept wordt de brandontwikkeling in 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 ter beschikking:

- Ad-hoc proeven

De scheidingsconstructie (wand, vloer, deur, enz.) wordt blootgesteld aan een temperatuur-tijd-kromme zoals berekend voor het maatgevend brandscenario's.

- Deskundig oordeel

Bij deze benadering wordt gebruik gemaakt van resultaten van standaard brandwerendheidsproeven.

- Directe toepassingen van het ISO classificatiesysteem

In de nationale regelgevingen worden aan scheidingsconstructies zekere 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.

3.3 *De thermische eigenschappen van wanden*

De warmteverliezen vanuit de brandruimte hebben een belangrijke invloed op het verloop van de brandtemperatuur. Warmteverliezen naar de omhullende constructieonderdelen treden op onder invloed van convectie en straling. De thermische eigenschappen van de betreffende constructiedelen moeten bekend zijn. De volgende materiaaleigenschappen spelen hierbij een rol:

- de warmtecapaciteit, c_p
- de dichtheid, ρ
- de warmtegeleiding, λ

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

$$b = \sqrt{I \cdot r \cdot c_p} \quad \dots (3.1)$$

Voor de berekening van de b -factor mag voor de dichtheid ρ , de warmtecapaciteit c_p en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ uitgegaan worden van kamertemperatuurwaarden [1].

In het geval van sandwich-constructies kan niet meer worden uitgegaan van deze eenvoudige formule, maar moet de b -factor als volgt worden bepaald:

- indien de b -factor van het niet direct blootgesteld materiaal (2) groter is dan die van het direct blootgesteld materiaal (1), d.w.z. $b_2 > b_1$, geldt voor de b -factor van de sandwich: $b = b_1$;
- in het andere geval, d.w.z. $b_2 < b_1$, hangt de b -waarde van de sandwich samen met de navolgende grenswaarde voor de dikte van materiaal (1):

$$s_{1,lim} = \sqrt{\frac{t_d I_1}{c_1 r_1}}, \text{ waarbij } t_d \text{ de brandduur is tot aan het begin van de doofperiode.}$$

De b -waarde volgt nu uit:

- indien $s_1 > s_{1,lim}$: $b = b_1$
- indien $s_1 < s_{1,lim}$: $b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}}\right) b_2$

Tabel 3.1 geeft de thermische eigenschappen van een aantal veel gebruikte materialen als functie van de temperatuur.

3.4 Openingskarakteristieken

Openingen in de omhullende constructie van een brandruimte kunnen bestaan uit raam-, deur- en ventilatieopeningen. De duur en intensiteit van de brand hangen o.m. af van de grootte van deze openingen.

Voor de openingsfactor O , gebruikt in eenvoudige modellen en geldig voor enkelvoudige verticale openingen, geldt:

$$O = A_w \sqrt{H} \quad \dots (3.3)$$

Indien meerdere verticale openingen aanwezig zijn, moet worden uitgegaan van het totale oppervlak in combinatie met een equivalente hoogte. Er geldt:

$$A_{w,tot} = \sum A_{wi}$$

en

$$H_{eq} = \left[\frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}} \right]^2$$

waarbij $A_{w,tot}$ de totale oppervlakte is van de openingen, H_i de hoogte van de i^{de} opening.

TABEL 3.1: Overzicht van de thermische eigenschappen van verschillende bouw-materialen onder brandomstandigheden

materiaal	temperatuur (°C)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)
grindbeton	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
lichtgewicht-beton	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
staal	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
gips	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
mortel	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
calcium-silicaatplaten	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
hout	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
metselwerk	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
glas	20	0,78	2700	840

3.5 Mechanische ventilatie

Meer en meer wordt gebruik gemaakt van overdruksystemen (m.n. voor de bescherming van trappenhuisen) en van mechanische ventilatie (m.n. voor rook- en warmteafvoer).

4. BRANDKARAKTERISTIEKEN

In dit hoofdstuk zal de informatie worden besproken, die nodig is voor het (constructieve) brandveiligheidontwerp. In de eerste plaats is het nodig vast te stellen hoeveel warmte er tijdens brand in een gebouw vrij kan komen. 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 mogelijke 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.

4.1 Vuurbelasting

Allereerst moet worden vastgesteld hoe groot de vuurbelasting is die bij het brandveiligheidontwerp in rekening moet worden gebracht. In het algemeen moet deze hoeveelheid langs statistische weg worden ingeschat.

4.1.1 Deterministische benadering

De vuurbelasting in een ruimte is de totale hoeveelheid energie die bij brand in zo'n ruimte vrij komt. 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 (bijv.: bekleding van wanden en plafonds) als de inhoud van het gebouw (bijv.: meubels) leveren een bijdrage tot de vuurbelasting. Gewoonlijk wordt de vuurbelasting uitgedrukt per m² vloeroppervlak. Notatie q_f . In Eurocode 1 wordt de vuurbelasting als volgt gedefinieerd:

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum_i (\Psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad \dots (4.1)$$

met:

M_i = de massa van materiaal i [kg];

H_{ui} = de verbrandingswarmte van materiaal i [MJ/kg] (zie tabel 4.1)

m_i = een factor die het verbrandingsgedrag beschrijft, betrokken op materiaal i [-].

Ψ_i = een factor die de mate van bescherming beschrijft, betrokken op materiaal i [-]

A_f = de vloeroppervlakte van de brandruimte [m²]

De getalswaarde van $H_{ui} \cdot M_i$ vertegenwoordigt de totale hoeveelheid energie die bij volledige verbranding van materiaal i vrijkomt. De 'm'-factor is een dimensieloze grootheid, met een waarde tussen 0 en 1, waarmee de efficiëntie van de verbranding wordt aangegeven: $m = 1$ correspondeert met een volledige verbranding en $m = 0$ met een situatie waarin materialen in het geheel niet tot de brand bijdragen. Voor gebruikelijke situaties wordt voorgesteld om uit te gaan van $m = 0,8$. Voor vurenhout kan H_{ui} -waarde van 17.5 MJ/kg worden aangenomen, dus: $mH_{ui} = 14$ MJ/kg.

Tabel 4.1: Aanbevolen waarden voor H_{ui} [MJ/kg], aan te houden voor de berekening van de vuurbelasting

Vaste stoffen	
Hout	17,5
Andere materialen op cellulosebasis Kleding, katoen, wol, zijde Kurk Papier, karton Stro	20
Koolstof • Houtskool • Antraciet, steenkool	30
Chemicaliën	
Paraffine-groep • Methaan • Ethaan • Propaan • Butaan	50
Olefine groep • Ethyleen, propyleen, buteen	45
Aromaten • Benzeen, toluen	40
Alcoholen • Methanol, ethanol, ethyl alcohol	30
Vloeistoffen • Gasoline, petroleum, diesel	45
Plastics (zuivere koolwaterstoffen) • Polyethyleen, Polystyreen, Polypropreen	40
Overige producten	
ABS (plastic)	35
Polyester (plastic)	30
Polisocyaneraat en poliurethaan (plastics)	25
Polyvinyl chloride, PVC (plastic)	20
Bitumen, asfalt	40
Leer, linoleum	20
Rubber banden	30

4.1.2 Statistische benadering

Voor bepaalde categorieën gebouwen, bijvoorbeeld kantoren, scholen enz., is sprake van een zekere statistische verdeling van de vuurbelasting. In dergelijke gevallen kan de grootte van de vuurbelasting worden gekarakteriseerd door een gemiddelde waarde en een standaardafwijking. Deze karakteristieken zijn in tabel 4.2 weergegeven voor verschillende categorieën gebouwen. De waarden zijn gebaseerd op de ggn. Gumbel I verdeling. De waarden (voor onderschrijdingskansen

van 80, 90 en 95%) zijn berekend voor een variatiecoëfficiënt van 0.3 en kunnen worden opgevat als een samenvatting van in de internationale literatuur geaccepteerde waarden [2, 21, 22].

Tabel 4.2: Gegevens m.b.t. de vuurbelasting van verschillende gebouwtypen in MJ/m² (overeenkomstig een Gumbel I verdeling)

	standaard-afwijking	gemiddelde	80% fractiel	90 % fractiel	95 % fractiel
woning	234	780	948	1085	1217
ziekenhuis	69	230	280	320	359
hotel (kamer)	93	310	377	431	484
bibliotheek	450	1500	1824	2087	2340
hotel (standaard)	126	420	511	584	655
school	85,5	285	347	397	445
winkelcentrum	180	600	730	835	936
theater, bioscoop	90	300	365	417	468
transportgebouw (publieke ruimte)	30	100	122	139	156

4.2 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 branden die opzettelijk zijn aangestoken (en die buiten [het](#) bestek van deze syllabus 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 4.3: 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: boven heet, onder koud
volledig ontwikkelde brand	De brand woedt in de gehele ruimte	Eén temperatuur zone

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. In het kader van het project is een methode ontwikkeld waarmee het temperatuurverloop tijdens brand, dat als uitgangspunt dient voor de beoordeling van de constructieve brandveiligheid, zowel onder omstandigheden van een “plaatselijke” als van een “volledig ontwikkelde” brand, kan worden bepaald. Voor details van deze methode wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

4.2 De ontwerpbrand

Indien de maatgevende vuurbelasting is vastgesteld, moet nagegaan worden hoe snel het brandbare materiaal verbrandt. Hiertoe wordt het begrip “afbrandsnelheid” ingevoerd¹.

4.2.1 Brandstofbeheerste en ventilatiebeheerste branden

Door de vuurbelasting 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.

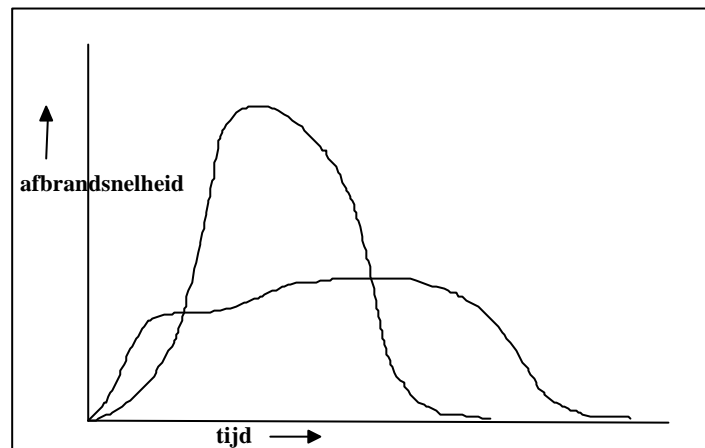


Fig. 4.1: Verschillende krommen voor de afbrandsnelheid bij eenzelfde vuurbelasting

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 afmetingen van de openingen van de brandruimte zijn van dien aard, dat de hoeveelheid zuurstof de beperkende factor is bij de brandontwikkeling; gesproken wordt van een **ventilatie-beheerste** brand.

Zowel tijdens een brandstof-beheerste als tijdens een ventilatie-beheerste brand kan vlamoverslag optreden.

Het verschijnsel vlamoverslag markeert de overgang tussen een plaatselijke en een volledig ontwikkelde brand. Een illustratie van de twee regimes is gegeven in fig. 4.2, waarin de afbrandsnelheid is weergegeven als functie van de ventilatie-parameter $A_w \sqrt{h}$, met A_w de oppervlakte en h de hoogte van de raamopening. 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 o.m. door de vuurbelasting wordt bepaald. Bij verdere toename van de ventilatie blijkt de afbrandsnelheid bij benadering constant te blijven (brandstof-beheerste omstandigheden).

¹ In het Engels wordt hiervoor de term Rate of Heat Release gebruikt, afgekort RHR.

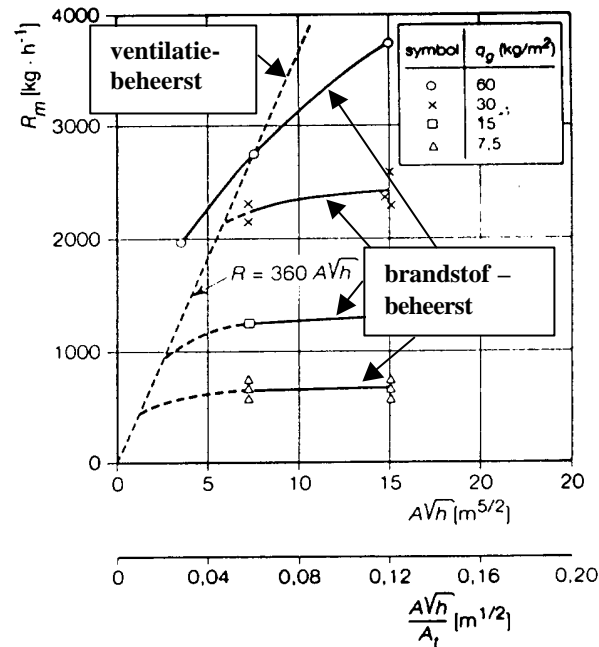


Fig. 4.2: Afbrandsnelheid, uitgedrukt in kg/h, voor verschillende waarden van de vuurbelasting in kg vurenhout /m2 vloeroppervlak, als functie van de ventilatie

4.3.2 Ontwerpwaarden voor de afbrandsnelheid

De toename van de afbrandsnelheid tot de maximumwaarde (zie fig. 4.3) wordt weergegeven door:

$$RHR = (t / t_a)^2 \quad \dots (4.2)$$

met:

RHR = afbrandsnelheid gedurende de groeifase in MW

t = tijd in s

t_α = tijdconstante volgens tabel 4.3 in s

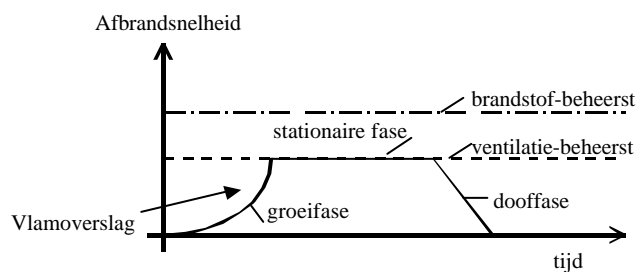


Fig. 4.3: Afbrandsnelheid als functie van de tijd

Er worden drie fasen onderscheiden: de groeifase, de stationaire fase (na vlamoverslag) en de dooffase.

De tijdconstante t_α die - zoals voorgesteld in [1], [2] - de groeifase bepaalt, is afhankelijk van het type gebouw. Voor nadere informatie hierover wordt verwezen naar fig. 4.4.

Na de groeifase bereikt de afbrandsnelheid een maximaal niveau met een waarde die correspondeert met hetzij ventilatie-beheerste, hetzij brandstof-beheerste condities. Zie het plateau in figuur 4.4.

Daarna begint de dooffase. In [1], [2] en [7] wordt verondersteld dat de afbrandsnelheid in deze fase lineair afneemt met de tijd. Regels worden gegeven waaruit kan worden afgeleid wanneer de doofperiode begint en hoe lang deze duurt. Uitgaande van resultaten van proeven, wordt aangenomen dat de doofperiode begint indien ongeveer 70% van het aanwezige brandbare materiaal is verbrand.

In fig. 4.4 is een ontwerpkromme voor de afbrandsnelheid weergegeven, zoals wordt voorgesteld in het project "Natuurlijk brandconcept". In deze kromme herkent men de hiervoor besproken groeifase, de stationaire fase en de dooffase.

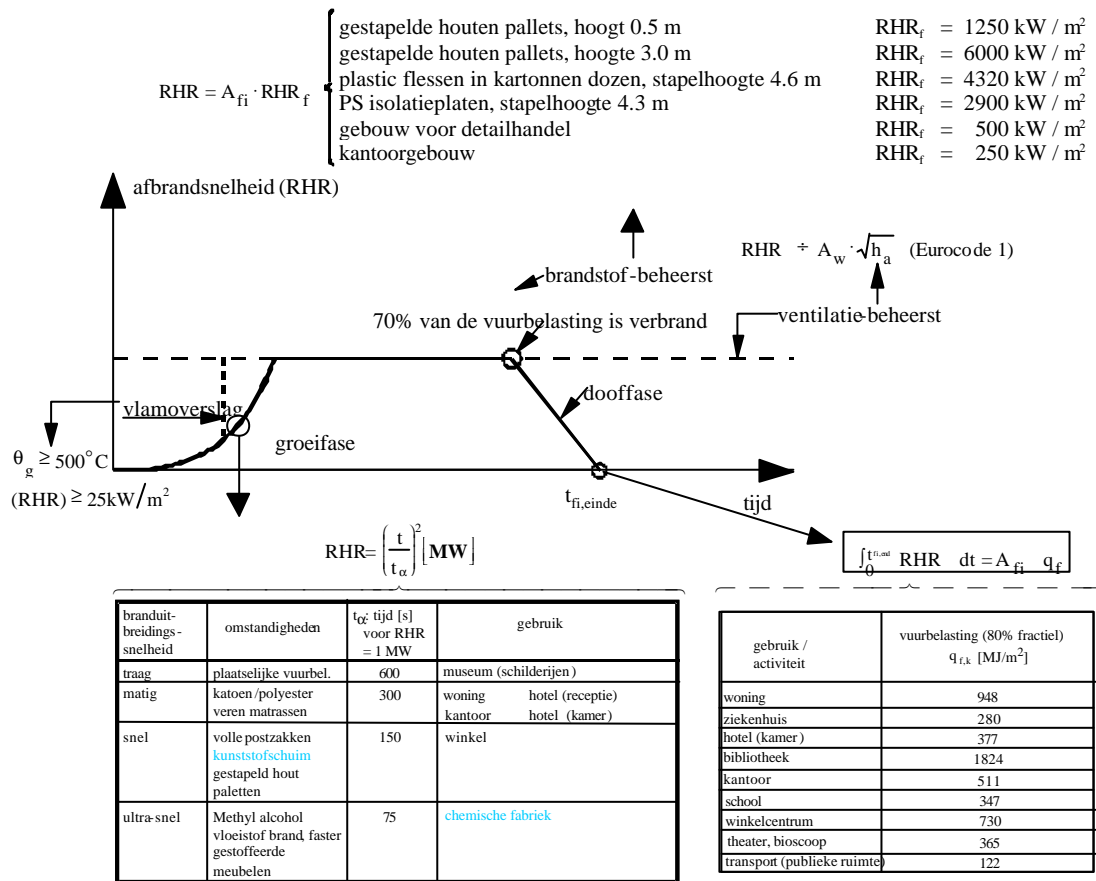


Fig. 4.4: Ontwerpkromme voor de afbrandsnelheid

4.3.3 Experimentele gegevens

Als alternatief voor de hiervoor besproken wijze om het verloop van de afbrandsnelheid met de tijd te vinden, kan ook worden uitgegaan van proeven. Een betrouwbare techniek om de afbrandsnelheid te meten is eerst – met het ontwikkelen van het principe van de zuurstofdepletie - recentelijk ter beschikking gekomen. Eerdere technieken vereisten de meting van de enthalpie, hetgeen in de praktijk grote problemen oplevert.

Uitgangspunt van de zuurstofdepletie -techniek is dat – binnen een smalle bandbreedte – de de energie die vrijkomt bij verbranding van de gebruikelijke materialen evenredig is met de zuurstof die voor deze verbranding nodig is, e.e.a. onafhankelijk van de aard van het materiaal [6]. Deze hoeveelheid zuurstof kan relatief eenvoudig worden gemeten tijdens brandproeven. De resultaten van dergelijke proeven zijn beschikbaar in de vorm van databases. Zie bijvoorbeeld [3], [4], [5] en [6].

In het 2-zone model Hazard [5] is een gegevensbestand opgenomen waarin, voor verschillende producten, waarden voor de afbrandsnelheid - en de omstandigheden waaronder deze zijn vastgesteld - zijn weergegeven. Het betreft hier in het algemeen slechts producten die in een huiselijke omgeving voorkomen, bijvoorbeeld stoelen, televisietoestellen, kerstbomen, enz. Alhoewel hiermede het directe toepassingsgebied van Hazard nogal beperkt is, vormt dit model toch een belangrijke bron van informatie omdat voor de beschikbare producten het volledige verloop van de afbrandsnelheid wordt beschreven. Ook in de brandsimulatiecode Argos [4] is een gegevensbestand opgenomen, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen branden met vaste en thermoplastische materialen en vloeistofbranden. Ook wordt informatie verstrekt over smeulbranden. Het verloop van de afbrandsnelheid wordt afhankelijk gesteld van de uitbreidingsnelheid van de brand (verticaal/horizontaal) en wordt in numerieke vorm gegeven. Een andere bron van experimentele gegevens is het document “Initial Fires”, samengesteld door de universiteit van Lund in Zweden [3]. Hier wordt gebruik gemaakt van dezelfde structuur als in het Hazard gegevensbestand, maar er worden meer details gegeven, terwijl ook het toepassingsgebied meer uitgebreid is: niet slechts producten voor huiselijk gebruik zijn opgenomen, ook informatie m.b.t. voertuigen e.d. wordt gegeven.

Bij het CTICM in Frankrijk zijn afbrandsnelheidproeven uitgevoerd op nieuwe personenwagens (bouwjaar 1996) [9] en op inventarisgoederen, zoals aanwezig in hotels. Dergelijke proeven zijn buitengewoon interessant, omdat het merendeel van de proeven zoals in de literatuur zijn beschreven, uitgevoerd is met houtkribben als brandstof.

5 PROBABILISTISCHE ASPECTEN

5.1 *Inleiding*

Het zal duidelijk zijn dat de kans dat een brand uitbreekt in een zwembad aanzienlijk geringer is dan in een verffabriek. Bovendien zal de kans dat zo'n beginnende brand zich uitbreidt en leidt tot een volledig ontwikkelde brand, afhangen van de oppervlakte van het brandcompartiment alsmede van de actieve brandbeveiligingsmaatregelen zoals sprinklers, automatische detectie (op basis van rook of warmte), automatische melding aan de brandweer en het optreden van de brandweer zelf.

Op basis van statistische informatie verzameld in diverse EGKS projecten is het thans mogelijk de kans aan te geven op:

- het ontstaan van brand;
- het falen van pogingen door de aanwezigen om de brand te blussen;
- het falen van actieve maatregelen (sprinklerinstallaties enz.) om de brand te beheersen;
- het falen van pogingen door de brandweer tot beheersing van de brand.

De kans op succes van ingrijpen door de brandweer hangt in belangrijke mate af van de tijd, nodig om de brand te ontdekken (automatische rook- of warmtedetectie) en van de tijd nodig om de brand te bereiken (automatische alarmering en afstand tot de brand).

Op een zelfde wijze als is gebeurd in Annex C van prENV 1990 [10], is het mogelijk om uit deze kansen reductiefactoren $\delta_{q,f}$ af te leiden voor de vuurbelasting. Ook kunnen deze kansen als uitgangspunt dienen voor betrouwbaarheidsberekeningen. De betreffende procedure is weergegeven in paragraaf 5.4.

De reductiefactor $\delta_{q,f}$ is onderverdeeld in componenten δ_{q1} , δ_{q2} , δ_{ni} om de omvang van de brandruimte, het gebruik van het gebouw en de verschillende mogelijkheden van actieve brandbeveiliging in rekening te brengen. De karakteristieke vuurbelasting $q_{f,k}$ moet worden vermenigvuldigd met $\delta_{qf} = \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{ni}$ om de ontwerpvuurbelasting $q_{f,d}$ te verkrijgen. De ontwerpvuurbelasting wordt vervolgens gebruikt in de brandmodellen (zie hoofdstuk 6) om het temperatuurverloop gedurende een natuurlijke brand te berekenen.

5.2 *Statistiek*

Het statistisch onderzoek is gebaseerd op informatie uit:

- Zwitserland: gedetailleerde informatie over en analyse van alle branden (ca. 40.000!) met een schade groter dan 1 MCHF in Bern over de periode van 1986 tot 1996;
- Frankrijk: branden in industriële gebouwen over een periode tussen januari 1983 tot februari 1984, alsmede alle interventies door de brandweer in het jaar 1995 (d.w.z. 3.253.855 interventies, waarvan 312.910 in verband met branden);
- Nederland: branden in industriële gebouwen over de periode tussen januari 1983 tot januari 1985;
- Finland: alle branden in gebouwen in het jaar 1995 (d.w.z. 2.109 branden op een totaal aantal van 1.150.494 gebouwen);
- rapporten van de Luxemburgse brandweer over de jaren 1995 en 1997,

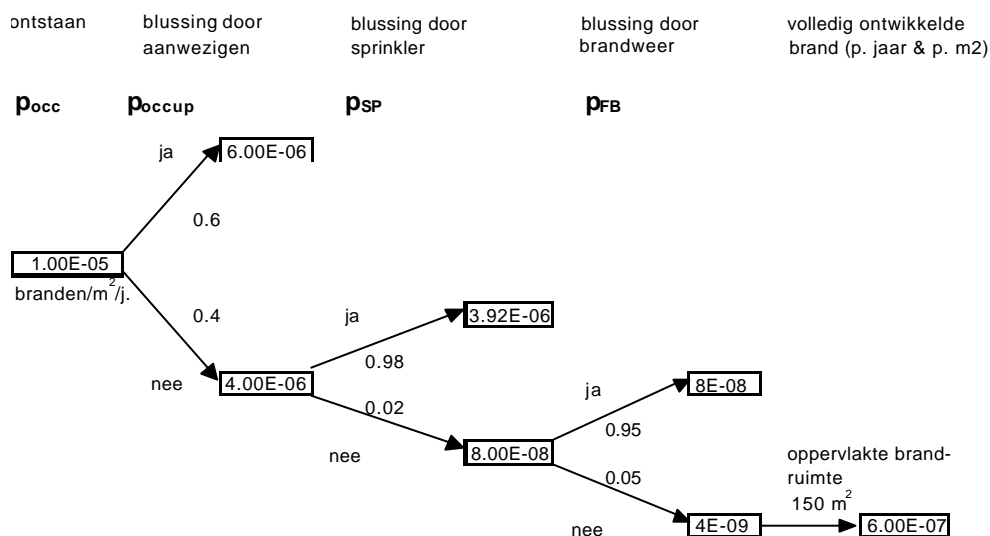
alsmede op internationale gegevens uit verschillende bronnen en met betrekking tot verschillende aspecten van de brandveiligheid, met name echter op het gebied van sprinklers. Zo is

systematische informatie met betrekking tot sprinklers verzameld uit de Verenigde Staten, Finland, Duitsland, Frankrijk, Australië en het Verenigd Koninkrijk [13]. De hierna besproken statistische gegevens hebben voornamelijk betrekking op woningen, kantoren en industriële gebouwen. In paragraaf 5.4 is uitgegaan van kantoren voor het ontwikkelen van een procedure. Deze procedure is uitgebreid naar andere gebouwfuncties met behulp van een classificatie zoals weergegeven in tabel 5.6.

5.3 Waarschijnlijkheid

5.3.1 De gebeurtenissenboom

Een gebeurtenissenboom (zie figuur 5.1) kan worden samengesteld om de ontwikkeling van brand te beschrijven, te beginnen met het ontstaan van brand en uitgaande van aanbevolen



standaardkansen zoals weergegeven in tabel 5.1.

Fig. 5.1: Voorbeeld van een gebeurtenissenboom voor de brandontwikkeling in een kantoor met een brandcompartiment met een vloeroppervlakte van 150 m²

De volgende waarden worden aanbevolen:

Tabel 5.1: Kansen in een gebeurtenissenboom

		woning	kantoor	industrie - gebouw
Ontstaan van brand [1/(m ² .jaar)]	p _{occ}	30 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶
Brand geblust door aanwezigen	p _{occup}	0,75	0,60	0,45
Brand geblust door sprinkler	p _{SP}	zie tabel 5.5		
Brand geblust door overheids- brandweer	p _{FB}	0,90 - 0,95	0,90 - 0,95	0,80 - 0,90

5.3.2 Het ontstaan van brand en de brandontwikkeling

De kans per jaar op een brand, ernstig genoeg om de draagkracht van een bouwconstructie in gevaar te brengen, volgt uit:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot A_{fi} \quad \dots (5.1)$$

met:

p_1 : de kans op een ernstige brand, met daarin begrepen het effect van het optreden van de aanwezigen en de overheidsbrandweer (per m² vloeroppervlakte en per jaar);

p_2 : een reductiefactor, afhankelijk van het type brandweer (beroeps vs. vrijwillig) en van de tijd tussen alarmering en interventie door de brandweer (p_2 is ook de kans dat de brandweerinterventie niet het gewenste resultaat heeft);

p_3 : een reductiefactor waarmee het effect van automatische branddetectie (rook, warmte) en/of automatische doormelding in rekening wordt gebracht;

p_4 : een reductiefactor waarmee het effect van automatische brandblussing in rekening wordt gebracht (p_4 is ook de kans dat de sprinklerinstallatie niet het gewenste resultaat heeft);

A_{fi} : de vloeroppervlakte van het brandcompartiment.

Opmerkingen:

- In de kans p_1 zijn ook de acties verwerkt van de aanwezigen en van de overheidsbrandweer, die tot doel hebben te voorkomen dat een brand uitgroeit tot een ernstige brand; deze kans moet niet verward worden met de kans op het ontstaan van brand.
- De invloed van het type brandweer, de tijd tussen alarmering en interventie door de brandweer, automatische detectie en doormelding (p_2 , p_3) is in tabel 5.1 niet in beschouwing genomen; de in tabel 5.2 weergegeven factor p_1 komt overeen met $p_{occ} \cdot (1 - p_{occup}) \cdot (1 - p_{FB})$.

Overeenkomstig [11], [18] worden de volgende waarden voor p_1 , p_2 en p_3 aanbevolen.

Tabel 5.2: De kans p_1 op het optreden van brand en de ontwikkeling tot een ernstige brand, inclusief het effect van het optreden van de overheidsbrandweer en de aanwezigen.

gebruik /activiteit	p_1 [$10^{-7}/(m^2 \cdot \text{jaar})$]
kantoor	2 - 4
woning	4 - 9
industriegebouw	5 - 10

Tabel 5.3: De reductie factor p_2 , afhankelijk van het type brandweer en de tijd tussen alarmering en brandweerinterventie.

p_2	tijd tussen alarm en interventie door de brandweer [min]		
	≤ 10	$10 < t \leq 20$	$20' < t \leq 30'$
type brandweer			
beroeps	0,05	0,1	0,2
vrijwillig	0,1	0,2	1

Tabel 5.4: De reductie factor p_3 , afhankelijk van automatische detectie (rook, warmte) en automatische alarmering

actieve maatregelen	p_3
branddetectie (rook)	0,0625

branddetectie (warmte)	0,25
automatische doormelding naar de brandweer	0,25

Tabel 5.5: De reductiefactor p_4 waarmee het effect van automatische blussing in rekening wordt gebracht

type sprinkler	p_4
normaal (overeenkomstig normen)	0,02
hoge kwaliteit (bijv. elektronisch gestuurde afsluiters, twee onafhankelijke waterbronnen)	0,01 - 0,005
lage kwaliteit (bijv. niet overeenkomstig normen)	$\geq 0,05$

5.4 Ontwerpprocedure

5.4.1 Bepaling van de ontwerpwaarden voor de mechanische belasting en het draagvermogen – Veiligheidsfactor γ in de Eurocodes – Uitgangspunten bij kamertemperatuur

Het draagvermogen R en de mechanische belasting S volgen statistische verdelingen, die worden vastgelegd door een standaardafwijking (σ_S, σ_R) en een gemiddelde (m_S, m_R). Om voldoende veiligheid zeker te stellen, is het noodzakelijk dat bezwijken ($S > R$) slechts optreedt met een zeer kleine kans p_f ; deze kans wordt weergegeven door het gearceerde oppervlak in fig. 5.2. Een maat voor dit oppervlak is de betrouwbaarheidsindex β .

Onder normale gebruiksomstandigheden wordt in de Eurocodes uitgegaan van een maximale kans op bezwijken van $p_f = 7,23 \cdot 10^{-5}$, betrokken op de economische levensduur van het gebouw; dit correspondeert met een betrouwbaarheidsindex van $\beta = 3,8$.

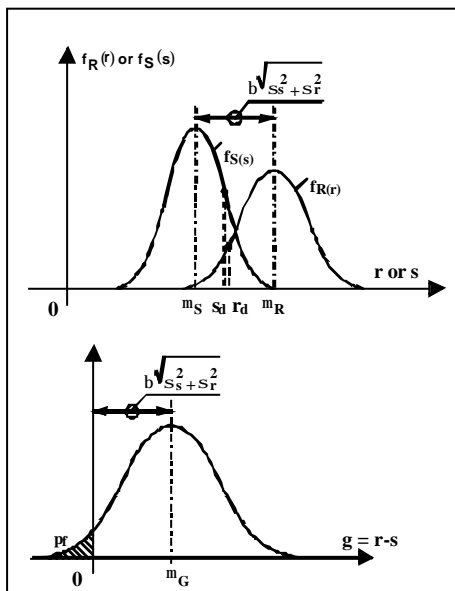


Fig. 5.2: Probabilistische benadering

De ontwerpwaarden voor de mechanische belasting (S) en de draagkracht (R) worden genoteerd als respectievelijk s_d en r_d . Merk op dat er vele soorten mechanische belastingen zijn (belasting

$$p_f \leq p_t (= 7,23 \cdot 10^{-5}) \rightarrow \mathbf{b} > \mathbf{b}_t (= 3,8)$$

$$m_R - m_S \geq \mathbf{b} \sqrt{s_S^2 - s_R^2} = \mathbf{b} \frac{s_S^2 - s_R^2}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}}$$

$$\Rightarrow \underbrace{m_R - \frac{s_R}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}} \mathbf{b} s_R}_{R_d} \geq \underbrace{m_S - \frac{s_S}{\sqrt{s_S^2 - s_R^2}} \mathbf{b} s_S}_{S_d}$$

$$\Rightarrow R_d \geq S_d$$

door eigen gewicht, veranderlijke belasting, sneeuw, wind, aardbeving, brand, ...) en eveneens vele soorten draagvermogen (bezwijken op druk, trek, buiging, afschuiving).

Daarom is het probleem ingewikkelder dan de vergelijking tussen slechts twee statistische variabelen. Om deze reden wordt in de Eurocode een semi-probabilistische benadering aangehouden, gebaseerd op de zgn. FORM methode (First Order Reliability Method).

Deze vereenvoudiging gaat uit van de volgende veronderstellingen:

$$a_R = \frac{s_R}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} = 0,8 \quad \text{voor het draagvermogen} \quad \dots (5.2)$$

$$a_S = \frac{s_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} = (-0,7) \text{ voor de maatgevende en } (-0,28) \text{ voor de overige belastingen} \quad \dots (5.3)$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{ontwerpwaarde} = m_{S,i} + 0,7 \mathbf{b} s_{S,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{ontwerpwaarde} = m_{R,i} - 0,8 \mathbf{b} s_{R,i}$$

Door constante waarden te veronderstellen voor de weegfactoren $\alpha_{S,i}$ kunnen de ontwerpwaarden $S_{d,i}$ voor de belastingen onafhankelijk van draagkracht worden vastgelegd, omdat deze ontwerpwaarden slechts een functie zijn van de betrouwbaarheidsindex β , van het gemiddelde van de standaardafwijking van de betreffende statistische verdeling en – uiteraard – van het type verdeling. Zie de formule in fig. 5.2 [10].

De ontwerpwaarden $S_{d,i}$ van de belastingen zijn dus de waarden die in rekening moeten worden gebracht om de vereiste veiligheid te bereiken. Een waarde van β gelijk aan 3,8 – zoals aangenomen in de Eurocodes - impliceert een bezwikkans gelijk aan $7,23 \cdot 10^{-5}$ gedurende de economische levensduur van het gebouw.

Bijgevolg is het mogelijk voor iedere belasting een veiligheidscoëfficiënt γ te definiëren als de verhouding tussen de ontwerpwaarde S_d en de karakteristieke waarde van de belasting (referentiewaarde):

$$\mathbf{g} = \frac{S_d}{S_k} \quad \dots (5.4)$$

Op deze wijze kunnen de veiligheidsfactoren zoals voorgesteld in de Eurocodes worden herleid: voor de belastingen wordt uitgegaan van 1,35 en 1,5 voor respectievelijk de belasting door eigen gewicht en veranderlijke belasting; voor het draagvermogen 1,1; 1,15 en 1,5 voor respectievelijk constructiestaal, wapeningsstaven en beton [1], [16], [20], [24].

Ter illustratie wordt hieronder de berekening weergegeven van de veiligheidsfactor geldend voor constructiestaal (γ_s).

- $\beta = 3,8$; $\alpha_a = 0,8$
- Statistische verdeling : lognormal
- Variatie coëfficiënten $\left(= \frac{s}{m} \right)$:

$$V_R = \text{variatioecoëfficiënt voor de ontwerpwaarde} = \sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$$

$$V_m = \text{variatioecoëfficiënt m.b.t. het model} = 0,05$$

$$V_G = \text{variatioecoëfficiënt m.b.t. de afmetingen van constructieonderdelen} = 0,05$$

V_f = variatiecoëfficiënt m.b.t. de mechanische eigenschappen = 0,05

- Ontwerpwaarden : $X_d = m_x \exp(-a_R b V_R)$
 $= m_x \exp(-0,8 b V_R)$
- Karakteristieke waarden : $X_k = m_x \exp(-k V_f)$
 met $k = 1,645$ corresponderend met de 5 % fractiel
- Veiligheidsfactor : $\gamma_s = \frac{X_k}{X_d} = \exp(0,8 b V_R - k V_f)$
 $= \exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05)$
 $= 1,198$

5.4.2 Aanvaardbare kans op bezwijken

De aanname van een aanvaardbare kans op bezwijken (p_t) van $7,23 \cdot 10^{-5}$ betrokken op de economische levensduur van een gebouw (= 55 jaar) komt neer op een bezwijkkans van $1,3 \cdot 10^{-6}$ per jaar en is gedefinieerd in ENV 1990 [10]. Dit criterium ($\beta > 3,8$), geldend voor normale gebruiksomstandigheden is ook toegepast op de beoordeling van de constructieve brandveiligheid. In feite zou onder brandomstandigheden kunnen worden uitgegaan van een meer genuanceerd criterium. In dit verband wordt verwezen naar de eindrapportage van het Natuurlijk Brandconcept (hoofdstuk 2.8 van bijlage B van het WG5 rapport) waarin wordt voorgesteld om de aanvaardbare bezwijkkans per jaar onder brandomstandigheden (p_t) afhankelijk te stellen van de mogelijkheden voor evacuatie:

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-4}$ onder normale omstandigheden

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-5}$ in moeilijke omstandigheden (bijv. ziekenhuizen)

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-6}$ indien geen evacuatie mogelijk is (bijv. zeer hoge gebouwen)

De bovenstaande waarden voor p_t zijn niet opgenomen in de uiteindelijk voorgestelde ontwerpprocedure. Mogelijk wordt hierop in de toekomst nog teruggekomen. Vooralsnog is besloten de waarde zoals voorgesteld in ENV 1990 [10] aan te houden omdat deze inmiddels algemeen is aanvaard, terwijl het voorstellen van nieuwe grenswaarden een heropening van de discussie met de regelgevers noodzakelijk zou maken.

5.4.3 Het brandveiligheidontwerp en voorwaardelijke kansen

Bijlage A van ENV 1991-1 [10], waarin de semi-probabilistische benadering wordt beschreven die leidt tot de ontwerpwaarden voor de belastingen en de materiaal-eigenschappen, is uitgebreid tot het gebied van de constructieve brandveiligheid.

Onder kamertemperaturomstandigheden zijn de veiligheidsfactoren voor belastingen ($\gamma_{s,i}$) door middel van een semi-probabilistische benadering vastgesteld. Daarbij wordt impliciet aangenomen dat de kans op bezwijken (p_t) lager is dan de aanvaardbaar geachte kans van $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$, betrokken op de economische levensduur van het gebouw en corresponderend met een betrouwbaarheidsindex $\beta = 3,8$. Geëist wordt:

$$p_t (= \text{kans op bezwijken}) \leq p_t (= \text{aanvaardbare kans}) \quad \dots (5.5)$$

In geval van brand wordt de maatgevende belasting gevormd door de vuurbelasting, uitgedrukt in MJ of het equivalente aantal kg vurenhout. Echter, deze vuurbelasting vormt pas echt een belasting voor de constructie indien ze geactiveerd wordt, namelijk als gevolg van de brand. De kans dat dit gebeurt (p_{fi}) volgt uit het product van de kans op het ontstaan van brand (p_{start}) en de kans dat de brand zich uitbreidt tot een volledig ontwikkelde brand (p_{spread}).

Voor het geval de brand mag worden opgevat als een incidenteel optredend verschijnsel, kan voor betr. (5.5) worden geschreven:

$$p_{f,fi} (= \text{kans op bezwijken door brand}) * p_{fi} (= \text{kans op brand}) \leq p_t (= \text{aanvaardbaar})$$

Deze voorwaarde kan worden geschreven als:

$$p_{f,fi} \leq (p_t/p_{fi})$$

of:

$$p_{f,fi} \leq p_{f,fi} \quad \Rightarrow \quad \beta_{f,fi} = \beta_{fi,t} \quad \dots (5.6)$$

Waar de grenswaarde $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$ in het ontwerp bij kamertemperatuur leidt tot een vaste waarde voor de betrouwbaarheidsindex, is dit in het brandveiligheidsontwerp niet het geval. Dit komt omdat de grenswaarde p_{fi} afhangt van de kans op ontstaan van de brand p_{fi} . Indien de betrouwbaarheidsindex - in het geval van brand aangeduid met " $\beta_{fi,t}$ " - bekend is, kan de ontwerpwaarde voor de vuurbelasting worden gevonden op een wijze als hierna zal worden uiteengezet.

5.4.4 De ontwerpwaarde voor de vuurbelasting en de globale δ -factor

Uit betrouwbaarheidsberekeningen (zie hoofdstuk 7.4 van [11]) blijkt dat de weegfactor voor de maatgevende belasting bij kamertemperatuur, in geval van een brandontwerp zodanig wordt gereduceerd dat ze als secundair kan worden beschouwd, terwijl de vuurbelasting de maatgevende belasting wordt.

Bovendien blijkt uit dergelijke berekeningen dat de aanname voor de weegfactor voor de maatgevende belasting ($a_{qf} = -0,7$) dient te worden aangepast en dat een waarde van a_{qf} gelijk aan $-0,9$ meer op zijn plaats is.

Uitgaande van de vuurbelastingen volgens "The Application of Fire Safety Engineering Principles to the Safety of Buildings" [14] en de analyse van Fontana in [15], blijkt de vuurbelasting bij goede benadering een Gumbel I verdeling te volgen. Uitgegaan wordt van een variatiecoëfficiënt V_{qf} van 0,3 [11].

De ontwerpwaarde voor de belastingen wordt - uitgaande van een Gumbel-verdeling - gegeven door [10]:

$$q_{f,d} = 1,05 m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{P} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln F(-0,9 b_{fi,t}))] \right\} \quad \dots (5.7)$$

waarbij m_{qf} staat voor de gemiddelde waarde van de vuurbelasting en ϕ voor de kansdichtheidfunctie van een normale verdeling.

Overeenkomstig de aanbevelingen gedaan in [16], wordt voor de veiligheidsfactor voor het model waarmee het effect van de belasting wordt bepaald, aangehouden: $\gamma_{SD} = 1.05$.

Door een karakteristieke waarde te kiezen corresponderend met een 20% overschrijdingskans (80% fractiel, zie bijlage E van ENV 1991-1-2, [1] en [11]), wordt voor de factor γ_{qf} gevonden:

$$d_{qf} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{P} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln F(-0,9 b_{fi,t}))] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{P} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} \quad (5.8)$$

$$= 2,38 \text{ voor } \beta = 3,8 \text{ en } 0,82 \text{ voor } \beta = 0$$

Het verloop van d_{qf} als functie van $\beta_{fi,t}$ is weergegeven in fig. 5.3.

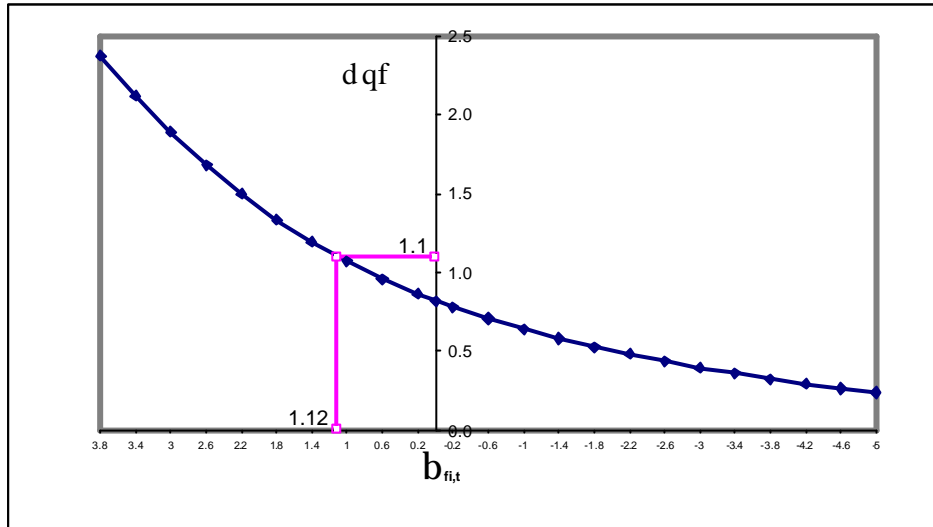


Fig. 5.3: De veiligheidsfactor δ_{qf} als functie van $\beta_{fi,t}$

De betrouwbaarheidsindex $\beta_{fi,t}$ kan worden berekend uit de kans op een ernstige brand met behulp van de volgende formule:

$$b_{fi,t} = f^{-1} \left(\frac{p_t}{p_{fi}} \right) = f^{-1} \left(\frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

waarbij f^{-1} de inverse is van de normaal veronderstelde verdelingsfunctie.

Met behulp van fig. 5.3 is het mogelijk de reductiefactor d_{qf} voor de vuurbelasting te bepalen.

De procedure omvat de volgende stappen:

- bepaal de kans p_{fi} op een ernstige brand;
- bereken het quotiënt (p_t/p_{fi}) ;
- bepaal de betrouwbaarheidsindex β_{fi} ;
- bepaal de reductiefactor d_{qf} .

Deze benadering is verder vereenvoudigd door de reductiefactor d_{qf} te splitsen in drie componenten (d_{q1} , d_{q2} en d_{qi}), waarmee de invloed op p_{fi} in rekening kan worden gebracht van respectievelijk de afmetingen van de brandruimte, het risico van activering van brand en de actieve brandveiligheidsmaatregelen. Zie tabel 5.6.

Tabel 5.6: Overzichttabel d-factoren

brandcompartiment vloeroppervlakte A [m ²]	activeringsrisico d_{q1}	activeringsrisico d_{q2}	voorbeelden van gebruik
25	1,10	0,78	kunstgalerij, museum zwembad
250	1,50	1,00	woning, hotel, papierindustrie
2500	1,90	1,22	machine fabriek
5000	2,00	1,44	chemisch laboratorium, verffabriek
10000	2,13	1,66	vuurwerkfabriek, verffabriek

NFSC PROPOSAL	d_{ni} als functie van de actieve maatregelen										$d_n^{\min} = d_{n1} \dots d_{n10}$ $g_n^{\max} = g_{n4} \cdot g_{n7}$
	automatische blussing		automatische detectie			handmatige blussing					
	automatisch water- blussysteem d_{n1}	onafh. watertoevoer 0 1 2 d_{n2}	automatische detectie & alarm warmte rook d_{n3} g_{n4}	automatische alarm- doormelding naar brandweer d_{n5}	bedrijfs- brand- weer d_{n6}	beroeps- brand- weer d_{n7}	veilige toegangs- wegen d_{n8}	brand bestrijdings- installatie d_{n9}	rook afvoer- systeem d_{n10}		
0,61	1,0 0,87 0,7	0,87 of 0,73	0,87	0,61 or 0,78	0,9 or 1 1,5*	1,0 1,5*	1,0 1,5*	0,15 0,57			

* Voor gebruikelijke brandbestrijdingsvoorzieningen, die vrijwel altijd aanwezig dienen te zijn, zoals veilige toegangswegen, brandbestrijdingsvoorzieningen en rookafvoersystemen in trappenhuizen, dienen de overeen- δ_{ni} -waarden op 1,5 te worden gesteld indien de betreffend voorzieningen niet of in onvoldoende mate aanwezig zijn.

Indien de factoren δ_{q1} , δ_{q2} and δ_{ni} zijn vastgesteld, kan de ontwerpvuurbelasting $q_{f,d}$ worden bepaald uit :

$$q_{f,d} = d_{q1} \cdot d_{q2} \cdot d_{ni} \cdot q_{f,k}$$

De ontwerpwaarde van de vuurbelasting is vervolgens de basis voor berekeningen zoals uiteengezet in hoofdstuk 6.

6. DE BEREKENING VAN HET TEMPERATUURVERLOOP BIJ BRAND

Indien het brandverloop numeriek wordt gesimuleerd, kunnen verschillende niveaus van vereenvoudigingen worden doorgevoerd. In dit hoofdstuk worden de modellen besproken die kunnen worden toegepast voor plaatselijke branden (twee-zone modellen) en voor volledig ontwikkelde branden waarbij de gehele ruimte in brand staat (één-zone modellen). Veld- of CFD-modellen blijven buiten beschouwing, omdat zij te complex en te arbeidsintensief zijn om te worden toegepast in een eenvoudige praktijkbenadering.

6.1 Plaatselijke brand

Tijdens een plaatselijke brand zullen verbrandingsproducten zich ophopen in de warme rooklaag onder het plafond van de brandruimte, met daaronder een laag waarvan de temperatuur veel lager blijft.

Deze situatie kan goed worden beschreven door een twee-zone model, zoals gebruikt voor niet-volledig ontwikkelde brandcondities. Afgezien van het berekenen van de brandtemperatuur, worden deze modellen ook toegepast voor het vaststellen van de rookverspreiding in gebouwen en voor het beoordelen van de veiligheid van de aanwezigen op basis van de rookvrije hoogte, de concentratie van giftige stoffen, de intensiteit van de warmtestraling en de optische rookdichtheid. De thermische belasting van horizontale constructieonderdelen die zich boven de brandhaard bevinden hangt bovendien af van de afstand tot de brandhaard en kan worden vastgesteld met behulp van speciale modellen die zijn ontwikkeld voor het in rekening brengen van lokale effecten. Voorbeelden van dergelijke modellen zijn de modellen ontwikkeld door Heksestad en Hasemi [17].

6.1.1 Twee-zone modellen

De naam “zone model” wordt gebruikt voor numerieke computer programma’s waarmee de ontwikkeling van de luchttemperatuur wordt berekend als functie van de tijd, uitgaande van de beginselen van energie- en massabehoud voor de verschillende zones waarin de brandruimte is verdeeld. Steeds wordt ervan uitgegaan dat de temperatuur in elk van deze zones gelijkmatig verdeeld is.

Zone modellen leveren niet slechts het verloop van de luchttemperaturen in de brandruimte, maar ook aanvullende informatie, zoals het temperatuurverloop in de wanden of de snelheid van de gassen ter plaatse van openingen.

Invoergegevens voor een zone model betreffen:

- gegevens met betrekking tot de geometrie (afmetingen brandruimte, plaats en afmetingen van de openingen enz.);
- thermische eigenschappen van de materialen toegepast in de constructieonderdelen die de brandruimte omhullen;
- gegevens met betrekking tot de brand (afbrandsnelheid, verbrandingswaarden van de aanwezige materialen enz.).

In een twee-zone model worden de vergelijkingen voor energie- en massabehoud geformuleerd voor ieder van de twee zones. Ook wordt de uitwisseling van massa en energie tussen de twee zones in de beschouwing betrokken.

Resultaat van de simulatie is zowel het verloop van de gasttemperatuur in ieder van de twee lagen, als ook informatie over de temperatuur in de omhullende constructie en de warmteverliezen door de openingen. Een zeer belangrijk resultaat is de ontwikkeling, als functie van de tijd, van de dikte van elk van de lagen. De dikte van de onderste laag, die koud blijft en waarin zich geen

verbrandingsproducten bevinden, is zeer belangrijk voor het beoordelen van de mogelijkheden die de aanwezigen hebben om te vluchten. In fig. 6.1 is de modellering van een brandruimte met behulp van een twee-zone model geïllustreerd; de verschillende termen voor de energie- en warmtebalansen zijn weergegeven.

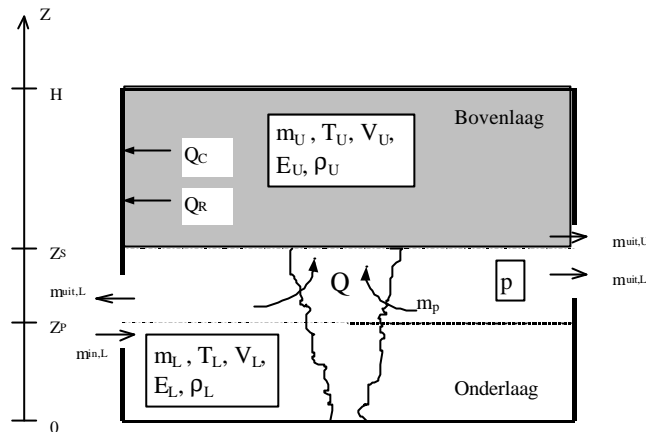


Fig. 6.1: Toepassing van een twee-zone model

In fig. 6.1 is uitgegaan van de eenvoudige situatie waarin slechts uitwisseling van energie en massa plaatsvindt met de omgeving van de brandruimte (en dus niet tussen de zones onderling). Niettemin zijn dit soort modellen geschikt om situaties in meer complexe gebouwen te analyseren, waarin uitwisseling van massa en energie optreedt niet slechts tussen de brandruimte en de omgeving van het gebouw, maar waarbij ook de andere ruimten in het gebouw zijn betrokken. Dit is meer in het bijzonder van belang om de verspreiding van rook vanuit de brandruimte door het gebouw te beoordelen met het oog op veiligheid van de aanwezigen. Een dergelijke situatie, uitgaande van twee-zone modellering in meerdere compartimenten, is weergegeven in Fig. 6.2.

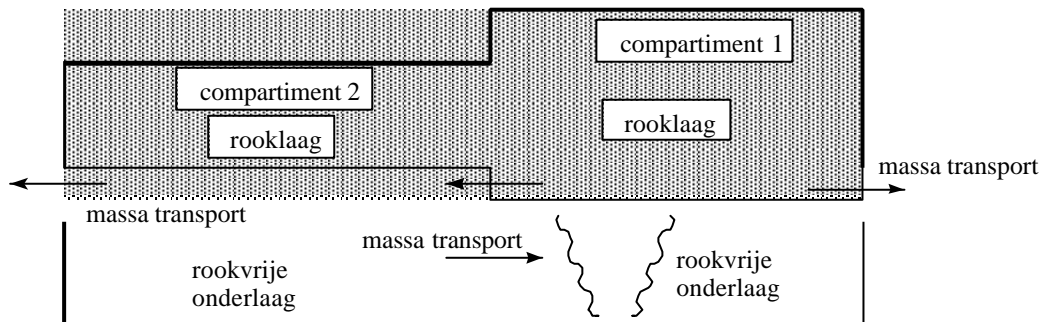


Fig. 6.2: Twee-zone modellering in meerdere compartimenten

6.1.2 The Heskestad method

De thermische belasting door een plaatselijke brand kan worden beoordeeld m.b.v. de methode van Heskestad [1]. Van belang is de hoogte van de vlammen ten opzichte van het plafond. De vlamhoogte L_f van een plaatselijke brand volgt uit: (zie ook fig. 6.3)

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Indien de vlam het plafond van de brandruimte niet bereikt ($L_f < H$, zie fig. 6.3), of in geval van een brand in de open lucht, wordt de temperatuur $T_{(z)}$ in as van de vlam gegeven door:

De te berekenen grootheden zijn:

- H de afstand tussen de bovenzijde van de brandhaard en het plafond
- Q^* een (dimensieloze) afbrandsnelheid [-]
- Q_H^* een (dimensieloze) afbrandsnelheid [-]
- z verticale positie van de denkbeeldige brandhaard [m]
- L_H de horizontale afstand waarover de vlammen zich onder het plafond uitbreiden [m]
- r de horizontale afstand van enig punt in plafond tot het centrum van de brandhaard [m]

De berekeningsprocedure is als volgt:

bereken H $H = H_f - H_s$... (6.1)

bereken Q^* $Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}}$... (6.2)

bereken Q_H^* $Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}}$... (6.3)

bereken z' $z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3})$ $Q^* < 1,00$... (6.4)

$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5})$ $Q^* \geq 1,00$... (6.5)

bereken $(L_H+H)/H$ $\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33}$... (6.6)

Bereken L_H met behulp van vgl. (6.6) en de eerder berekende waarde van H.

Bereken de waarde van de warmtestroom q'' in kW/m^2 ter plaatse van een punt in het plafond op een afstand r van het centrum van de brandhaard met behulp van:

$q'' = 100$ $y < 0,30$... (6.7)

$q'' = 136,30 - 121,00 y$ $0,30 < y < 1,00$... (6.8)

$q'' = 15 y^{-3,7}$ $y > 1,00$... (6.9)

waarbij $y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'}$... (6.10)

De warmtestroom q'' in enig punt van het plafond neemt af als functie van de verhouding y (zie uitdr. (6.10)) en neemt toe als functie van de afbrandsnelheid Q. In fig. 6.5 zijn de bedoelde verbanden weergegeven voor het geval dat:

r = 0, H = 5 m en D = 3 m.

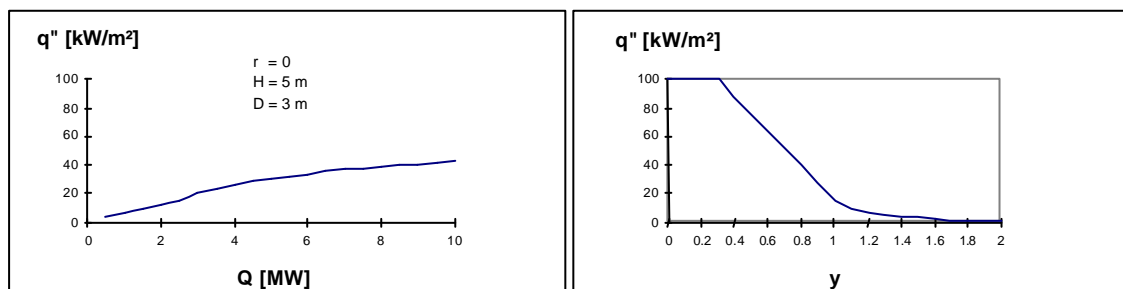


Fig. 6.5: q'' als functie van y en Q

6.1.4 Combinatie van twee-zone modellen en het model voor een plaatselijke brand

Voor een plaatselijke brand mag voor de verdeling van de gastemperatuur worden uitgegaan van een twee-zone model. In zo'n model wordt verondersteld dat de temperatuurverdeling per zone uniform is. Voor een globale beschouwing is de aldus te berekenen temperatuur van de hete bovenlaag in het algemeen voldoende nauwkeurig als het gaat om het beoordelen van de hoeveelheid af te voeren rook, het optreden van vlamoverslag, het bezwijken van onderdelen van het dak op enige afstand van de brand enz.

Echter, als het gaat om het beoordelen van het gedrag van een constructie-element juist boven de brand, zal de aanname van een uniforme temperatuurverdeling in de warme bovenlaag onveilig zijn en moet het twee-zone model worden gecombineerd met het model voor de plaatselijke brand. Zie paragraaf 6.1.3. De temperaturen in de directe omgeving van de ligger worden verkregen door – voor ieder punt langs de ligger – uit te gaan van de hoogste temperatuur, voorspeld door één van de beide modellen. Zie ook fig. 6.6.

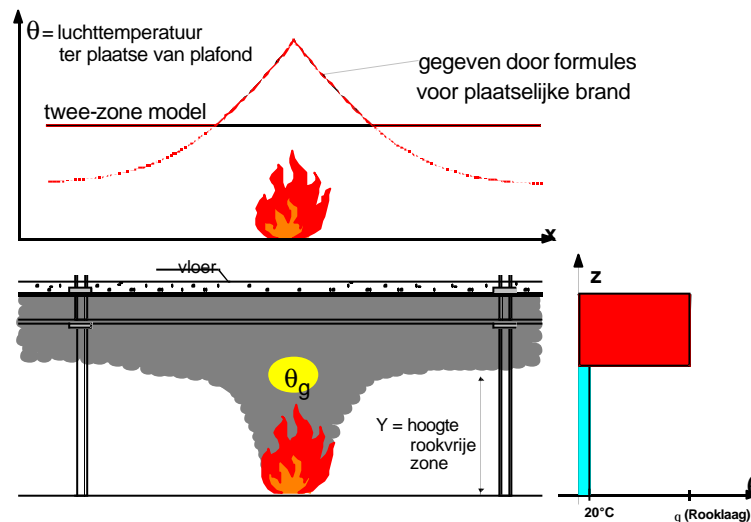


Fig. 6.6: Combinatie van een twee-zone model met een model voor een plaatselijke brand

De hoogte van de rooklaag en de temperaturen van de hete gassen ter plaatse van de (staal)constructie kunnen, voor verschillende afstanden tot de brand, worden berekend met behulp van het model TEFINAF [8]. In dit model wordt een twee-zone model (waarmee de dikte van en de temperatuur in de warme bovenlaag worden berekend) gecombineerd met het model van een plaatselijke brand (waarmee het temperatuurverloop boven de brand, als functie van de afstand tot de brand, wordt berekend).

6.2 Volledig ontwikkelde brand

Er staan verschillende modellen ter beschikking voor de beschrijving van een volledig ontwikkelde brand. Enige van de meest gebruikte modellen worden in dit hoofdstuk beschreven. Het natuurlijk brandconcept is een alternatief voor de nominale branden, zoals gespecificeerd in de op classificatie gebaseerde aanpak (standaardbrand volgens ISO of ASTM, koolwaterstofbrand, etc.).

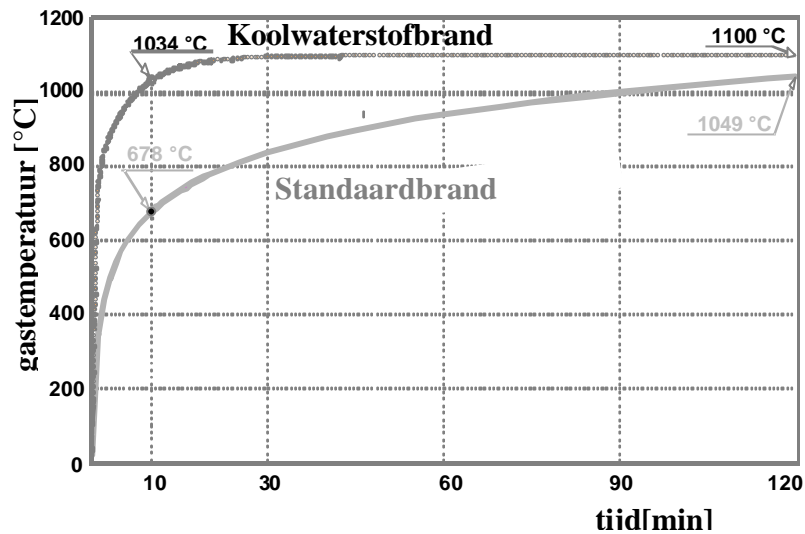


Fig. 6.7: Brandkrommen voor de standaard- en de koolwaterstofbrand

De veldmodellen (CFD) worden niet in dit hoofdstuk beschreven. Zij zijn te complex en vergen te veel tijd en invoergegevens om gebruikt te kunnen worden als hulpmiddelen in een eenvoudige praktijkbenadering.

6.2.1 Parametrische branden

Parametrische branden vormen een eenvoudig middel om de meest belangrijke fysische verschijnselen te beschrijven die de ontwikkeling van een brand in een bepaalde gebouwsituatie kunnen beïnvloeden. Zoals bij nominale branden, wordt het verloop van de brand weergegeven door temperatuur-tijd-krommen, echter deze krommen hangen af van bepaalde parameters, waardoor de werkelijkheid beter benaderd kan worden. De parametrische branden zoals die in de literatuur worden beschreven gaan vrijwel alle uit van parameters zoals:

- de geometrie van de brandruimte
- de vuurbelasting in de brandruimte
- de openingen in de wanden of het dak van de brandruimte
- aard en afmetingen van de constructieonderdelen die de brandruimte omhullen.

Bij parametrische branden wordt uitgegaan van de hypothese dat de temperatuurverdeling in de brandruimte uniform is, hetgeen het toepassingsgebied beperkt tot de brandfase na vlamoverslag en tot niet al te grote brandruimten. Niettemin betekent de toepassing van parametrische branden een belangrijke stap voorwaarts in de richting van een meer realistische beschrijving van de brand - zeker vergeleken met de nominale branden - met behoud van het voordeel van eenvoudige, analytische uitdrukkingen voor het temperatuurverloop (d.w.z : voor de toepassing is geen ingewikkeld computerprogramma nodig).

In de (informatieve) annex A van EN 1991.1.2 [1] is een voorstel opgenomen voor parametrische brandkrommen. Dit voorstel is geldig voor brandruimten met een maximum vloeroppervlakte van 500 m² en een maximale afstand tussen vloer en plafond van 4 m. Openingen in het dak zijn niet toegestaan, terwijl de thermische traagheid b van de omhullende constructie moet vallen tussen 1000 en 2200 J/m²s^{1/2}K; de openingsfactor O moet liggen tussen de waarden 0,02 en 0,20 [m^{1/2}]. Op de definitie van de b en O wordt in het navolgende teruggekomen.

In het kader van het “Natuurlijk Brandconcept” zijn een aantal verbeteringen doorgevoerd:

- een meer correcte berekening van de thermische traagheid b voor onderdelen van de omhullende constructie, indien deze zijn opgebouwd uit meerdere lagen;
- de introductie van een minimale brandduur, rekening houdend met brandstof-beheerste brandcondities bij lage vuurbelasting en grote openingsfactoren;
- de introductie van een correctiefactor, waarmee de grote massastroom door openingen in rekening kan worden gebracht, die in geval van brandstof-beheerste branden moet worden verwacht.

De nieuwe formulering van de parametrische brandkrommen wordt hierna gepresenteerd en geldt voor elke waarde van b .

De ontwikkeling van de luchttemperatuur in de brandruimte volgt uit:

$$\Theta_g = 1,325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20 \quad \dots (6.11)$$

met $t^* = \Gamma t \quad \dots (6.12)$

$$\Gamma = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad \dots (6.13)$$

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad \dots (6.14)$$

en

- t tijd, in h
- A_v oppervlakte van de verticale openingen, in m^2 ,
- h hoogte van de verticale openingen in m,
- A_t totale oppervlakte van de omhullende constructieonderdelen (muren, vloeren en plafonds, met inbegrip van de openingen), in m^2 ,
- b de zgn. b -factor in $J/m^2 s^{1/2} K$; deze factor is een functie van de thermische traagheid van de constructiedelen die de brandruimte omhullen (zie par. 3.3 voor de wijze van berekening).

De duur van de brandperiode wordt bepaald door:

$$t_d = \max \left(0,13 \times 10^{-3} q_{t,d} / O ; t_{lim} \right) \quad [h] \quad \dots (6.15)$$

met:

- $q_{t,d}$ de ontwerpwaarde van de vuurbelasting, betrokken op A_t , in MJ/m^2 ,
- t_{lim} 20 minuten, overeenkomstig met de duur van de brandstofbeheerste brand, zoals verondersteld in annex B van EN 1991.1.2 [1].

Bij de toepassing van uitdr. 6.15 doen zich twee mogelijkheden voor:

- de duur van de brandfase, berekend uit de eerste term van uitdr. 6.15 (d.w.z. $0,13 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$), is groter dan de gekozen grenswaarde voor t_{lim} , in welk geval de uitdrukkingen 6.11 t/m 6.14 als zodanig worden gebruikt, d.w.z. zonder aanpassingen;
- de duur van de brandfase berekend uit de eerste term van uitdr. 6.15 is kleiner dan de gekozen grenswaarde voor t_{lim} . In dit geval worden de uitdr. 6.11 t/m 6.14 gebruikt met een gemodificeerde openingsfactor, O_{lim} . De waarde van de gemodificeerde openingsfactor volgt uit:

$$O_{lim} = 0,13 \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim} \quad \dots (6.16)$$

Uitdrukkingen 6.15 en 6.16 worden op de volgende wijze aangepast:

$$t_{\text{lim}}^* = \Gamma_{\text{lim}} t \quad \dots (6.17)$$

$$\Gamma_{\text{lim}} = \frac{(O_{\text{lim}}/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad \dots (6.18)$$

en t_{lim}^* in plaats van t^* wordt gebruikt in uitdr.6.11.

Teneinde het effect van de ventilatie gedurende de brandperiode in rekening te brengen, wordt tenslotte voor het geval $t_d = t_{\text{lim}}$ de volgende regel toegepast:

indien $O > 0,04$ en $q_{t,d} < 75$ en $b < 1.160$

$$\text{dan } k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1.160 - b}{1.160} \right) \quad \dots (6.19)$$

$$\text{en } \Gamma_{\text{lim}} = k \frac{(O_{\text{lim}}/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad \dots (6.20)$$

De temperatuur-tijdkromme gedurende de dooffase wordt gegeven door:

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 625(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{voor } t_d^* \leq 0,5 \quad \dots (6.21)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(3 - t_{\text{max}}^*)(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{voor } 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad \dots (6.22)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{voor } 2,0 \leq t_d^* \quad \dots (6.23)$$

met q_{max} maximum temperatuur, d.w.z. aan het einde van de brandfase gegeven door uitdr. 6.11 waarbij $t = t_d$ volgt uit uitdr. 6.15:

$$t_{\text{max}}^* = (0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \quad \text{voor } t_{\text{max}} > t_{\text{lim}}$$

$$x = \frac{t_{\text{lim}} \cdot \Gamma}{t_{\text{max}}^*} \quad \text{voor } t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$$

Ter illustratie geeft fig. 6.8 een voorbeeld van parametrische brandkrommen voor de volgende situatie: vuurbelasting $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$, $b = 1.160 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K}$, openingsfactor O variërend van 0,04 tot 0,20 $\text{m}^{1/2}$.

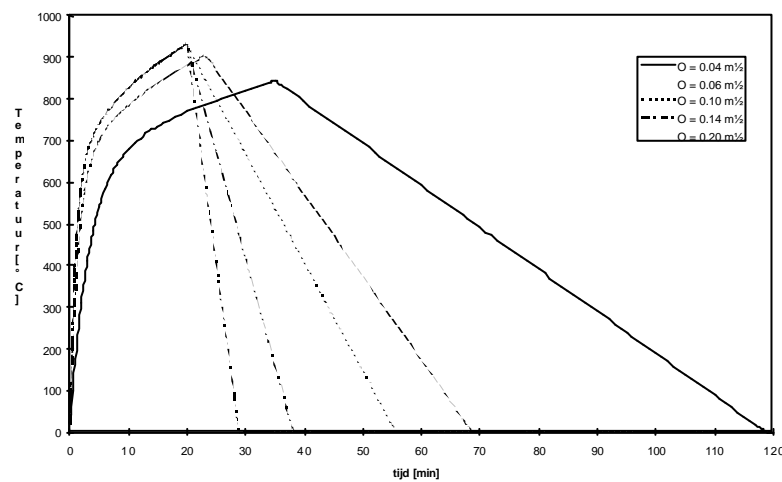


Fig. 6.8: Voorbeelden van parametrische brandkrommen

De gemodificeerde parametrische brandkrommen zijn vergeleken met de resultaten van brandproeven en met de resultaten van meer geavanceerde berekeningen. Fig. 6.9 heeft betrekking op de maximaal bereikte luchttemperatuur. De correlatiecoëfficiënt, die in het geval van de oorspronkelijke Eurocode voorstellen een waarde van 0,19 had, bedraagt voor de gemodificeerde parametrische brandkrommen 0,83.

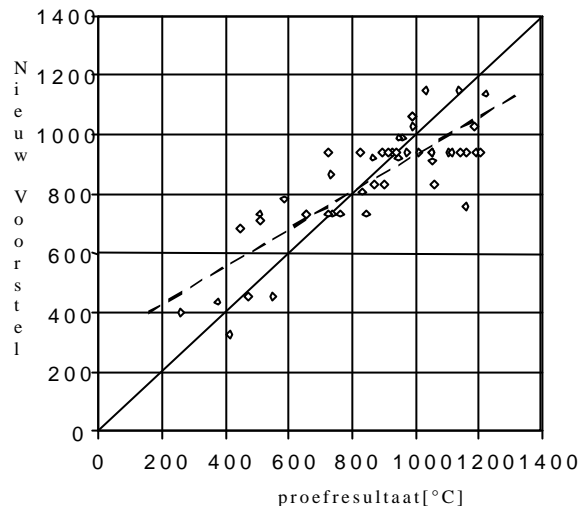


Fig. 6.9: Maximale gastemperatuur in de brandruimte

6.2.2 Zone modellen

Zone modellen zijn reeds geïntroduceerd in par. 6.1.1, waar een korte beschrijving van een twee-zone model werd gegeven. Het toepassingsgebied van twee-zone modellen is de brandfase voorafgaand aan vlamoverslag. Voor volledig ontwikkelde branden dient een één-zone model te worden toegepast.

6.2.3 Een-zone model

Een één-zone model is gebaseerd op het uitgangspunt dat gedurende de brand de temperatuur in de brandruimte gelijkmatig verdeeld is. Dit wil zeggen dat de toepassing van deze modellen beperkt is tot de fase na brandoverslag.

De benodigde invoergegevens zijn vergelijkbaar met die voor twee-zone modellen, d.w.z. meer gedetailleerd dan in het geval van parametrische brandkrommen.

In fig. 6.10 wordt aangegeven hoe de brand wordt gemodelleerd, met name waar het de termen uit de massa- en energiebalans betreft.

In het kader van de EGKS-projecten “Natuurlijk Brandconcept 1 & 2”, is door de Universiteit van Luik in samenwerking met PROFIL-ARBED-Research het één-zone model OZONE ontwikkeld. Dit model is gevalideerd op basis van de resultaten van 54 proeven. In fig. 6.11 wordt een vergelijking gemaakt tussen de maximale luchttemperatuur zoals gemeten tijdens de proeven en die zoals berekend door het model. Ieder punt is representatief voor een proef en de diagonaal geeft de situatie weer van een perfecte overeenstemming tussen testresultaat en berekening. De gestippelde lijn staat voor de beste lineaire benadering tussen proef- en berekeningsresultaten.

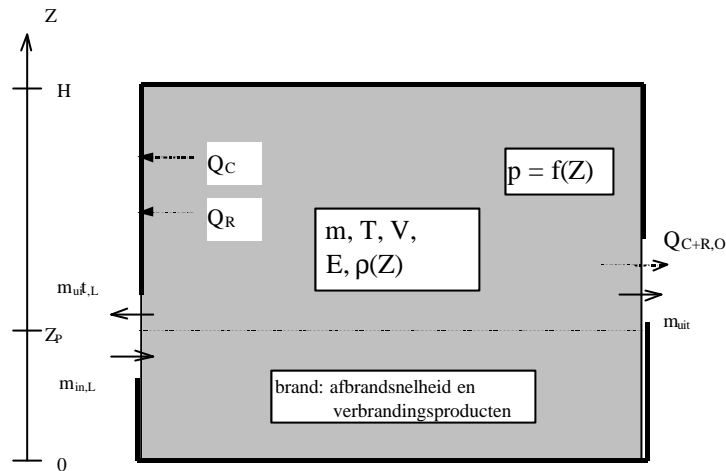


Fig. 6.10: Het één-zone model

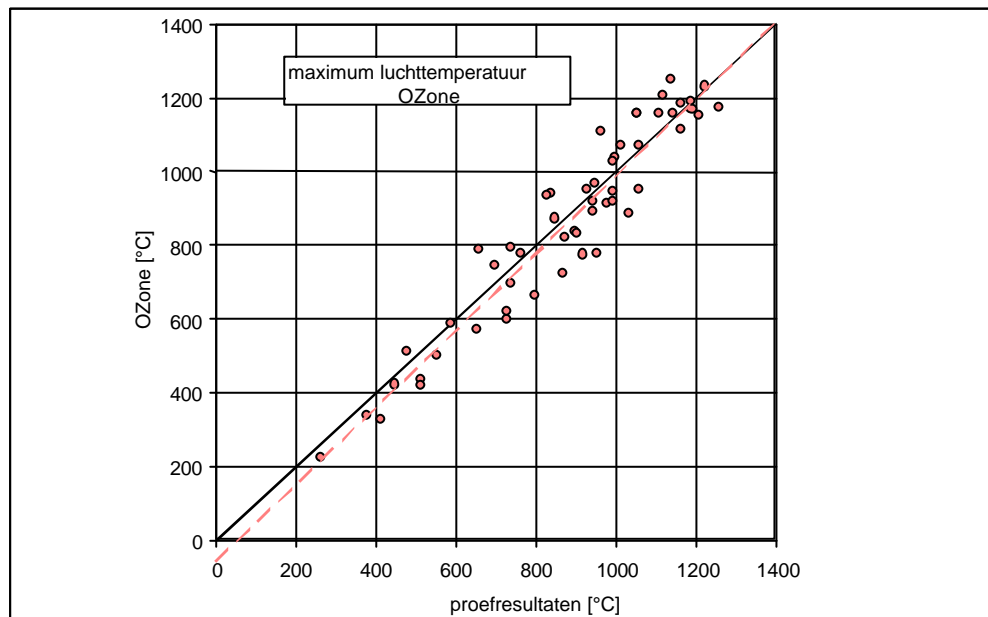


Fig. 6.11: Validatie van OZONE op basis van gemeten maximum luchttemperaturen.

In fig. 6.12 worden de resultaten van OZONE op een andere basis vergeleken met die van proefresultaten: voor iedere proef is de temperatuur berekend in een representatief staalprofiel (HEB 200, profielfactor 127 m^{-1}), zowel uitgaande van de tijdens de proef gemeten als van de door OZONE berekende luchttemperatuur. Dit levert een figuur op waarin iedere proef wordt

gerepresenteerd door twee temperaturen (maximaal berekend & maximaal gemeten) van het onbeklede staalprofiel.

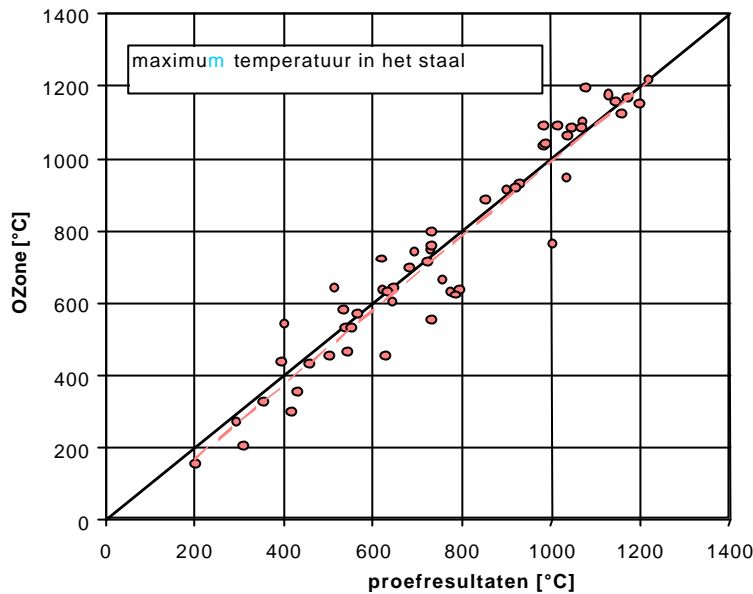


Fig. 6.12: Validatie van OZONE op basis van maximum temperaturen in een onbekleed staalprofiel

6.3 Combinatie van één- en twee-zone modellen; keuze van het model

Nadat de brandkarakteristieken (d.w.z. het verloop van de afbrandsnelheid, de geometrie van de brandruimte en de thermische eigenschappen van de omhullende constructiedelen) zijn bepaald, moet – afhankelijk van het beschouwde scenario - een keuze gemaakt worden met betrekking tot het te hanteren brandmodel. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de brand zich in eerste instantie ontwikkelt volgens een twee-zone model. Belangrijk is de vraag “of” en “hoe” de overgang zal optreden van de twee-zone naar de één-zone situatie. Deze vraag wordt beantwoord op basis van de uitkomsten van de simulatie, rekening houdend met het toepassingsgebied van de modellen. De resultaten van een twee-zone model worden gekarakteriseerd aan de hand van twee variabelen:

- de temperatuur T_u van de warme bovenlaag;
- de hoogte H_i van het scheidingsvlak tussen de boven- en de onderlaag.

Deze twee variabelen bepalen in hoeverre aan de voorwaarden van het gebruik van een twee-zone model wordt voldaan. Zie ook fig. 6.15. De vier volgende voorwaarden gelden in dit verband:

- *voorwaarde 1 (C1):* $T_u > 500 \text{ °C}$
de hoge temperatuur van de verbrandingsproducten (hoger dan 500 °C) leidt tot vlamoverslag als gevolg van warmtestraling;
- *voorwaarde 2 (C2):* $H_i < H_q$ and $T_u > T_{\text{ignition}}$
de afname van de rookvrije hoogte (H_i) leidt er toe dat brandbare inventarisgoederen in aanraking komen met de warme bovenlaag (maximale stapelhoogte brandbare goederen: H_q ; indien de temperatuur van deze bovenlaag hoger is dan de ontstekings temperatuur T_{ignition} van

de brandbare goederen leidt dit tot branduitbreiding naar de koude onderlaag; in het navolgende zal een waarde van 300 °C voor T_{ignition} worden aangehouden.

- voorwaarde 3 (C3): $H_i < 0,1H$
het scheidingsvlak verplaatst zich naar beneden waardoor de hoogte van de onderlaag zeer gering wordt; dit is niet meer representatief voor een twee-zone situatie.
- voorwaarde 4 (C4): $A_{fi} < 0,5A_f$
het brandoppervlak is te groot in verhouding tot het vloeroppervlak van de brandruimte om de brand nog als “plaatselijk” te kunnen beschouwen.

In feite komt het erop neer dat voorwaarden 1 en 2 leiden tot aanpassing van de aanname van de initiële afbrandsnelheid (simulatie op basis van het twee-zone model) aan het geval van een één-zone modellering. Deze aanpassing is schematisch weergegeven in fig. 6.13.

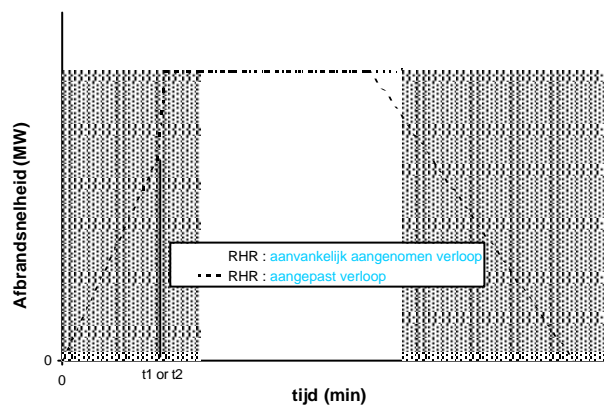


Fig. 6.13: Ontwerpkrommen voor de afbrandsnelheid

De hierboven aangegeven benadering is nog eens weergegeven in het schema volgens fig. 6.14. Hieruit is af te leiden onder welke omstandigheden (twee- of één-zone modellering) de ontwerp-temperatuurtempoerijkrommen moeten worden bepaald.

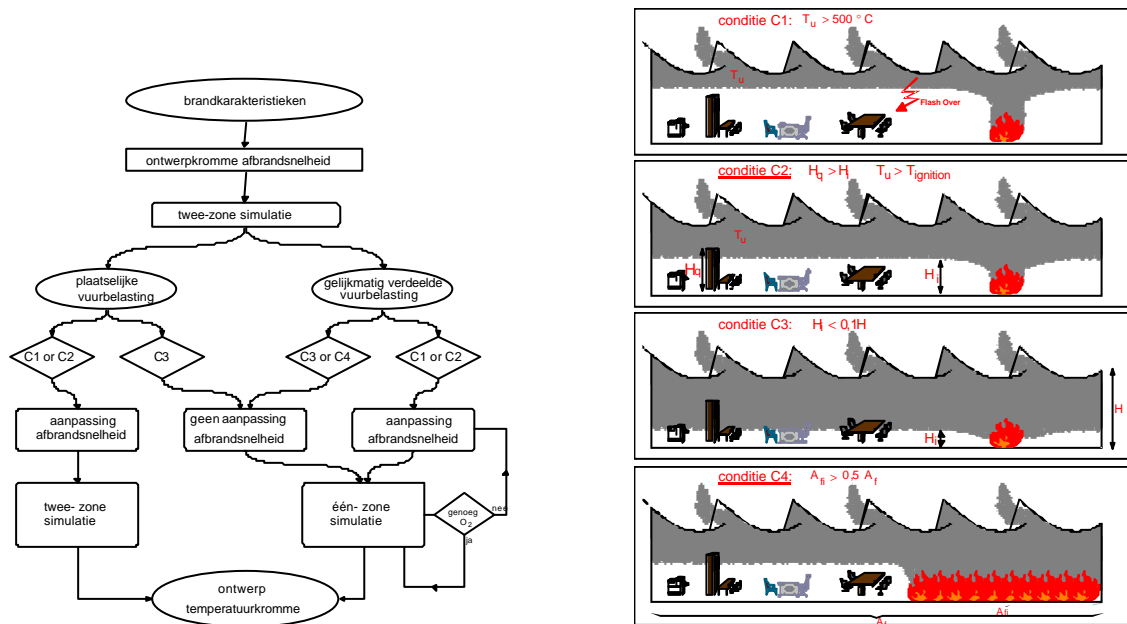


Fig. 6.14: Combinatie van één- en twee-zone modellen

7. MECHANISCHE BELASTING VOLGENS EUROCODE

Onder brandomstandigheden wordt de mechanische belasting beschreven door de volgende formule (zie ook uitdr. 6.11^b vlgns. EN 1990):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + (\Psi_{1,1} \text{ or } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

waarbij:

- $G_{k,i}$: karakteristieke waarde van de permanente belasting
- $Q_{k,1}$: karakteristieke waarde van de maatgevende veranderlijke belasting
- $Q_{k,i}$: karakteristieke waarde van de overige veranderlijke belastingen
- $\Psi_{1,1}$: combinatiefactor voor frequente waarde van de veranderlijke belasting
- $\Psi_{2,i}$: combinatiefactor voor quasi-permanente waarde van veranderlijke belastingen

Voor aanbevolen waarden van Ψ_1 en Ψ_2 wordt verwezen naar tabel 7.1, ontleend aan EN 1990. Merk op dat in Nationale Bijlagen van EN 1990 afwijkende waarden kunnen worden voorgeschreven.

Tabel 7.1: Aanbevolen waarden voor de combinatiefactoren Ψ_1 en Ψ_2

belasting	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Veranderlijke belasting, per gebouwcategorie (zie EN 1991-1.1)			
Categorie A : woningen, woongebouwen	0,7	0,5	0,3
Categorie B : kantoorruimten	0,7	0,5	0,3
Categorie C : bijeenkomstgebouwen	0,7	0,7	0,6
Categorie D : winkelcentra	0,7	0,7	0,6
Categorie E : opslaggebouwen	1,0	0,9	0,8
Categorie F : verkeersruimten voertuigen met een gewicht $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Categorie G : verkeersruimten, $30\text{kN} < \text{voertuigen met een gewicht} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Categorie H : daken	0	0	0
Sneeuwbelasting op gebouwen (zie EN1991-1.3)			
Finland,IJsland, Noorwegen, Zweden	0,70	0,50	0,20
Overige CEN Lidstaten, voor plaatsen gelegen op een hoogte $H > 1000\text{ m}$ boven zeeniveau	0,70	0,50	0,20
Overige CEN Lidstaten, voor plaatsen gelegen op een hoogte $H \leq 1000\text{ m}$ boven zeeniveau	0,50	0,20	0
Windbelastingen op gebouwen (zie EN1991-1.4)	0,6	0,2	0
Temperatuur (excl. brand) in in gebouwen (zie EN1991-1.5)	0,6	0,5	0

(ref.: prEN1990 - juli 2001)

Een begrip dat bij de beoordeling van het gedrag van constructies volgens de Eurocode een belangrijke rol speelt is de reductiefactor η_{fi} voor de bij brand maatgevende belasting. Deze wordt

gedefinieerd als $\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$ met E_d en $E_{d,fi}$ als het effect van de ontwerpwaarde van mechanische

belasting in het ontwerp bij kamertemperatuur en die van het ontwerp onder brandomstandigheden. Deze reductiefactor kan benaderd worden door:

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

waarbij:

$\psi_{fi,1}$ is de partiele belastingfactor betrokken op de maatgevend veranderlijke belasting.

Merk op dat de reductiefactor voor de bij brand maatgevende belasting (ψ_{fi}) sterk afhangt van de combinatiefactor $\psi_{1,1}$, die op haar beurt weer bepaald wordt het gebruik van het gebouw. Zie ook fig. 7.1, waarin ψ_{fi} is weergegeven als functie van de verhouding tussen de maatgevende veranderlijke belasting ($Q_{k,1}$) en de permanente belasting (G_k) voor verschillende waarden van de combinatiefactor $\psi_{1,1}$. Zie ook EN 1993.1.2 (staalconstructies) en in EN 1994.1.2 (staalbetonconstructies).

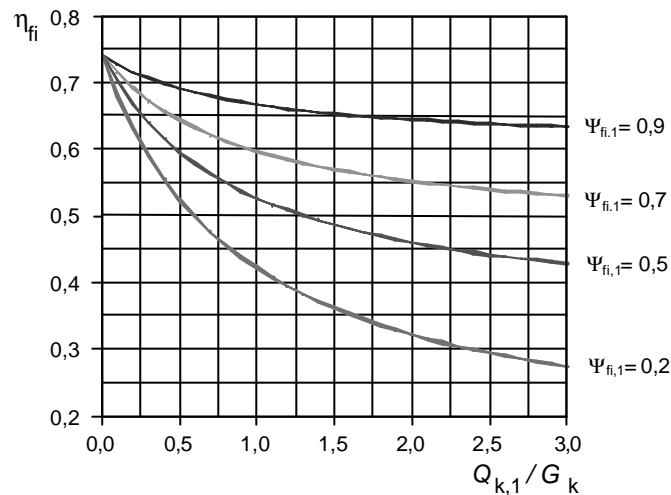


Fig. 7.1: De reductiefactor η_{fi} als functie van de verhouding $Q_{k,1} / G_k$ voor verschillende waarden van de combinatiefactor $\psi_{1,1}$

8. SLOTOPMERKINGEN

In dit deel van de syllabus zijn verschillende modellen besproken, die thans beschikbaar zijn om het temperatuurverloop van de gassen in een besloten ruimte ten gevolge van brand te berekenen. Ook is nagegaan welke informatie voor een dergelijke berekening noodzakelijk is. Ter bepaling van het temperatuurverloop in de constructie is het nodig de warmtestroom naar de constructie te kennen. Hierbij spelen warmte-uitwisseling door straling en convectie tussen de brandomgeving en de constructie een rol. Op de overwegingen die hierbij van belang zijn en op aannamen die in dit verband in de Eurocodes "Brand" worden gedaan met betrekking tot staal- en staal-betonconstructies, zullen in deel 2 van de syllabus worden besproken. Daarin komt ook de berekening van de temperatuurontwikkeling in constructie-elementen (thermische response) aan de orde.

Kent men de temperatuurontwikkeling in een constructie, dan is het beginsel mogelijk het mechanisch gedrag van de constructie onder brandomstandigheden te berekenen, e.e.a. afhankelijk van de mechanische belasting. Dit is het onderwerp van deel 3 van de syllabus.

LITERATUUR

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - June 1991
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second Edition - 13th April 1995
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317,517,618,832-February 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: " Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 – EUR 18867 EN
- [10] CEN; prEN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 – EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.

- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function - , NFSC WG4, Zürich, March 1996
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.
Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".
Hasemi Y., Yokobayashi Y. , Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: " Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept – The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1– Basis of s design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003