

Probabilistische Benadering Brandveiligheid

Invloed en toepasbaarheid van een probabilistische benadering op de brandveiligheid in gebouwen



Merijn Leurink
juni 2010

Probabilistische Benadering Brandveiligheid

Invloed en toepasbaarheid van een probabilistische benadering op de brandveiligheid in gebouwen

Auteur

Naam	Merijn Leurink
Datum	7 Juni 2010
Opleiding	HBO Bouwkunde
Afstudeerrichting	Bouwfysica

Bedrijf

Bedrijf	LBP SIGHT
Adres	Kelvinbaan 40
Plaats	Nieuwegein
Telefoon	030 2311377
Website	www.lbpsight.nl

Opleiding

Naam	Hogeschool Utrecht
Adres	Nijenoord 1
Plaats	Utrecht
Telefoon	030 238 8640

Begeleiding

Bedrijfsbegeleider	ing. Emiel van Wassenaar MSc
Begeleider Bouwfysica	ir. Liza Looijen
Begeleider Constructies	ir. Geert Daams

Algemene gegevens

Afstudeerder

Naam	Merijn Leurink
Studentnummer	1512726
Opleiding	Bouwkunde
Afstudeerrichting	Bouwfysica
Adres	Gerrit Achterberghove 29
Plaats	Nieuwegein
Telefoon	06 43589932
E-mail	merijn.leurink@student.hu.nl / merijnlk@gmail.com

Begeleider Bouwfysica

Naam	ir. Liza Looijen
Adres	Nijenoord 1
Plaats	Utrecht
Kamer	A.01.10
Telefoon	030 238 8494
E-mail	liza.looijen@hu.nl

Begeleider Constructies

Naam	ir. Geert Daams
Adres	Nijenoord 1
Plaats	Utrecht
Kamer	A.01.07
Telefoon	030 238 8640
E-mail	geert.daams@hu.nl

Bedrijfsbegeleider

Naam	ing. Emiel van Wassenaar MSc
Bedrijf	LBP SIGHT
Functie	Adviseur
Adres	Kelvinbaan 40
Plaats	Nieuwegein
Telefoon	030 2311377
E-mail	evw@lbpsight.nl

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van mijn onderzoek naar een probabilistische benadering op het gebied van brandveiligheid. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van mijn afstuderen aan de Hogeschool Utrecht, opleiding Bouwkunde. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van LBP|SIGHT, een adviesbureau op het gebied van bouwfysica, milieu en ruimtelijke ordening.

Na enkele maanden hard werken kijk ik tevreden terug naar een productieve en succesvolle afstudeerstage. Niet alleen ben ik blij dat ik een erg leuk onderzoek heb mogen uitvoeren, maar heb ik tijdens dit onderzoek ook veel geleerd over de achtergronden van brandveiligheid. Toch had dit onderzoek niet kunnen plaatsvinden zonder de hulp van vele personen. Een aantal van hen wil ik in het bijzonder bedanken. Ten eerste wil ik mijn bedrijfsbegeleiders Emiel van Wassenaar en Bram Kersten bedanken voor de vele leerzame opmerkingen en besprekingen. Daarnaast wil ik de andere collega's binnen LBP|SIGHT bedanken die mij hebben geholpen met mijn onderzoek en het opstellen en controleren van dit rapport. Ook wil ik mijn docentbegeleiders - Liza Looijen en Geert Daams - die van het begin af aan hebben geholpen met het aanpakken van dit onderzoek bedanken, en die onderweg naar het resultaat ook vele nuttige opmerkingen hebben gemaakt.

Speciale dank gaat uit naar de heer J. Mulder van de brandweer Utrecht en de heer J. van Sabben van de brandweer Leiden voor de interessante gesprekken over de praktische toepassingen van dit onderzoek.

Merijn Leurink
juni 2010

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	10
1.1	Aanleiding	10
1.2	Probleem- & doelstelling.....	10
1.3	Afbakening	11
1.4	Aanpak.....	11
1.5	Leeswijzer	11
2	Wettelijk kader	12
3	Huidige uitgangspunten brandveiligheid	14
3.1	Brandveiligheid in het Bouw- en Gebruiksbesluit.....	14
3.2	Standaard brandkromme.....	17
3.3	Normatief brandverloop & brandveiligheidsconcepten	19
4	Toepassing fysisch brandmodel voor constructieve veiligheid.....	20
4.1	Wettelijke achtergrond.....	20
4.2	Nieuwe benadering	21
4.3	Correctiefactoren Eurocodes.....	22
4.3.1	Voorbeeld invloed correctiefactoren.....	24
4.3.2	Kritische beschouwing	24
4.4	Vershil fysisch brandmodel met standaard brandkromme.....	25
4.4.1	Scenario 1, lokale brand	25
4.4.2	Scenario 2, compartimentbrand	28
5	Toepassing fysisch brandmodel voor veilig vluchten	30
5.1	Maximaal beschikbare vluchttijd.....	30
5.2	Berekening benodigde vluchttijd.....	31
5.2.1	Detectietijd.....	32
5.2.2	Alarmeringstijd.....	32
5.2.3	Ontruimingstijd.....	33
5.3	Resultaten berekening	34
6	Risicobenadering.....	35
6.1	Persoonlijk risico	35
6.1.1	Aanvaardbaar persoonlijk risico	36
6.2	Groepsrisico.....	37
6.3	Risicoanalyse	38
7	Toepasbaarheid	39
7.1	Fysisch brandmodel	39
7.2	Toepasbaarheid risicobenadering	41
8	Conclusie en advies	42
8.1	Algemeen.....	42
8.2	Toepassing probabilistische benadering op constructieve veiligheid.....	42
8.2.1	Advies toepassing probabilistische benadering op constructieve veiligheid.....	43
8.3	Toepassing probabilistische benadering op vluchtveiligheid	43
8.3.1	Advies toepassing probabilistische benadering op vluchtveiligheid	43
9	Literatuuropgave	44
10	Symbolenlijst	46

Bijlagen

Bijlage I	Fysisch Brandmodel
Bijlage II	Constructieve berekening
Bijlage III	Tekeningen
Bijlage IV	Berekening risicobenadering
Bijlage V	Vergelijking fysisch brandmodel met vultijdenmodel
Bijlage VI	Checklist invoer Ozone

Samenvatting

De huidige brandveiligheidsregelgeving heeft enkele grote beperkingen. Zo wordt er uitgegaan van een effectbenadering en niet gekeken naar het werkelijke risico in een gebouw. Hierdoor zijn de brandveiligheidsvoorzieningen niet goed afgestemd op het werkelijke gebruik van het gebouw, met verschillen in het veiligheidsniveau als gevolg. Een probabilistische benadering leidt daarentegen tot brandveiligheidsvoorzieningen die beter zijn afgestemd op het werkelijke gebruik van een gebouw. Om aan het in de bouwregelgeving beoogde veiligheidsniveau te voldoen, kan er in sommige situaties met deze benadering worden bespaard op de brandveiligheidsvoorzieningen. In andere situaties zal een probabilistische benadering daarentegen leiden tot meer brandveiligheidsvoorzieningen dan vanuit de huidige bouwregelgeving zijn vereist om aan het beoogde veiligheidsniveau te voldoen.

In de huidige bouwregelgeving mag er, vanuit de Eurocodes voor constructieve veiligheid bij brand gerekend worden met een probabilistische benadering. Deze benadering heeft op het moment van schrijven enkele beperkingen. Zo leidt de toepassing van Nederlandse correctiefactoren op het brandvermogen tot een onrealistische benadering. De toepassing van een BMI leidt bijvoorbeeld tot een snellere opkomst van de brandweer, waardoor er met een minder zware brand mag worden gerekend. Hierdoor is soms geen brandwerende bekleding meer noodzakelijk. Echter, doordat er geen bekleding meer noodzakelijk is, kan de constructie bezwijken voordat de brandweer arriveert. Dit, terwijl het uitgangspunt achter de reductie een snelle inzet van de brandweer is waardoor de constructie wordt beschermd tegen bezwijken. Een correctie op de brandduur in plaats van het brandvermogen leidt in dit geval dan ook tot een veiligere en realistischere benadering.

Een probabilistische methode voor de vluchtveiligheid van de aanwezigen is op dit moment niet mogelijk. Er is te weinig statistische informatie aanwezig over de kansen van bepaalde scenario's bij brand. Deze benadering heeft daarnaast de volgende beperkingen:

- Er is te weinig kennis aanwezig bij de brandweer om deze modellen te kunnen toetsen.
- De toepassing van een probabilistische benadering leidt tot een gebruiksbeperking, die moeilijk te handhaven is.
- Een probabilistische benadering op het veilig vluchten leidt, indien een bepaald overlijdensrisico geaccepteerd wordt, tot de acceptatie van een kans op een bepaald aantal doden. Verwacht wordt dat het bevoegd gezag niet verantwoordelijk gehouden wil worden voor de acceptatie van deze risico.

Geadviseerd wordt om het fysisch brandmodel alleen voor de toetsing van hoofddraagconstructies toe te passen als het project aan de volgende criteria voldoet:

- Het gebouw heeft een eenvoudige geometrie met maximaal vier gevelvlakken.
- Gegevens over de vuurlast, het brandvermogen en de branduitbreidingsnelheid van de inventaris zijn bekend.
- De projectontwikkelaar is akkoord met eventuele gebruiksbeperkingen die kunnen volgen uit de berekening.
- De brandweer van de gemeente waarin het project is geprojecteerd heeft voldoende kennis van het fysisch brandmodel om de berekening te beoordelen.

Bij een berekening aan de hand van het fysisch brandmodel moet de invloed van de correctiefactoren kritisch worden bekeken. Daarnaast moet de constructie op het zonemodel en het lokaal brandmodel worden getoetst.

Begrippenlijst

Begrip	Betekenis
BMI	Brandmeldinstallatie: installatie die brand detecteert en vervolgens een brandalarm in werking stelt. Deze installatie kan ook worden voorzien van automatische doormelding van een brandalarm naar de brandweer.
Brandcompartiment	Eén of meerdere ruimten omgrenst door een brandwerende scheiding, zodat de brand gedurende een bepaalde tijd beperkt blijft tot deze ruimte(n).
Brandruimte	Besloten ruimte waarbinnen de brand heerst
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 en doofstadium, samen met de gebouwomgeving en systemen of installaties die het brandverloop beïnvloeden.
Branduitbreidingssnelheid	Tijdsduur tussen het ontstaan van brand en het moment dat de brand een vermogen van 1 MW bereikt.
Brandvermogen	Vermogen dat een brand per m ² maximaal kan produceren.
Flashover	Moment waarop de temperatuur in de brandruimte dusdanig hoog wordt dat alle onverbrande materialen in de ruimte tegelijk ontbranden.
Onvolledige verbranding	Verbranding waarbij de verbrandingsproducten nog chemische reacties met zuurstof kunnen aangaan (bijvoorbeeld: CO bij hoge temperaturen).
Pyrolyse	Ontleding van een stof door verhitting. Pyrolyse treedt vooral op bij organische stoffen met een gecompliceerde moleculestructuur, zoals hout, textiel, zware olie en vele kunststoffen. Bij verhitting van deze stoffen treedt eerst pyrolyse op, waarna de ontledingsproducten voor de eigenlijke verbranding zorgen.
RHR	Brandvermogen (Rate of Heat Release) uitgedrukt in MW.
RWA	Rook- & Warmteafvoer: installatie die rook uit een ruimte afvoert
Slow-whoop	Sirene met een specifiek geluidsignaal bedoelt voor de alarmering van de aanwezigen bij brand.
Sprinklerinstallatie	Installatie in een gebouw die bij brand een waterdruppels over de brand sproeit.
Volledige verbranding	Verbranding waarbij de verbrandingsproducten geen verdere chemische reacties met zuurstof kunnen aangaan (bijvoorbeeld: CO ₂).
Vultijdenmodel	Model, opgesteld door TNO, dat op dit moment wordt toegepast om de rookontwikkeling in een brandruimte te berekenen.
Vuurlast	Hoeveelheid brandbaar materiaal per m ²
WBDBO	Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag

1 Inleiding

Jaarlijks vallen tientallen doden en ontstaat er voor miljoenen euro schade door brand. Brandveiligheid speelt dan ook een belangrijke rol in de bouwregelgeving. Zo gelden er strenge eisen aan het aantal vluchtroutes, de sterkte van constructies bij brand en het brandveilig gebruik van bouwwerken. Ondanks dat er een gestaagde teruggang is van het aantal doden, kampt de huidige bouwregelgeving op het gebied van brandveiligheid met een aantal problemen.

1.1 Aanleiding

In de huidige brandveiligheidsregelgeving worden alleen voorschrijvende (prescriptieve) eisen opgenomen waar een gebouw aan moet voldoen. Zolang er aan de eisen wordt voldaan, is het gebouw voldoende brandveilig. Hierbij wordt uitgegaan van een effectbenadering. Er is sprake van een calamiteit en de regelgeving moet het effect van deze calamiteit beperken. Met het werkelijke risico van brand wordt geen rekening gehouden. Hierdoor ontstaat een onrealistische regelgeving. Een brand in een staalfabriek zal zich bijvoorbeeld anders ontwikkelen dan een brand in een houtzagerij. Deze gebouwen zullen, ondanks de verschillen, toch moeten voldoen aan dezelfde regelgeving, waardoor dezelfde maatregelen moeten worden toegepast. Hierdoor ontstaan verschillende veiligheidsniveaus. De brandveiligheidsvoorzieningen zijn immers niet afgestemd op het werkelijke risico.

1.2 Probleem- & doelstelling

Een andere benadering voor de brandveiligheid is een probabilistische benadering waarbij uit wordt gegaan van de werkelijke risico's in een gebouw. Deze benadering wordt sinds kort toegepast op het gebied van constructieve veiligheid bij brand. Voor andere aan de brandveiligheid gerelateerde onderwerpen wordt de toepassing van een risicobenadering (probabilistische benadering) nog onderzocht. Voor een praktische toepassing van de probabilistische benadering is het van belang te weten hoe de veiligheidsvoorzieningen die uit een probabilistische benadering volgen zich verhouden tot de huidige regelgeving. Ook is de toepasbaarheid in de praktijk van belang. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt dan ook:

"Welke invloed heeft een probabilistische brandveiligheidsbenadering op de brandveiligheid in een bouwwerk en is deze benadering ook toepasbaar?"

Ter beantwoording van de hoofdvraag worden de volgende deelvragen onderzocht:

- Hoe wordt de probabilistische benadering ingezet voor de berekening van de constructieve veiligheid bij brand?
- Wat zijn de voordelen van deze benadering?
- Wat zijn de beperkingen van deze benadering?
- Hoe kan een probabilistische benadering worden toegepast op de vluchtveiligheid van aanwezigen?
- De voordelen en beperkingen van een probabilistische benadering.

1.3 Afbakening

Een probabilistische benadering zou op veel onderwerpen binnen de brandveiligheid kunnen worden toegepast. In verband met de beschikbare hoeveelheid tijd heeft dit onderzoek zich beperkt tot de constructieve veiligheid en de vluchtveiligheid van de aanwezigen in een gebouw.

In de risicobenadering zijn kansen op gebeurtenissen van groot belang. Dit onderzoek heeft zich echter beperkt tot de toepassing van deze kansen. Er is dus geen statistisch onderzoek uitgevoerd. Daar waar statistische gegevens aanwezig zijn, zijn deze in het onderzoek toegepast. Voor zaken waar geen statistische informatie van aanwezig is, zijn de kansen bepaald aan de hand van aannames.

1.4 Aanpak

Ten behoeve van dit onderzoek is eerst een uitgebreid literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierbij is eerst het wettelijk kader onderzocht. Tevens is onderzoek uitgevoerd naar de achtergrond van het nieuwe rekenmodel dat in de Eurocodes wordt gehanteerd. Ter beoordeling van de invloed van de nieuwe benadering van de Eurocodes op de brandwerende voorzieningen is er gerekend met een voorbeeldproject. Dit project betreft een industriële hal van 2.600 m².

Vervolgens is onderzocht of de benadering van de Eurocodes ook kan worden toegepast ter beoordeling van het risico dan de aanwezigen in een gebouw lopen bij brand. Tevens is er overleg gevoerd met de brandweer. Tijdens dit overleg is onderzocht wat eventuele praktische bezwaren zouden kunnen zijn bij de toepassing van deze nieuwe methoden.

1.5 Leeswijzer

In het hierna volgende hoofdstuk, hoofdstuk 2, wordt het wettelijk kader behandeld. In dat hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de huidige wetgeving is opgebouwd en functioneert. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens dieper ingegaan op de uitgangspunten en beperkingen van de huidige wetgeving.

In hoofdstuk 4 wordt de nieuwe benadering van de Eurocodes uitgewerkt. Aan de hand van een voorbeeldproject worden de mogelijkheden en beperkingen van het nieuwe rekenmodel in de Eurocodes uitgewerkt. Ook wordt een vergelijking gemaakt tussen het huidige veiligheidsniveau en het veiligheidsniveau dat is berekend aan de hand van dit rekenmodel.

In hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe dit rekenmodel kan worden toegepast voor de bepaling of alle in het gebouw aanwezig zijnde mensen veilig kunnen vluchten. In hoofdstuk 6 wordt deze methode gekoppeld aan een probabilistische benadering voor veilig vluchten.

In het laatste hoofdstuk, hoofdstuk 7, wordt de toepasbaarheid van een probabilistische benadering behandeld. Er wordt ingegaan op de kansen en beperkingen voor de toepasbaarheid van een probabilistische benadering voor de constructieve veiligheid en de vluchtveiligheid.

2 Wettelijk kader

In de huidige brandveiligheidsregelgeving worden gebouwen getoetst aan prescriptieve eisen. Een gebouw is pas voldoende brandveilig als aan alle eisen wordt voldaan. De geldende eisen zijn opgenomen in:

- het Bouwbesluit;
- het Gebruiksbesluit;
- de Wet Milieubeheer.

In het Bouwbesluit, dat wordt aangestuurd vanuit de Woningwet, zijn voornamelijk bouwkundige eisen opgenomen waaraan elk gebouw minimaal moet voldoen. Deze eisen worden gegeven als functionele eisen. Om aan de functionele eis te voldoen, kan gebruik worden gemaakt van de in het Bouwbesluit opgenomen prestatie-eisen. Als er aan de prestatie-eisen wordt voldaan, dan wordt er ook aan de functionele eisen voldaan. Als er niet aan de prestatie-eisen kan worden voldaan, dan moet een gelijkwaardige oplossing worden bedacht.

Naast eisen op het gebied van brandveiligheid zijn er in het Bouwbesluit ook eisen opgenomen met betrekking tot de constructieve veiligheid van een bouwwerk, een gezonde omgeving, de bruikbaarheid en de energiezuinigheid van een bouwwerk. De eisen die in het Bouwbesluit zijn opgenomen zijn minimumeisen waar een gebouw aan moet voldoen. Op het gebied van brandveiligheid geeft het Bouwbesluit eisen voor⁽¹⁾:

- weerstand tegen bezwijken van de hoofddraagconstructie bij brand;
- brandbaarheid van materialen in de constructie;
- maximale omvang van brandcompartimenten;
- maximale loopafstanden;
- brand- en rookwerendheid van vluchtroutes;
- eisen met betrekking tot de WBDBO tussen brandcompartimenten.

Het uitgangspunt van veel van de prestatie-eisen op het gebied van brandveiligheid is de standaard brandkromme. De standaard brandkromme is een wiskundige benadering van verschillende soorten branden. In hoofdstuk drie wordt dieper ingegaan op de standaard brandkromme.

Vanuit het Bouwbesluit wordt voor verschillende prestatie-eisen verwezen naar NEN normen. In de NEN normen wordt op een gedetailleerde manier omschreven hoe aan een bepaalde prestatie-eis moet worden voldaan of hoe een bepaalde berekening moet worden uitgevoerd.

In sommige situaties is het om financiële of andere redenen niet wenselijk of mogelijk om aan een bepaalde prestatie-eis uit het Bouwbesluit te voldoen. In dit geval biedt het Bouwbesluit de mogelijkheid voor een gelijkwaardige oplossing. Dit houdt in dat er een oplossing moet worden bedacht waardoor er, ondanks dat er niet wordt voldaan aan de prestatie-eis, wel aan de functionele eis van het betreffende Bouwbesluitartikel wordt voldaan. Deze oplossing moet vervolgens door de gemeente en brandweer worden goedgekeurd.

Een voorbeeld hiervan is een groot brandcompartiment van meer dan 1.000 m². Hoewel het Bouwbesluit voorschrijft dat een brandcompartiment vaak niet groter mag zijn dan 1.000 m², is het in veel situaties niet wenselijk om aan deze eisen te voldoen. Het Bouwbesluit biedt dan ook de mogelijkheid om toch brandcompartimenten groter dan 1.000 m² toe te kunnen passen. In dat geval kan er via bepaalde methodes, zoals de Methode Beheersbaarheid van Brand, een groot brandcompartiment worden toegepast waar een gelijkwaardige veiligheid heerst als in een brandcompartiment van minder dan 1.000 m². Om deze veiligheid te creëren zijn diverse brandveiligheidsvoorzieningen mogelijk. Zo kan een brandmeldinstallatie of rook- en warmteafvoer worden toegepast. Deze installaties zorgen voor meer veiligheid, omdat ze de aanwezigen respectievelijk eerder waarschuwen of de rook in een ruimte afvoeren⁽²⁾.

Naast het Bouwbesluit is er ook het Gebruiksbesluit. In het Gebruiksbesluit zijn regels met betrekking tot de inrichting en het gebruik opgenomen⁽³⁾. Deze regels moeten waarborgen dat een gebouw voldoende brandveilig wordt gebruikt. Hierbij kan gedacht worden aan de aanwezigheid en het type brandmeldinstallatie dat in een gebouw aanwezig moet zijn of de brandbaarheid van inventaris in bijvoorbeeld vluchtroutes. Net als het Bouwbesluit is ook het Gebruiksbesluit op elk gebouw van toepassing.

Een ander deel van de brandveiligheidsregelgeving is opgenomen in de Wet Milieubeheer. Dit deel van de regelgeving richt zich met name op de eisen omtrent de opslag van brandgevaarlijke stoffen en stoffen die bij brand een grote milieuschade kunnen opleveren. Deze eisen zijn bijvoorbeeld opgenomen in de PGS-richtlijnen welke worden aangestuurd vanuit de Wet Milieubeheer⁽⁴⁾.

3 Huidige uitgangspunten brandveiligheid

Voor de huidige regelgeving op het gebied van brandveiligheid worden diverse uitgangspunten gehanteerd. Deze uitgangspunten zijn opgenomen in het Bouw- en Gebruiksbesluit. Zo hanteert het Bouwbesluit uitgangspunten voor het veilig ontruimen van een gebouw. Ook gelden er eisen aan de sterkte van de constructie of de brandwerendheid van scheidingsconstructies. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de standaard brandkromme. In situaties waar niet kan worden voldaan aan de prestatie-eisen kan gebruik worden gemaakt van gelijkwaardigheid aan de hand van een normatieve brandverloop. In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten van de huidige regelgeving behandeld.

3.1 Brandveiligheid in het Bouw- en Gebruiksbesluit

In de huidige bouwregelgeving zijn in het Bouw- en Gebruiksbesluit eisen opgenomen die de veiligheid in een gebouw moeten garanderen bij brand. Dit bewerkstelligt het Bouwbesluit aan de hand van een drietal doelstellingen:

- de kans op het ontstaan van brand beperken;
- de brand beheersbaar houden voor de brandweer;
- waarborgen dat de aanwezigen het gebouw veilig kunnen ontluchten.

Om de kans op brand te beperken, stelt het Bouwbesluit eisen aan de toegepaste materialen in alle ruimten. De toegepaste materialen in deze ruimtes moeten moeilijk brandbaar zijn of onbrandbaar zijn als ze bloot worden gesteld aan hoge temperaturen⁽¹⁾.

Om de brand beheersbaar te houden voor de brandweer wordt een gebouw opgedeeld in brandcompartimenten van bijvoorbeeld elk 1.000 m² die van elkaar gescheiden worden door een veelal 60 minuten brandwerende scheidingsconstructies⁽¹⁾, zie figuur 3.1. Deze scheidingsconstructie voorkomt dat de brand door- of overslaat naar een ander brandcompartiment of pand. Voor bestaande en tijdelijke bouw geldt een lagere eis aan de weerstand tegen branddoor- en brandoverslag. Uitgangspunt achter deze eis is dat na een bepaalde tijd de brandweer de brand onder controle heeft. Tot deze tijd moet de brandscheiding verspreiding van de brand voorkomen. Daarnaast gelden er eisen om de repressieve inzet van de brandweer in bepaalde situaties efficiënter te maken. Hierbij kan gedacht worden aan de aanwezigheid van een droge blusleiding en aan een brandweerlift in gebouwen van een bepaalde hoogte⁽¹⁾.



Figuur 3.1

Om de brand beheersbaar te houden moeten gebouwen worden onderverdeeld in brandcompartimenten.

Ook geeft het Bouwbesluit prestatie-eisen om het veilig ontruimen van de aanwezigen in het gebouw te waarborgen. Het Bouwbesluit hanteert daarvoor eisen op het gebied van loopafstanden, deurbreedtes en draairichtingen van deuren. Zo eist het Bouwbesluit dat naast brandcompartimenten een gebouw ook moet worden onderverdeeld in rookcompartimenten. Deze omhulling van een rookcompartiment moet gedurende 30 minuten voorkomen dat de rook zich verspreidt naar een aangrenzend rook- of brandcompartiment⁽¹⁾. In deze compartimenten geldt een maximale loopafstand. Aangezien rook giftig is en zich tijdens een brand snel verspreid, is het van belang dat mensen zo snel mogelijk uit de rook kunnen vluchten (zie figuur 3.2). Als eis geldt daarom een maximale loopafstand van, afhankelijk van de bezettingsgraadklasse, bijvoorbeeld 30 meter tussen een plek in het rookcompartiment en een toegang van dit compartiment⁽¹⁾. Uitgangspunt hierachter is dat mensen ca. 1 meter per seconde afleggen tijdens het vluchten en maximaal 30 seconde met ingehouden adem door de rook kunnen vluchten.



Figuur 3.2

Binnen 30 meter moeten aanwezigen uit de rook kunnen vluchten.

Om te waarborgen dat iedereen de brandruimte en het gebouw op tijd kan ontvluchten gelden er eisen aan de opvang- en doorstroomcapaciteit van vluchtroutes. Zo moeten alle aanwezigen binnen één minuut een rookcompartiment kunnen ontvluchten⁽¹⁾. Daarnaast gelden er eisen aan de maximale tijd waarin een gebouw moet zijn ontruimd. Om dit te bewerkstelligen gelden er minimum eisen aan de breedte van deuren en vluchtroutes. Zo moet de totale breedte van alle toegangen van een rookcompartiment even groot zijn als het vloeroppervlak van het rookcompartiment vermenigvuldigd met een bepaalde waarde die afhankelijk is van de bezettingsgraadklasse. Tevens mogen deuren in een vluchtroute niet tegen de vluchtroute in draaien. Deze eis geldt om opstoppen te voorkomen⁽¹⁾.

Waar het Bouwbesluit eisen stelt aan de bouwkundige eigenschappen van een gebouw stelt het Gebruiksbesluit eisen aan de inrichting en het gebruik van een gebouw. In het gebruiksbesluit zijn bijvoorbeeld eisen opgenomen aan de brandbaarheid van de aankleding van een ruimte, maar ook over de aanwezigheid van inventaris in vluchtroutes en de aanwezigheid van vluchtroute-aanduiding⁽²⁾.

In de huidige regelgeving zitten enkele beperkingen die voor een onrealistische brandveiligheidsbenadering zorgen. Een belangrijke beperking is dat de standaard brandkromme, die vaak als uitgangspunt geldt voor de prestatie-eisen, uitgaat van een brandkromme die voor alle ruimten gelijk is, ongeacht het gebruik van de ruimte.

Daarnaast gaat de huidige regelgeving uit van een effectbenadering. De regelgeving gaat ervan uit dat er al een brand is in de ruimte. Er wordt geen rekening gehouden met het werkelijke risico van brand in de ruimte. Zo gaat de standaard brandkromme bijvoorbeeld uit van een volledig ontwikkelde brand, waarbij het gehele brandcompartiment als brandend wordt verondersteld. Hoewel dit bij veel branden het geval zal zijn, is een volledig ontwikkelde brand niet vanzelfsprekend. Bij een staalfabriek zal de hoeveelheid brandbaar materiaal bijvoorbeeld dusdanig beperkt zijn dat een volledig ontwikkelde brand onwaarschijnlijk is, terwijl in een houtzagerij juist wel een grote brand te verwachten is. Bij branden die zich erg langzaam ontwikkelen, is een volledig ontwikkelde brand ook onwaarschijnlijk, omdat de brandweer al aanwezig zal zijn voordat de brand zich ontwikkelt tot een volledig ontwikkelde brand.

Ondanks deze verschillen moeten bijvoorbeeld alle industriegebouwen aan dezelfde eisen voldoen of voldoen aan oplossingen die een gelijkwaardig veiligheidsniveau bieden als beoogd in het Bouwbesluit. Het gevolg van deze regelgeving is dat er verschillende veiligheidsniveaus in gebouwen aanwezig zijn. Een gebouw met een trage brandontwikkeling zal dus door de brandwerende voorziening, die afgestemd is op een snel ontwikkelende brand, vele malen veiliger zijn dan een gebouw met een snelle brandontwikkeling, waar de brandwerende voorzieningen zijn afgestemd op een zich even snel ontwikkelende brand. Dit is principieel fout aangezien er bij de staalfabriek onbedoeld geïnvesteerd wordt in een veel hoger veiligheidsniveau dan bij een houtzagerij. Ook is het mogelijk dat bepaalde gebouwen dusdanig brandgevaarlijk zijn dat de vereiste brandveiligheidsvoorzieningen niet het in de regelgeving beoogde veiligheidsniveau garanderen.

Voor een betere afstemming van het veiligheidsniveau zou er in plaats van een effectbenadering een probabilistische benadering aan de hand van een natuurlijke brandontwikkeling moeten worden toegepast. In deze benadering worden de brandveiligheidsvoorzieningen afgestemd op de risico's van verschillende brandscenario's. Elk scenario beschrijft een bepaalde aaneenschakeling van gebeurtenissen en een bepaalde brandontwikkeling. Het risico van een scenario wordt vervolgens bepaald door de kans op het scenario vermenigvuldigd met het effect van het scenario. Door te inventariseren welke scenario's een onacceptabel groot risico vormen, kan efficiënt worden bepaald welke brandveiligheidsinstallaties benodigd zijn voor een acceptabel brandveiligheidsniveau. Een eerste aanzet van de toepassing van een probabilistische benadering in plaats van een effectbenadering is de rekenwijze van de Eurocode, welke in hoofdstuk vier zal worden behandeld.

3.2 Standaard brandkromme

Een belangrijk uitgangspunt in het Bouwbesluit is de standaard brandkromme. Deze kromme beschrijft de temperatuurontwikkeling in een ruimte tijdens een brand. De temperatuur die volgt uit de standaard brandkromme is alleen afhankelijk van de duur van de brand. De ruimte-karakteristieken en het gebruik van een ruimte spelen dus geen rol. Aan de hand van deze kromme kunnen onder andere hoofdconstructies worden getoetst op de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken. Ook wordt de standaard brandkromme toegepast voor de toetsing van de weerstand tegen branddoorslag van een constructie.

De standaard brandkromme is vastgelegd in de ISO 834 en de NEN-EN 1363. De standaard brandkromme wordt beschreven volgens de formule:

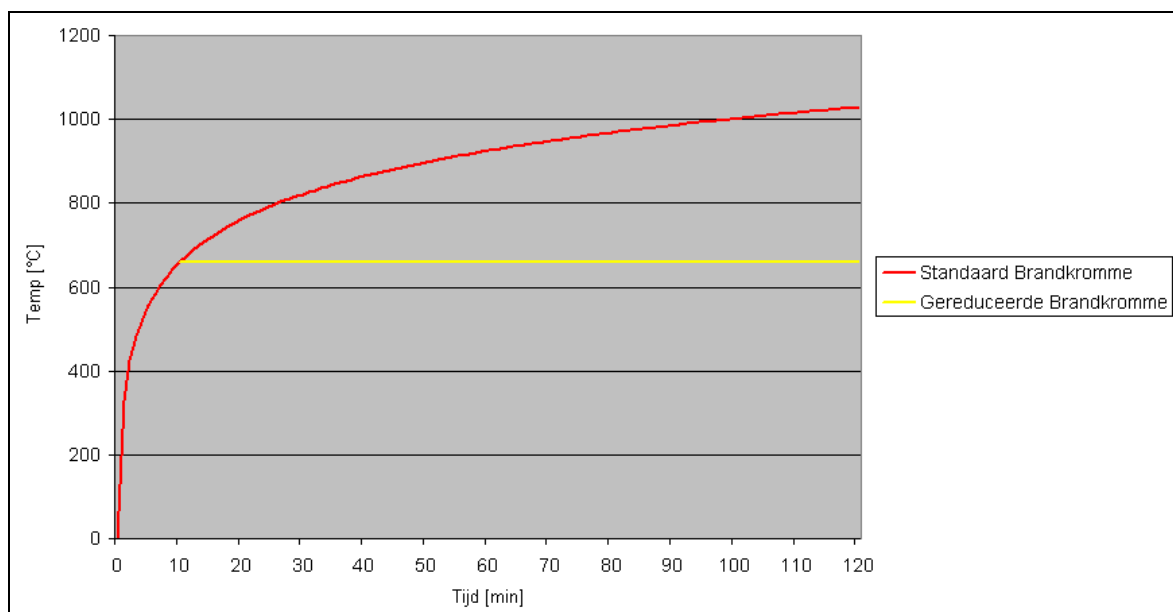
$$\Theta = 345 \cdot \log(8t + 1)$$

Met hierin:

Θ : temperatuur in °C

t : tijd in minuten

Naast de standaard brandkromme is er ook de gereduceerde brandkromme. De gereduceerde brandkromme beschrijft een brand in de buitenlucht. Deze brandkromme wordt bijvoorbeeld toegepast om de brandwerendheid van buiten naar binnen te bepalen. Een brand conform de gereduceerde brandkromme ontwikkelt zich op dezelfde wijze als een brand conform de standaard brandkromme, echter na tien minuten zal de temperatuur niet meer stijgen en neutraal op 658°C blijven. Deze twee brandkrommen zijn weergegeven in figuur 3.3.

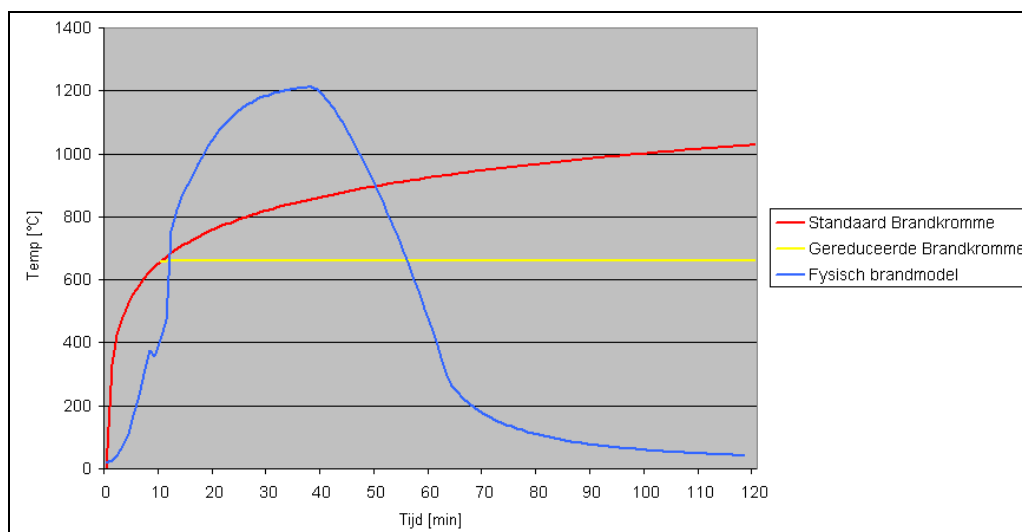


Figuur 3.3

Standaard en gereduceerde brandkromme

De standaard brandkromme gaat uit van een volledig ontwikkelde brand in een ruimte waarbij alle materialen in brand zullen staan⁽⁵⁾. Hierbij wordt uitgegaan van een bepaalde hoeveelheid kg vuren hout per m². De brandkromme is oorspronkelijk in 1916 in de VS ontwikkeld voor het toetsen van constructies. Het voordeel van een gestandaardiseerde brandkromme was dat verschillende constructies objectief met elkaar konden worden vergeleken. In de jaren '70 is de brandkromme vastgelegd in de Nederlandse wetgeving. Sinds de ontwikkeling van het model is er echter weinig aan de uitgangspunten veranderd. Dit terwijl de gemiddelde vuurlast in bijvoorbeeld woningen flink is toegenomen. Daarnaast is ook de samenstelling van de vuurlast veranderd. Hoewel de standaard brandkromme uitgaat van alleen brandend vuren hout, zijn er tegenwoordig veel kunststof producten in ruimten aanwezig. Aangezien kunststof producten een ander brandgedrag hebben dan hout heeft dit grote gevolgen voor de brandontwikkeling in een ruimte.

Ter vergelijking is de brandontwikkeling aan de hand van de standaard brandkromme vergeleken met een realistischere brandontwikkeling aan de hand van het fysisch brandmodel. In het fysisch brandmodel is wel rekening gehouden met de invloed van de ruimte en met de inventaris. Dit resultaat is weergegeven in figuur 3.4. Uit deze vergelijking kan geconcludeerd worden dat een natuurlijke brandontwikkeling, als berekend met het fysisch brandmodel, zich zeer anders ontwikkelt dan wordt aangenomen in de standaard brandkromme. Een natuurlijke brand ontwikkelt zich in de eerste minuten langzaam. Hierna treedt een periode van zeer snelle ontwikkeling op, de flashover, gevolgd door een fase waar de temperatuur aanzienlijk hoger is dan in de standaard brandkromme. Na ca. 40 minuten wordt het hoogtepunt bereikt en dooft de brand geleidelijk uit.



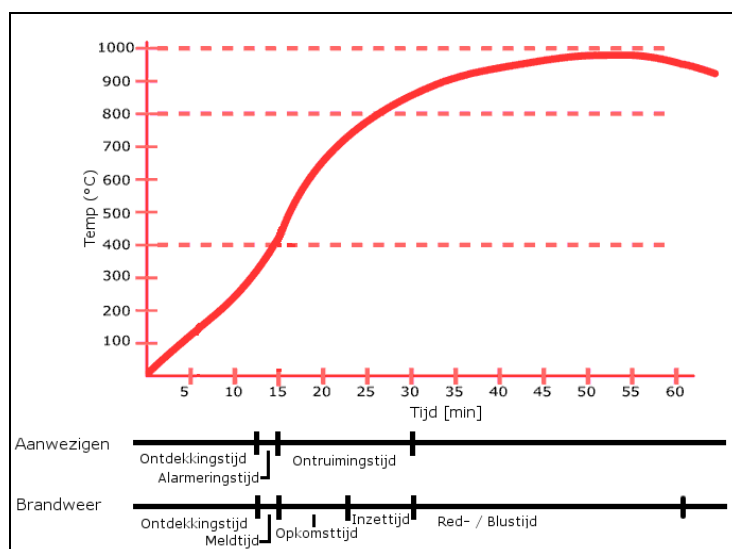
Figuur 3.4

Vergelijking standaard brandkromme met natuurlijk brandverloop.

3.3 Normatief brandverloop & brandveiligheidsconcepten

In bepaalde situaties is het niet mogelijk om aan alle prestatie-eisen van het Bouwbesluit te voldoen. In deze situatie mag er gekozen worden voor een oplossing die een gelijkwaardige veiligheid biedt als beoogd in het Bouwbesluit. Enkele van deze methoden zijn vastgelegd in de brandveiligheidsconcepten van het Ministerie van Binnenlandse Zaken⁽⁶⁾. Deze methoden maken gebruik van een normatief brandverloop dat is afgestemd op de gebruiksfunctie van een gebouw.

In tegenstelling tot de standaard brandkromme gaat het normatief brandverloop uit van een natuurlijke brandontwikkeling waarbij de brand zich geleidelijk ontwikkelt. In een normatief brandverloop worden daarnaast bepaalde gebeurtenissen gekoppeld aan het brandverloop. Het tijdstip waarop verschillende gebeurtenissen plaats vinden, is afhankelijk van het type gebouw. In de gebeurtenissen wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds het ontluchten en ontruimen van het gebouw en anderzijds de inzet van de brandweer. Een voorbeeld van een normatief brandverloop is weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5

Normatief brandverloop

Een normatief brandverloop is bepaald aan de hand van brandproeven in verschillende ruimten. Aan de hand van deze onderzoeken is een gemiddelde temperatuurcurve opgesteld. In deze brandkromme wordt in tegenstelling tot de standaard brandkromme rekening gehouden met een pre-flashover fase. De pre-flashover fase is de eerste fase van een brand. Hierin stijgt de temperatuur gestaag tot het punt dat alle in de ruimte aanwezige materialen ontbranden. Vanaf dat punt zal de temperatuur in de ruimte snel stijgen. Hoewel de aanwezigheid van de pre-flashoverfase een kleine verbetering is heeft het model dezelfde beperkingen als de standaard brandkromme. Daarnaast liggen de gehanteerde temperaturen door de pre-flashover fase in het begin van de brand flink lager dan in de standaard brandkromme en berekende natuurlijke brandverloop. Aangezien deze fase, afhankelijk van de situatie, erg kort kan zijn is het dus veiliger om de standaard brandkromme toe te passen.

4 Toepassing fysisch brandmodel voor constructieve veiligheid

Een nieuwe ontwikkeling in de Nederlandse wetgeving zijn de Eurocodes. Deze nieuwe wetgeving heeft de huidige wetgeving per 1 april 2010 met betrekking tot constructieve veiligheid vervangen⁽⁷⁾. De Eurocodes zijn met name interessant aangezien de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken bij brand op meerdere manieren kan worden berekend. Zo kan er naast de standaard brandkromme ook getoetst worden aan een natuurlijke brandontwikkeling aan de hand van het fysisch brandmodel⁽⁸⁾.

4.1 Wettelijke achtergrond

De huidige normen zijn alleen van toepassing op de Nederlandse bouw. In het buitenland gelden andere regels. Omdat de eisen per land verschillen, werkt dit het vrije verkeer in de EU tegen. Een Nederlandse constructeur zal bijvoorbeeld niet een gebouw in Duitsland kunnen ontwerpen zonder kennis te nemen van de Duitse regelgeving. De EU heeft daarom besloten de toets- en berekenwijze in de EU gelijk te trekken. Dit gaat aan de hand van Euronormen. Deze normen bevatten een uniforme toets- en berekenwijze die in de gehele EU van toepassing is. De eisen die gesteld worden, kunnen wel per land verschillen. Deze eisen zijn opgenomen in de Nationale Bijlagen van de Eurocodes.

Voor dit onderzoek zijn de nieuwe Euronormen op het gebied van constructies, de Eurocodes, van belang. De nieuwe Eurocodes, die zijn vastgelegd in EN 1990 t/m EN 1999, omvatten de volgende onderwerpen:

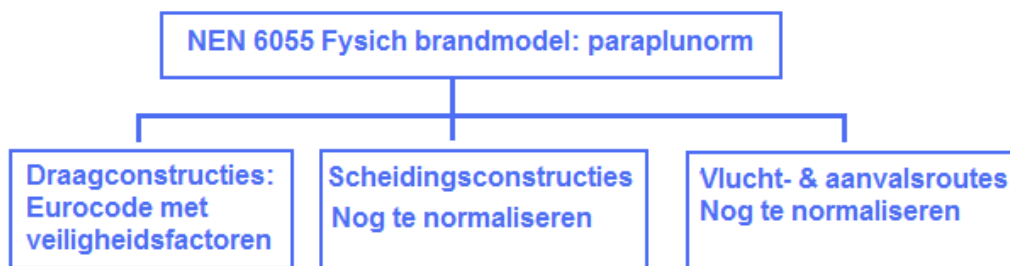
- EN 1990: grondslagen voor het constructief ontwerp;
- EN 1991: (Eurocode 1) belastingen op constructies;
- EN 1992: (Eurocode 2) ontwerp en berekening van betonconstructies;
- EN 1993: (Eurocode 3) ontwerp en berekening van staalconstructies;
- EN 1994: (Eurocode 4) ontwerp en berekening van staalbetonconstructies;
- EN 1995: (Eurocode 5) ontwerp en berekening van houtconstructies;
- EN 1996: (Eurocode 6) ontwerp en berekening van metselwerkconstructies;
- EN 1997: (Eurocode 7) geotechnisch ontwerp en berekening;
- EN 1998: (Eurocode 8) ontwerp en berekening van aardbevingbestendige constructies;
- EN 1999: (Eurocode 9) ontwerp en berekening van aluminiumconstructies.

Met name EN 1991 (Eurocode 1) deel 1-2 is van belang voor dit onderzoek. Dit deel omvat de bepaling van de belasting bij brand op de hoofd draagconstructie.

4.2 Nieuwe benadering

In de huidige regelgeving wordt de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken alleen bepaald aan de hand van de standaard brandkromme. In de nieuwe Eurocodes kan de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken echter op meerdere manieren worden bepaald. Naast de standaard brandkromme kan er bijvoorbeeld ook gebruik worden gemaakt van het fysisch brandmodel⁽⁸⁾. Met dit model wordt aan de hand van de ruimtekaracteristieken en gegevens over het gebruik van de ruimte een natuurlijke brandontwikkeling gesimuleerd. Aan de hand van deze brandontwikkeling wordt de temperatuur in de constructie elementen uitgerekend. Een gedetailleerde uitleg van het fysisch brandmodel is opgenomen in bijlage I.

De berekeningmethodiek van het fysisch brandmodel wordt beschreven in de NEN 6055. De NEN 6055 wordt gebruikt als paraplunorm. Deze norm bevat een standaard rekenwijze waar andere (toekomstige) normen gebruik van maken, zie figuur 4.1. Een van deze normen is de Eurocode 1.



Figuur 4.1

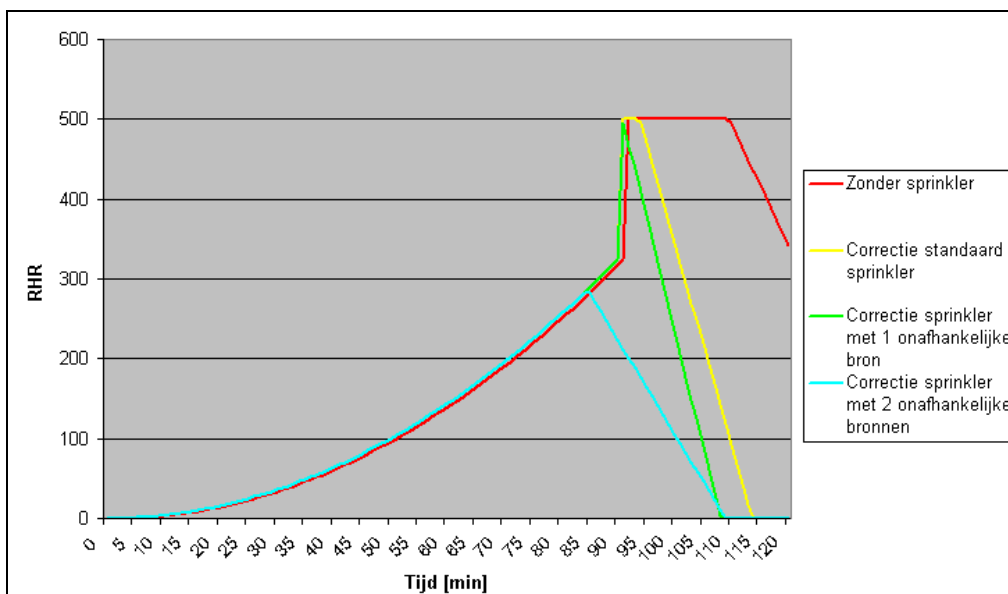
NEN 6055 als paraplunorm voor (toekomstige) normen

Daarnaast is het met de Eurocode mogelijk om de constructie te toetsen aan verschillende brandscenario's⁽⁸⁾. Hiermee wordt ingespeeld op de mogelijkheid om de brandveiligheid op een realistische wijze te benaderen. Zo kan het in bepaalde situaties bijvoorbeeld aannemelijk zijn dat een brand beperkt blijft tot een klein gedeelte van een brandcompartiment of tot een enkele installatie. In deze situaties is het conform de Eurocodes mogelijk om aan een dergelijk scenario te toetsen.

4.3 Correctiefactoren Eurocodes

Met het fysisch brandmodel kan, aan de hand van enkele ruimtekaracteristieken, het natuurlijk brandverloop in de ruimte worden berekend. Ook wordt de invloed van brandveiligheidsinstallaties en het risico op brand in het gebouw meegenomen in het fysisch brandmodel. De invloed van de brandveiligheidsinstallaties en het risico op brand worden berekend aan de hand van correctiefactoren op het brandverloop. Hierbij wordt eerst het natuurlijk brandverloop in de ruimte zonder de invloed van correctiefactoren berekend. Vervolgens wordt aan de hand van de omvang van het compartiment, het risico van brand en het type installatie via Nationale Bijlage E van Eurocode 1 een correctiefactor bepaald. Aan de hand van een script wordt vervolgens een gecorrigeerd brandverloop berekend⁽⁹⁾. Door middel van de correctiefactoren zal een brand - door bijvoorbeeld de toepassing van een sprinklerinstallatie - minder belastend zijn op de constructie dan een brand in een ruimte zonder sprinklerinstallatie. Door deze correctie is er minder brandwerende bekleding van de constructie noodzakelijk. De toepassing van correctiefactoren is gekozen omdat in het fysisch brandmodel op dit moment geen manier is opgenomen om de werkelijke fysische invloed van de brandmeldinstallatie te berekenen. Ondanks dat deze correctiefactor dus niet de werkelijke invloed van bijvoorbeeld een sprinklerinstallatie berekent, kan zo toch worden gerekend met de extra veiligheid die een sprinklerinstallatie zal bieden. In bijlage I is verder ingegaan op de invloed van de correctiefactoren voor brandveiligheidsinstallaties.

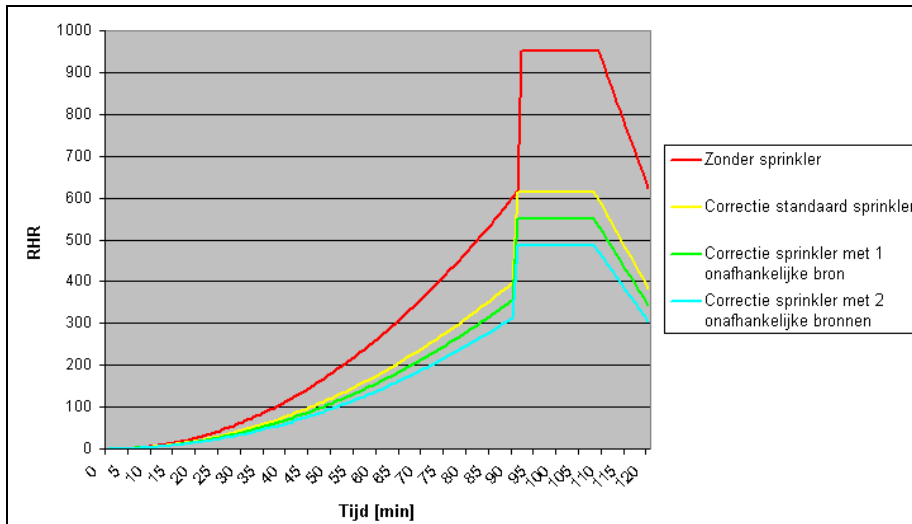
In de Eurocode wordt de correctiefactor toegepast op de vuurlast in de ruimte⁽⁸⁾. Door de vuurlast te corrigeren wordt met name de duur van de brand beïnvloed. Deze invloed is weergegeven in figuur 4.2. De Eurocode gaat er op deze manier vanuit dat in een ruimte met een sprinklerinstallatie of een BMI de brand sneller onder controle en geblust zal zijn. Hierdoor wordt de staalconstructie minder lang belast, wat gunstig kan zijn voor de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken.



Figuur 4.2

Invloed correctiefactor zoals deze in het basisdocument van de Eurocode gehanteerd wordt.

In Nederland wordt deze correctie echter onder invloed van de Nationale Bijlage toegepast op het brandvermogen⁽⁸⁾. Afhankelijk van de invloed van de omvang van het brandcompartiment, het risico van brand en het type brandveiligheidsinstallatie zal de vuurlast worden verhoogd of verlaagd. Ter illustratie is de invloed van een sprinklerinstallatie op het brandvermogen weergegeven in figuur 4.3



Figuur 4.3

Invloed correctiefactor zoals deze in Nederland gehanteerd wordt.

Een nadeel van de correctie op het brandvermogen is, dat het berekende brandvermogen alleen wordt verhoogd of verlaagd. Waardoor de temperatuur van de brand ook wordt verhoogd of verlaagd. Omdat hierbij gebruik wordt gemaakt van het eerder berekende brandverloop zonder de invloed van correctiefactoren zal een brand nog altijd uitbreiden tot een volledig ontwikkelde brand, ook al zullen bepaalde brandveiligheidsinstallaties dit in werkelijkheid voorkomen. Een voorbeeld hiervan is de correctiefactor van een sprinklerinstallatie. In het model wordt de eerder zonder invloed van de sprinklerinstallatie berekende brand gecorrigeerd met een bepaalde waarde, zoals is weergegeven in figuur 4.3. Hierbij wordt alleen het vermogen van de brand verlaagd. De correctiefactor leidt er dus niet toe dat de brand stopt met groeien, terwijl in werkelijkheid de sprinklerinstallatie niet alleen het vermogen beperkt maar ook de branduitbreiding zal stoppen of de brand zal blussen.

Een tweede nadeel van de Nederlandse methode is dat de correctie altijd wordt uitgevoerd op het brandvermogen ongeacht de werking van de brandveiligheidsinstallatie. Waar de correctie op het brandvermogen voor de sprinklerinstallatie nog enigszins logisch is, is een correctie op het brandvermogen niet logisch voor bijvoorbeeld een brandmeldinstallatie. Een brandmeldinstallatie zal de brandweer eerder waarschuwen, waardoor de brandweer sneller ter plekke is om het vuur te bestrijden. Hierdoor zal de brandduur verkort worden. Het vermogen van de brand zal echter pas worden beperkt nadat de brandweer start met het blussen, dat pas na 20 tot 30 minuten gebeurt. In de fase voordat er wordt geblust, zal het brandvermogen even hoog zijn als in een ruimte zonder brandmeldinstallatie. Door de correctiefactor wordt er echter wel gerekend met een lager brandvermogen in deze fase. Het resultaat hiervan is dat, afhankelijk van de kritische staaltemperatuur, sommige delen van de hoofdconstructie niet brandwerend hoeven worden afgewerkt.

4.3.1 Voorbeeld invloed correctiefactoren

Een voorbeeld hiervan doet zich voor in de industriële hal waarvan de constructie is berekend in bijlage II. De hoofddraagconstructie zal bij een realistische ongecorrigeerde brand na ca. 19 minuten bezwijken. Hierdoor zal ook de brandwerende gevel bezwijken waardoor de kans aanwezig is op brandoverslag naar een naastgelegen pand. Bij de toepassing van een brandmeldinstallatie zal het berekende brandvermogen dusdanig beperkt worden dat de kritische staaltemperatuur in de hoofddraagconstructie niet meer wordt bereikt. Hierdoor heeft de constructie, bij de gecorrigeerde brand, voldoende brandwerendheid met betrekking tot bezwijken. Ondanks dat de brandweer eerder gewaarschuwd wordt en dus ook eerder ter plekke zal zijn, is het onwaarschijnlijk dat de brandweer binnen 19 minuten water op het vuur heeft. Tot die tijd zal de brand zich ontwikkelen als berekend in de ongecorrigeerde brand, met als resultaat dat de hoofddraagconstructie - ondanks de aanwezigheid van een brandmeldinstallatie - nog altijd na ca. 19 minuten bezwijkt. In deze situatie bestaat nog altijd de kans op brandoverslag naar een naastgelegen pand. Door het vroegtijdige bezwijken van de constructie zal de brandweer geen inzet kunnen plegen. Dit, terwijl het uitgangspunt van de correctiefactor voor de brandmeldinstallatie juist een snelle inzet van de brandweer is waardoor de constructie kan worden beschermd.

4.3.2 Kritische beschouwing

Voor de invloed van een brandmeldinstallatie op het brandverloop is het dus verkeerd om te rekenen met een correctie op het brandvermogen. Deze correctie is ook van invloed op de brandperiode voor de komst van de brandweer. Voor brandmeldinstallaties zou het beter zijn om te rekenen met een correctie op de vuurlast, mits de brandweer ook werkelijk een inzet kan plegen. Deze correctie resulteert in een korte brandperiode. Dit komt beter overeen met de werkelijkheid aangezien een brandmeldinstallatie zal leiden tot een snellere opkomst van de brandweer waardoor de brand eerder is geblust.

Bij de vergelijking van de correctiefactoren in het basisdocument met de correctiefactoren uit de Nationale Bijlage valt tevens op dat er een verschil aanwezig is tussen het Europese en het Nederlandse veiligheidsniveau. Zo levert een correctiefactor conform de Nationale Bijlage voor een sprinklerinstallatie met twee onafhankelijke bronnen eenzelfde brandvermogen op als een Europese correctie waar zonder sprinklerinstallatie is gerekend (figuur 4.2 en 4.3). Uit de vergelijking kan geconcludeerd worden dat er in Nederland met een zwaardere brand gerekend wordt dan in Europa. Uit de norm en de achtergrondinformatie kan niet worden achterhaald of deze verzwaring opzettelijk is doorgevoerd en wat de achtergrond achter deze verzwaring is.

Geconcludeerd kan worden dat de correctiefactoren op het brandvermogen niet tot een realistische benadering van het effect van de brandveiligheidsinstallaties zullen leiden. Een correctiefactor op de vuurlast, zoals deze in de Euronorm wordt toegepast, is een betere en veiligere benadering. Om volledig realistisch te rekenen, zou de werkelijke invloed van de brandveiligheidsinstallatie en de brandweer in het fysisch brandmodel moeten worden verwerkt. Geadviseerd wordt om bij de toepassing van het fysisch brandmodel kritisch te kijken naar de invloed van de correctiefactor.

4.4 Verschil fysisch brandmodel met standaard brandkromme

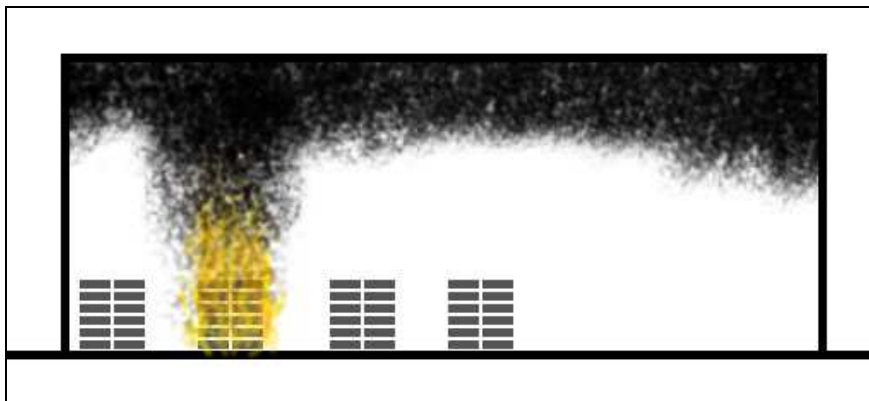
De resultaten met betrekking tot de weerstand tegen bezwijken, die volgen uit het fysisch brandmodel, verschillen erg van de resultaten die volgen uit de standaard brandkromme. Ter vergelijking is de constructie van een voorbeeldproject getoetst aan beide modellen. Het voorbeeldproject betreft een industriële hal van 2.600 m² voor de opslag en bewerking van autobanden. De gehanteerde gegevens en de berekening van de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken zijn opgenomen in bijlage II.

De industriële hal betreft een bestaand gebouw waar een nieuw bedrijf in wordt gevestigd. Dit bedrijf zal gespecialiseerd zijn in de opslag en bewerking van personenautobanden. Het gebouw zal dan ook grotendeels dienen als opslag voor autobanden. De gebouwbeheerder heeft aangegeven dat er maximaal 14.000 banden in het bedrijf aanwezig zullen zijn. Deze banden worden over een oppervlak van 260 m² opgeslagen in stapels met een oppervlak van 9 m² elk. Deze stapels zijn van elkaar gescheiden door open ruimtes, zoals is vereist in de Handreiking Opslag van Autobanden⁽¹⁰⁾.

In twee brandscenario's is de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken die volgt uit het fysisch brandmodel vergeleken met de resultaten uit de standaard brandkromme. Het eerste scenario betreft een lokale brand die beperkt blijft tot een enkele stapel banden. Conform de Handreiking Opslag van Autobanden worden de banden opgeslagen in kleine stapels die van elkaar gescheiden zijn door een open ruimte. Hierdoor is de kans beperkt dat de brand uitgroeit over meerdere stapels. Dit scenario gaat er dan ook vanuit dat de brand niet verder uitgroeit. Het tweede scenario betreft een volledig ontwikkelde brand waarbij alle stapels banden in de hal in brand zullen vliegen. Verondersteld wordt dat in dit scenario de uitgangspunten van de Handleiding Opslag Autobanden er niet in hebben geslaagd de brand beperkt te houden tot een enkele stapel banden.

4.4.1 Scenario 1, lokale brand

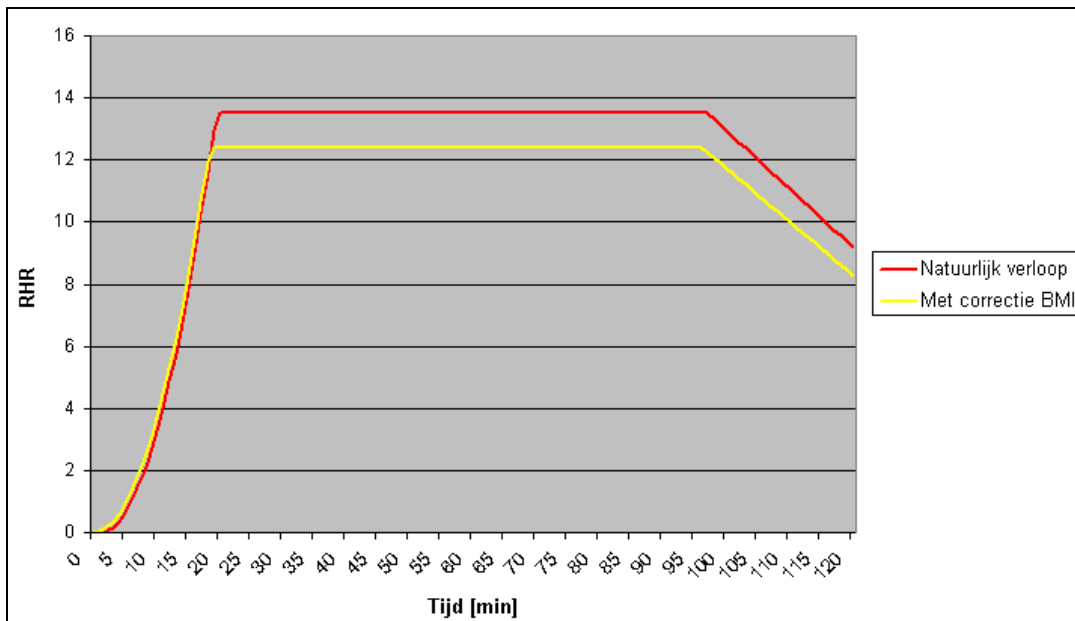
In het eerste scenario is gerekend met een brand die beperkt blijft tot een enkele stapel banden. De ruimte tussen de banden zal in dit scenario voldoende zijn om branduitbreiding naar de naastgelegen stapels te voorkomen. Figuur 4.4 illustreert dit scenario.



Figuur 4.4

Scenario 1, de brand in de ruimte blijft beperkt tot een enkele stapel banden.

In het fysisch brandmodel is gerekend met de toepassing van een brandmeldinstallatie met automatische doormelding naar de brandweer. Hierdoor mag het brandvermogen conform Nationale Bijlage E van Eurocode 1 gecorrigeerd worden met een factor 0,92. Dit heeft tot gevolg dat de temperatuur in de ruimte lager zal zijn dan de temperatuur die in werkelijkheid zal optreden. Dit is berekend in bijlage II. Het effect van de correctiefactor op het brandvermogen is weergegeven in figuur 4.5. Door de toepassing van een brandmeldinstallatie wordt er uitgegaan van een verkorte ontdekkingstijd, waardoor de brandweer sneller ter plaatste zal zijn om het vuur te bestrijden.



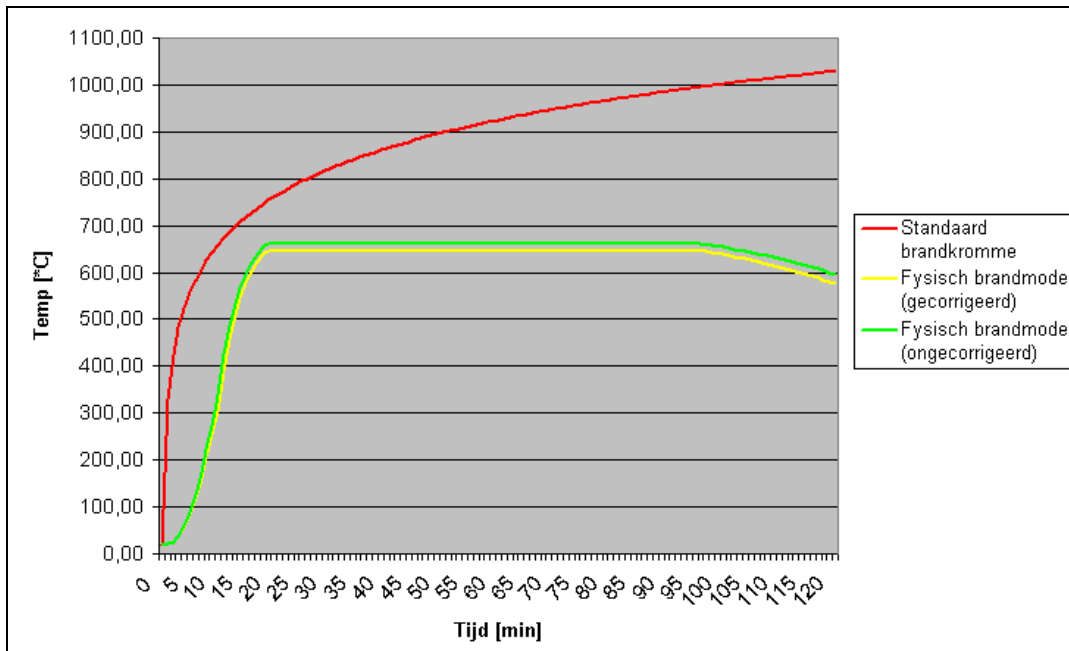
Figuur 4.5

Invloed van correctiefactor op brandvermogen.

Uit berekeningen aan de hand van het fysisch brandmodel volgt dat de constructie alleen wordt belast door een lokale brand. De temperatuur van de rooklaag die bij de brand ontstaat, is in het grootste deel van de ruimte dusdanig laag dat deze geen bedreiging voor de constructie vormt. Berekend is dat de temperatuur van de rooklaag 194°C zal bedragen, terwijl de kritische staaltemperatuur in de meest kritische liggers 657°C bedraagt.

Ter hoogte van de brandhaard is de temperatuur op de constructie echter wel flink hoger. Dit komt doordat hier ook de hitte van de vlammen een rol speelt en niet alleen de temperatuur van de rooklaag. Direct boven de vlammen bedraagt de temperatuur ter hoogte van het plafond 661°C. Dit is hoger dan de kritische staaltemperatuur van 657°C. Berekend is dat de constructie na ca. 19 minuten zal bezwijken. Door de toepassing van de correctiefactoren voor het risico op brand en de BMI mag er gerekend worden met een lager brandvermogen. Dit resulteert in een maximale temperatuur van 646°C. Hoewel het verschil in temperatuur beperkt is, is de invloed op de brandwerendheid van de constructie groot. Doordat de kritische staaltemperatuur door de correctie niet meer wordt bereikt, zal de constructie voldoende brandwerendheid met betrekking tot bezwijken bieden. Zoals beschreven in paragraaf 4.3 leidt dit tot een onrealistische benadering. De hoofdconstructie zal falen voordat de brandweer kan starten met blussen. In dit scenario kan dus beter geïnvesteerd worden in brandwerende bekleding dan in een BMI om het beoogde veiligheidsniveau te behalen.

In figuur 4.6 zijn het temperatuurverloop van het natuurlijke brandverloop en de gecorrigeerde brand vergeleken met de standaard brandkromme. Uit deze grafiek kan geconcludeerd worden dat zowel het natuurlijk brandverloop als de gecorrigeerde brand aanzienlijk lichter zijn dan de standaard brandkromme.



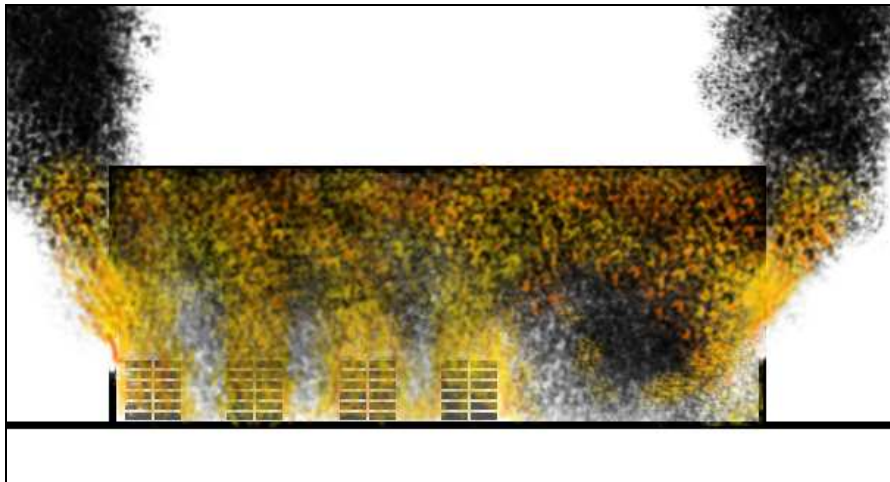
Figuur 4.6

Vergelijking tussen temperatuurverloop standaard brandkromme en natuurlijke brandontwikkeling.

Indien er gerekend zou worden met de standaard brandkromme dan zou de gehele hoofd draagconstructie van de hal brandwerend bekleed moeten worden. Indien er met de Eurocode wordt gerekend en er een BMI wordt toegepast dan kan, zoals berekend in bijlage II, ca. € 24.000,- worden bespaard. De BMI zal echter niet het veiligheidsniveau bieden als beoogd in de Eurocode. De constructie bezwijkt namelijk voordat de brandweer is gearriveerd. In deze situatie is het op het gebied van constructieve veiligheid beter om te investeren in brandwerende bekleding dan in een BMI met automatische doormelding. Berekend is dat, indien er voor brandwerende bekleding wordt gekozen in plaats van een BMI ca. € 23.000,- kan worden bespaard ten opzichte van de huidige methode met de standaard brandkromme. Er hoeft niet geïnvesteerd te worden in een dure BMI met volledige bewaking en automatische doormelding, maar in een goedkopere niet-automatische BMI. Tevens blijft de brandwerende bekleding beperkt tot de spanten boven de bandenopslag.

4.4.2 Scenario 2, compartimentbrand

In het tweede scenario is gerekend met een brand die zich zal ontwikkelen als een compartimentbrand waarbij alle banden in de ruimte in brand zullen staan. In dit scenario zal de ruimte tussen de banden onvoldoende zijn om branduitbreiding naar de naastgelegen stapels te voorkomen. Figuur 4.7 illustreert dit scenario.



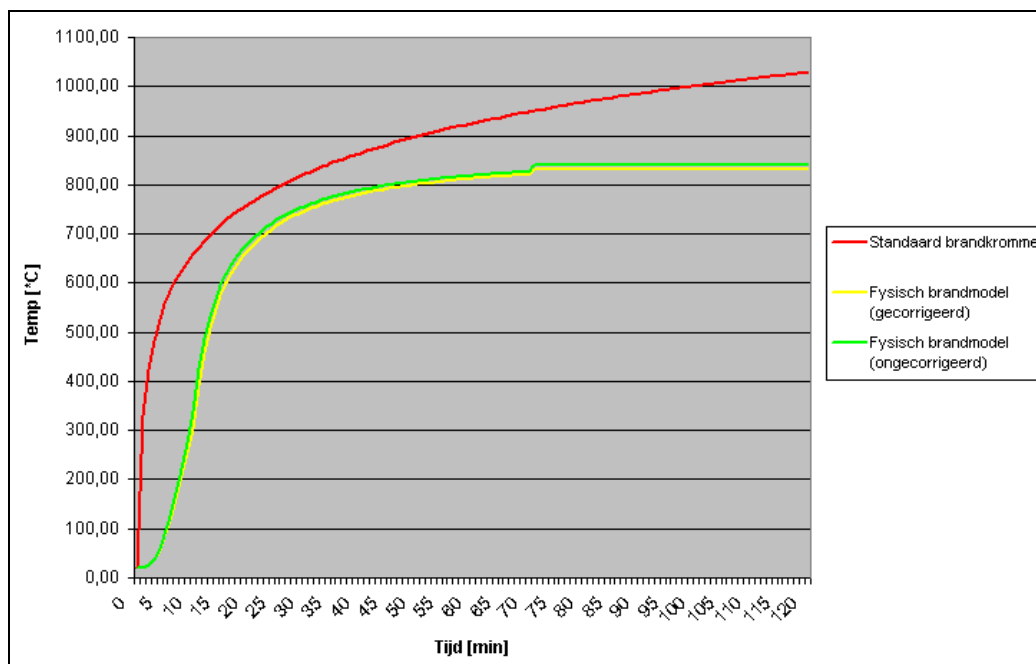
Figuur 4.7

Scenario 2, de brand ontwikkelt zich tot een compartimentbrand.

Ondanks dat er in dit scenario sprake is van een compartimentbrand is er naast het zonemodel ook gerekend met een lokale brand. Bij een berekening met een lokale brand wordt de temperatuur direct boven de vlammen berekend. Het zonemodel gaat daarentegen uit van een gemiddelde temperatuur in de rooklaag. Aangezien het lokaal brandmodel in het eerste stadium van de brand maatgevend is, is deze meegenomen in de berekening.

Doordat de brand in dit scenario groter is dan in het voorgaande scenario, liggen de temperaturen in de ruimte ook hoger. Net als in het voorgaande scenario resulteren de omvang van het brandcompartiment, het risico op brand en de toepassing van een BMI met automatische doormelding in een risicofactor van 0,92. De invloed van deze correctiefactor is weergegeven in figuur 4.8. Tevens is het brandverloop vergeleken met de standaard brandkromme. Geconcludeerd kan worden dat de temperaturen die berekend zijn met het fysisch brandmodel lager zijn dan de temperaturen die volgen uit de standaard brandkromme. Er is dan ook minder brandwerende bekleding noodzakelijk. De berekening hiervan is opgenomen in bijlage II. Ondanks dat de berekende temperatuur in het natuurlijk brandverloop iets hoger ligt dan berekend in het gecorrigeerde brandverloop, doet ook in dit scenario de situatie zich voor dat enkele stalen liggers door de invloed van de correctiefactor voldoende brandwerend zijn terwijl zij in werkelijkheid binnen korte tijd bezwijken.

Net als in het voorgaande scenario is het op het gebied van constructieve veiligheid veiliger te investeren in extra brandwerende bekleding in plaats van de brandmeldinstallatie met automatische doormelding. Doordat er minder brandwerende bekleding noodzakelijk is kan er ca. € 24.000,- worden bespaard.



Figuur 4.8

Vergelijking tussen temperatuurverloop standaard brandkromme en natuurlijke brandontwikkeling.

5 Toepassing fysisch brandmodel voor veilig vluchten

Op het moment van schrijven kan het fysisch brandmodel nog alleen worden toegepast voor het toetsen van de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken van constructies. Toch kan dit model mogelijk ook goed voor andere doelen in de brandveiligheid worden gebruikt. Hierbij kan gedacht worden aan een toetsing of iedereen het gebouw tijdig kan verlaten.

In het Bouwbesluit worden bij calamiteiten eisen gesteld voor loopafstanden, minimale deurbreedtes en de draairichting van deuren in een vluchtroute. De achtergrond van deze eisen is dat een ruimte waarin brand is binnen 1 minuut ontruimd moet zijn. Na deze minuut moeten mensen zich achter een rookscheiding bevinden, zodat zij veilig kunnen vluchten⁽¹⁾.

Hoewel een brand zich snel kan ontwikkelen, zijn er veel situaties denkbaar waarin gedurende een langere tijd kan worden gevlucht. Zo kan worden gedacht aan ruimten met hoge plafonds of een trage brandontwikkeling. Daarnaast kan het voorkomen dat er niet kan worden voldaan aan de prestatie-eisen van het Bouwbesluit. In dit geval zal een gelijkwaardige oplossing moeten worden aangedragen die een zelfde veiligheid biedt als beoogd in het Bouwbesluit.

Deze veiligheid zou kunnen worden aangetoond met behulp van het fysisch brandmodel. Aan de hand van het fysisch brandmodel kan de brandontwikkeling in de ruimte worden berekend en kan worden bepaald hoe lang er maximaal gevlucht kan worden. Aan de hand van gegevens over de doorstroomcapaciteiten van de uitgangen, die aangeven hoeveel mensen per minuut de ruimte kunnen verlaten, kan berekend worden of iedereen tijdig de ruimte heeft kunnen verlaten. Een voorbeeld van een dergelijke berekening is opgenomen in Bijlage IV.

5.1 Maximaal beschikbare vluchttijd

Om te berekenen of iedereen de ruimte tijdig kan verlaten, is het van belang te weten hoe lang men de tijd heeft om te vluchten uit de ruimte. Dit kan worden bepaald door een grenswaarde te stellen aan de condities in de ruimte. Zo kan worden gesteld dat vanaf een bepaalde temperatuur de condities in de ruimte dusdanig zijn verslechterd dat het onwaarschijnlijk is dat iemand zonder hulp van de brandweer uit de ruimte kan vluchten.

Uit berekeningen met het fysisch brandmodel volgt dat gedurende een beperkte tijd na het uitbreken van een brand de condities nog relatief veilig zijn voor het veilig ontluchten van een ruimte. Pas nadat de rooklaag zich verder heeft ontwikkeld en de hitte door de brand toeneemt, wordt de situatie te slecht en nemen de kansen van de aanwezigen snel af. Vanaf een bepaald moment zal de temperatuur of de hoeveelheid rook echter dusdanig zijn toegenomen dat vluchten uit de brandruimte niet meer mogelijk is. De mensen die zich dan nog in de brandruimte bevinden zullen, indien zij niet snel worden gered door de brandweer, sterven.

Aangezien de Eurocode en daarmee ook het fysisch brandmodel op dit moment alleen wordt toegepast voor het toetsen van staalconstructies op de weerstand tegen bezwijken, geeft het fysisch brandmodel geen grenzen voor de maximaal aanvaardbare vluchtcondities in een brandruimte. Het fysisch brandmodel vertoont echter veel overeenkomsten met het vultijdenmodel. Het

vultijdenmodel is een model dat in de huidige regelgeving wordt toegepast om de rookontwikkeling in een brandruimte te berekenen.

In het vultijdenmodel wordt wel aangegeven wat de maximaal aanvaardbare vluchtcondities zijn in een brandruimte⁽¹¹⁾. Omdat de modellen goed met elkaar overeenkomen, kunnen de grenswaarden uit het vultijdenmodel ook worden toegepast in het fysisch brandmodel. Het vultijdenmodel hanteert als grens voor de maximaal aanvaardbare vluchtcondities de volgende condities in de ruimte⁸:

- onderkant rooklaag hoger dan 2,5 meter;
- temperatuur van de rooklaag minder dan 200°C;
- zichtlengte door de rook bij homogene opmenging meer dan 30 meter voor lichtgevende objecten, zoals vluchtrouteaanduiding;
- concentratie toxische gassen aanvaardbaar, aangezien deze gassen zich voornamelijk in de rooklaag bevinden is de concentratie zelden relevant en wordt dan ook niet meegenomen in het model.

Zolang er aan deze condities wordt voldaan, kan er veilig worden gevlucht in de ruimte. Daarnaast stelt het vultijdenmodel dat, zodra een van de condities het veilig vluchten bedreigt er nog gedurende 30 seconden gevlucht kan worden⁽¹¹⁾. Hiermee grijpt het vultijdenmodel in op het uitgangspunt van het Bouwbesluit dat aanwezigen maximaal 30 seconden met ingehouden adem door de rook kunnen vluchten.

Hoewel het Vultijdenmodel een algemeen aanvaard gelijkwaardigheidmodel is, is deze extra 30 seconden naar mijn mening niet correct. Bij een rooklaag met een grote hoeveelheid zwarte rook kan het vluchten ernstig worden belemmerd of zelfs tot stilstand komen als de rooklaag onder ooghoogte daalt. Ondanks dat iemand gedurende 30 seconden zijn adem kan inhouden, zal de rook het oriënteren ernstig belemmeren. Ook zal een situatie waarin mensen pijn ervaren een negatieve invloed hebben op het vluchtgedrag bij brand. Zo raken mensen in paniek en kunnen zij verkeerde beslissingen nemen. Het is dus beter om het moment, waarop de condities in de ruimte dusdanig slecht worden dat er niet meer veilig kan worden gevlucht, als grenswaarde voor de beschikbare vluchttijd te hanteren.

5.2 Berekening benodigde vluchttijd

De benodigde evacuatiетijd is afhankelijk van veel verschillende factoren. Niet alleen spelen de detectietijd en de tijd die nodig is de ruimte te verlaten een belangrijke rol bij de bepaling van de benodigde vluchttijd. Ook de tijd die mensen nodig hebben om te reageren op een brandalarm speelt een belangrijke rol bij brand⁽¹²⁾. De totaal benodigde tijd kan dan ook worden berekend aan de hand van:

$$t_{tot} = t_{det} + t_{res} + t_{vlu}$$

Met hierin:

- t_{tot} = totaal benodigde tijd voor evacuatie brandruimte;
- t_{det} = benodigde tijd voor detectie brand;
- t_{res} = benodigde tijd voordat mensen beginnen met vluchten;
- t_{vlu} = benodigde tijd voor het ontvluchten van brandruimte.

5.2.1 Detectietijd

De detectietijd is de tijd tussen het uitbreken van de brand en het moment waarop de brand ontdekt of gedetecteerd wordt door een rook- of brandmelder. Om een inschatting van de detectietijd te krijgen, zijn diverse vuistregels opgesteld. Zo hanteert het vultijdenmodel de volgende uitgangspunten voor de detectietijd⁽¹¹⁾:

- Bij aanwezigheid van rookmelders wordt een brand binnen 1 minuut door rookmelders gedetecteerd als de rookdichtheid groter is dan $0,05 \text{ m}^{-1}$ in de hete zone.
- Het moment waarop de aanwezigen in de ruimte de brand kunnen zien. Dit is de tijd in seconden, waarop het oppervlak van de brand gelijk is aan $1/\text{m}^2$ per persoon conform de gehanteerde bezettingsgraadklasse. Bij bezettingsgraadklasse B2, met 1 persoon per 2 m^2 , is dit bijvoorbeeld het moment waarop de brand een oppervlak van 2 m^2 bereikt.
- Het moment waarop de aanwezigen in de ruimte de brand kunnen ruiken. Dit is het moment waarop de rookdichtheid op 1,7 meter meer dan $1/15.000 \text{ m}^{-1}$ bedraagt.

5.2.2 Alarmeringstijd

Nadat de brand gedetecteerd is, zal er een brandalarm afgaan. In het Bouwbesluit wordt uitgegaan van een directe vluchtreactie van de aanwezigen op het alarm. In de praktijk is dit zelden het geval. Vaak duurt het enige tijd tot mensen voldoende gealarmeerd zijn dat ze beginnen met het ontvluchten van het gebouw⁽¹²⁾. De tijd tussen de detectie en het moment waarop het vluchten op gang komt wordt dan ook de alarmeringstijd genoemd. De alarmeringstijd is moeilijk te bepalen en sterk afhankelijk van de situatie.

In de huidige regelgeving wordt er van uitgegaan dat mensen in een brandend gebouw direct beginnen te vluchten. Dit is echter vaak niet het geval. Hoe iemand reageert op een brand is sterk afhankelijk van de groep, de activiteit en de persoonlijkheid van iemand. Hoewel veel mensen de betekenis van een brandalarm direct begrijpen zullen zij het gevoel van 'in gevaar zijn' proberen te verdringen⁽¹²⁾. Zo zullen mensen blijven vasthouden aan rolpatronen of reacties binnen de groep afwachten. Zelfs bij het waarnemen van een brand zal een deel van de mensen gewoon doorgaan met de activiteit waarmee ze bezig waren voor de waarneming van de brand. Dit is voornamelijk het geval bij openbare gebouwen waar mensen niet willen overreageren op een vals alarm of een situatie die al onder controle is. Zo zullen mensen in een winkelcentrum gewoon door blijven winkelen, ook al zijn vlammen en rookontwikkeling duidelijk zichtbaar⁽¹²⁾.

In groepen zal men afwachten wat de rest van de groep doet. Veel mensen zijn immers geneigd om andere mensen te volgen in plaats van te leiden⁽¹²⁾. Pas zodra iemand in de groep de leiding neemt en besluit te vluchten, zullen andere mensen ook gaan vluchten. Tot die tijd zullen veel mensen, zolang de situatie niet direct levensbedreigend is, een afwachtede houding aannemen. Deze situatie kan zich enkele minuten tot soms meerdere uren voordoen.

Naast mensen met een afwachtede houding zijn er ook mensen die het vuur willen bestrijden of op onderzoek willen uitgaan. Hoewel een brandalarm wel wordt herkend, is het voor veel mensen niet direct duidelijk welk gedrag van hen verwacht wordt. In tabel 5.1 zijn onderzoeksresultaten weergegeven van G. Wood naar de reacties van mensen bij een vermoeden van brand. Deze resultaten tonen aan dat slechts 9,5% van de aanwezigen direct zal vluchten.

Tabel 5.1

Reacties van mensen op een brand⁽¹²⁾

Actie	Percentage van aanwezigen
Brand bestrijden	12,5
Brandweer waarschuwen	12
Op onderzoek uitgaan	11
Andere waarschuwen	13,5
Gevaar beperken	6
Vluchten	9,5
Andere mensen evacueren	7,5
Afwachten, bezittingen redden, overige reacties	28

Ondanks de duidelijke betekenis van een brandalarm weten mensen dus niet goed welk gedrag van hun wordt verwacht. BHV'ers en ontruimingsinstallaties met gesproken bericht kunnen in dit geval hulp bieden aangezien ze op een directe manier aan mensen duidelijk maken welk gedrag gewenst is. Zo is een slow-whoop signaal met gesproken bericht zes maal effectiever dan een slow-whoop zonder gesproken bericht⁽¹²⁾.

De alarmeringstijd is dus erg afhankelijk van de situatie en zal dan ook per situatie bepaald moeten worden. Voor de bepaling van de alarmeringstijd kan bijvoorbeeld worden gekeken naar de ernst van de brand op het moment van detectie of hoe duidelijk de brand zichtbaar is voor de aanwezigen. Hierbij moet gedacht worden aan duidelijk zichtbare rookontwikkeling of zichtbare vlammen. In situaties waarbij een brand duidelijk zichtbaar is voor alle aanwezigen zullen de aanwezigen de ernst van de situatie snel zullen inzien en beginnen te vluchten. In situaties waarbij de brand niet door iedereen wordt opgemerkt, mag worden verondersteld dat de alarmeringstijd enige minuten kan bedragen.

5.2.3 Ontruimingstijd

Nadat de aanwezigen zijn gealarmeerd, zullen zij beginnen met het ontvluchten van de brandruimte en het gebouw. Tijdens de ontruimingsfase is het van belang dat alle aanwezigen in een brandruimte de ruimte kunnen verlaten voordat de condities dusdanig verslechteren dat vluchten onmogelijk wordt.

De hoeveelheid mensen die een ruimte kan ontvluchten, wordt bepaald aan de hand van de doorstroomcapaciteit van de toegangen van een ruimte. Hiervoor is de breedte van de toegangen van belang. In het Bouwbesluit wordt vaak een doorstroomcapaciteit van 90 personen per minuut per meter vrije doorgang gehanteerd⁽¹⁾. Deze waarde is ook bruikbaar voor de berekening van de ontruimingstijd. Een voorbeeld van de berekening van de ontruimingstijd is in bijlage IV tabel IV.4, Scenario 1 aan de hand van voorbeeldproject uitgewerkt.

5.3 Resultaten berekening

De toepassing van het fysisch brandmodel voor het onderwerp veilig vluchten is onderzocht aan de hand van een voorbeeldproject. Voor dit project is er gerekend met een kleine dancing van 450m². Bij maximale bezetting zullen 563 mensen aanwezig zijn in het gebouw. De tekeningen van dit gebouw zijn opgenomen in bijlage III.

Uit de prestatie-eisen van Bouwbesluit volgt dat de dancing een totale deurbreedte van 6.200 mm (hoofduitgang plus nooduitgangen) dient te beschikken om in geval van brand de ruimte voldoende snel te ontruimen⁽¹⁾. De dancing beschikt daarentegen maar over 4.150 mm aan totale deurbreedte en voldoet daarmee niet aan de prestatie-eisen uit het Bouwbesluit. Onderzocht is of er, om toch aan de functionele eis te voldoen, een beroep kan worden gedaan op gelijkwaardigheid aan de hand van het fysisch brandmodel.

Uit de berekening, die is opgenomen in bijlage IV tabel IV.4, Scenario 1, kan geconcludeerd worden dat bij een totale deurbreedte van 4.150 mm alle aanwezigen veilig kunnen vluchten. Met het fysisch brandmodel is berekend dat pas na 3 minuten de condities dusdanig zijn verslechterd dat veilig vluchten onmogelijk wordt. Waar het Bouwbesluit eist dat binnen één minuut alle aanwezigen zich achter een rookscheiding moeten bevinden (in dit geval uit de dancing moeten zijn gevlucht), is er in werkelijkheid drie minuten de tijd om te vluchten. Uit de berekening van de doorstroomcapaciteit, zoals opgenomen in bijlage IV tabel IV.4, Scenario 1, volgt dat de capaciteit ruim voldoende is om alle aanwezigen binnen drie minuten te kunnen laten vluchten. Hiermee wordt voldaan aan de functionele eis van het Bouwbesluit.

Dit gelijkwaardigheidmodel zou dus goed kunnen worden toegepast in de praktijk. Het model sluit aan bij de uitgangspunten van het vultijdenmodel. Ook komen de uitkomsten van het model overeen met het vultijdenmodel. Zo geeft het Vultijdenmodel, net als het fysisch brandmodel, aan dat de rooklaag na drie minuten onder de 2,5 meter daalt. De vergelijking tussen beide modellen is weergegeven in bijlage V.

Uit gesprekken met de heer J. Mulder de brandweer Utrecht en de heer J. van Sabben van de brandweer Leiden is duidelijk geworden dat het berekenen van de vluchtcapaciteit op deze wijze mogelijk is mits er meer kennis beschikbaar is over de berekeningswijze van het fysisch brandmodel. Volgens de heer J. van Sabben is op dit moment slechts bij een klein aantal korpsen voldoende kennis aanwezig om een gelijkwaardigheid aan de hand van het fysisch brandmodel te kunnen toetsen.

Aangezien een berekening van de ontruimingstijd aan de hand van het vultijdenmodel eenzelfde resultaat oplevert als een berekening met het fysisch brandmodel, wordt door de beperkte hoeveelheid kennis bij de brandweerkorpsen geadviseerd om voorlopig met het vultijdenmodel te vluchttijd te berekenen.

6 Risicobenadering

Aan de hand van het fysisch brandmodel kan worden bepaald wat de risico's zijn bij brand. Een risico wordt gedefinieerd als:

$$\text{Risico} = \text{kans} \times \text{effect van een bepaald scenario}$$

Hierin wordt de kans uitgedrukt in een statistisch getal dat bij een bepaald scenario optreedt. Hierbij kan gedacht worden aan de kans dat bijvoorbeeld brand uitbreekt en een vluchtroute geblokkeerd is. Voor het bepalen van de kans op een bepaald scenario is statistische informatie nodig. In Nederland is er op dit gebied nog erg weinig onderzoek uitgevoerd, waardoor er voor veel kansen aannames moeten worden gedaan.

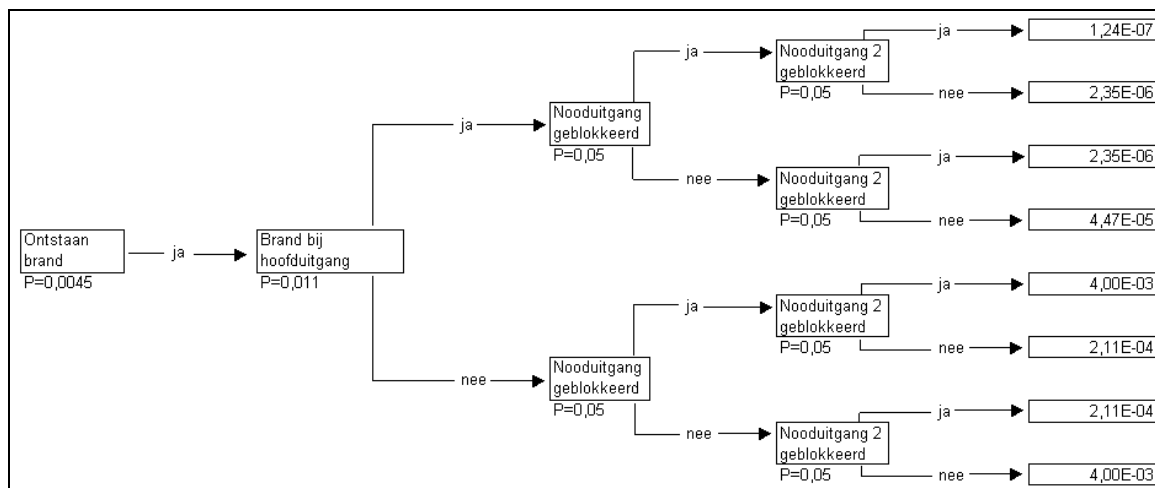
Het effect van de brand kan voor het onderwerp veilig vluchten worden uitgedrukt in het aantal slachtoffers. Het aantal doden of gewonden bij een brand is niet exact uit te rekenen aangezien het aantal doden of gewonden afhankelijk is van veel verschillende factoren. Aan de hand van het fysisch brandmodel kan wel een inschatting worden gemaakt van het aantal doden bij een brand. Aan de hand van de maximaal beschikbare ontruimingstijd en de benodigde ontruimingstijd kan worden ingeschat hoeveel mensen de ruimte niet meer veilig kunnen verlaten⁽¹⁹⁾. Met dit getal kan het effect van de brand op het veilig vluchten worden uitgedrukt.

6.1 Persoonlijk risico

Onder het persoonlijk risico wordt de kans verstaan dat iemand overlijdt ten gevolge van een bepaald scenario. Hierbij is het van belang dat eerst geïnventariseerd wordt welke scenario's van invloed zijn op de brandveiligheid in een ruimte. Een voorbeeld van een dergelijke risico-inventarisatie is opgenomen in bijlage IV.

Het persoonlijk risico wordt bepaald aan de hand van twee kansen⁽¹⁹⁾. Ten eerste is de kans dat een scenario zich voordoet van belang. Hierbij kan gedacht worden aan de kans dat er brand uitbreekt en er een nooduitgang geblokkeerd is. Daarnaast speelt ook de kans dat iemand slachtoffer wordt van dit scenario een belangrijke rol. Ondanks dat een vluchtroute bijvoorbeeld geblokkeerd is, zal toch een groot deel van de mensen in een ruimte kunnen vluchten. Voor deze kans is het dus van belang te bepalen hoe groot de kans is dat iemand niet kan vluchten.

De kans op bedreigende scenario's kan bepaald worden aan de hand van een boomdiagram⁽¹⁹⁾, zoals weergegeven in figuur 6.1. In dit diagram zijn de gebeurtenissen weergegeven die van invloed zijn op het scenario. De combinatie van het wel of niet optreden van verschillende gebeurtenissen leidt tot een bepaald scenario. De kans op een bepaald scenario wordt bepaald door de kans dat een gebeurtenis wel (kans P) of niet plaats vindt (kans 1 – P) te vermenigvuldigen met de kans van het wel of niet optreden van andere gebeurtenissen. Een voorbeeldberekening is opgenomen in bijlage IV.



Figuur 6.1

Boomdiagram voor bepaling van de kans dat een scenario optreedt. Deze kans wordt bepaald door het wel of niet optreden van bepaalde gebeurtenissen.

Naast de kans op een bepaald scenario is ook de kans van overlijden ten gevolge van dit scenario van belang. Deze kans kan bepaald worden aan de hand van de benodigde ontruimingstijd, zoals beschreven in paragraaf 5.3. In een scenario met bijvoorbeeld een geblokkeerde nooduitgang kan de benodigde ontruimingstijd eenvoudig worden berekend door de capaciteit van de betreffende nooduitgang op 0 te stellen. Het resultaat hiervan is dat de benodigde ontruimingstijd zal toenemen. Als de benodigde ontruimingstijd groter is dan de maximaal beschikbare tijd dan mag worden verondersteld dat de dan nog aanwezigen personen in een levensbedreigende situatie terecht zullen komen. Ten behoeve van de berekening wordt dan ook aangenomen dat deze personen zullen overlijden. Aan de hand van een berekening, zoals opgenomen in bijlage IV, kan bepaald worden hoeveel personen overlijden en wat de kans is dat een willekeurig iemand bij deze groep behoort.

6.1.1 Aanvaardbaar persoonlijk risico

In een risicobenadering voor de brandveiligheid wordt het veiligheidsniveau in een ruimte bepaald aan de hand van het risico dat de aanwezigen in de ruimte lopen. Voor deze toetsing moet bepaald worden welk risico aanvaardbaar is en welk risico niet. Het aanvaardbaar risico zal in de praktijk worden bepaald door de toetsende instanties. Hierdoor is het echter wel mogelijk dat iedere toetsende instantie eigen grenswaarden gaat hanteren voor het persoonlijk risico. Aangezien dit niet wenselijk is, is het beter het aanvaardbaar risico vast te stellen in een landelijke norm.

Als grenswaarde voor het aanvaardbaar risico kan gebruik worden gemaakt van het Besluit externe veiligheid. In het Besluit externe veiligheid is onder andere aangegeven wat het maximaal aanvaardbaar risico van overlijden is als gevolg van een ramp. Hierbij kan gedacht worden aan rampen als grote explosies, gaswolken en dergelijke. Als grens voor het aanvaardbaar persoonlijk risico hanteert de externe veiligheid een persoonlijk overlijdensrisico van 10^{-6} voor nieuwbouw en 10^{-5} voor bestaande bouw. Aangezien deze eis voor plaatsgebonden risico's geldt is deze ook voor het persoonlijk risico bij brand toepasbaar. Het risico dat de aanwezigen in een ruimte in geval van brand lopen is namelijk ook een plaatsgebonden risico. In bijlage IV is het persoonlijk risico in een dancing getoetst aan het aanvaardbaar persoonlijk risico conform de uitgangspunten van de externe veiligheid.

6.2 Groepsrisico

Naast het persoonlijk risico hanteert het Besluit externe veiligheid ook eisen voor het groepsrisico. Het groepsrisico legt een relatie tussen de kans op een ramp en het aantal mogelijke slachtoffers. Het risico geeft aan hoe groot de kans is dat bij een ongeval op een risicolocatie 10, 100 of 1000 slachtoffers tegelijk vallen. Dit risico is daardoor een maatstaf voor de verwachte omvang van een ramp.

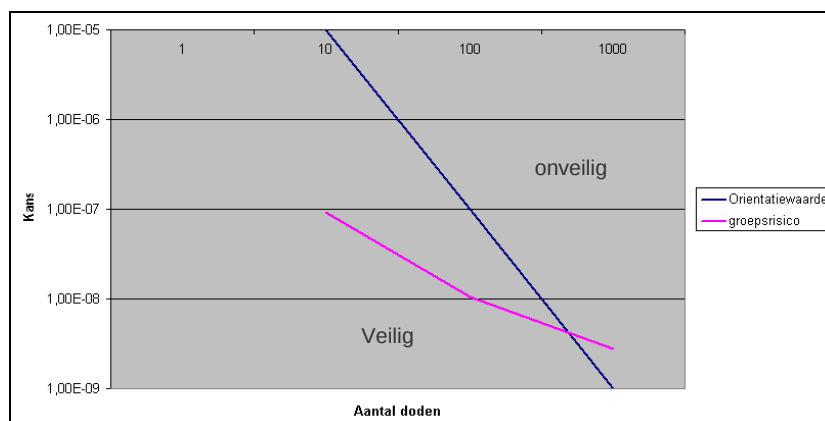
Met een groepsrisicoberekeningen wordt dus berekend hoe groot de maatschappelijke ontwrichting is. Voor het groepsrisico zijn geen harde normen vastgelegd, alleen oriënterende waarden. De oriëntatiewaarden, zoals deze worden toegepast in de Externe Veiligheid, zijn weergegeven in tabel 6.1.

Tabel 6.1

Oriëntatiewaarden Externe Veiligheid

Aantal doden	Oriëntatiewaarde kans van optreden
10	$1 \cdot 10^{-5}$
100	$1 \cdot 10^{-7}$
1.000	$1 \cdot 10^{-9}$

De benadering, zoals deze wordt toegepast in de externe veiligheid, kan ook worden toegepast op de risico's bij brand. Zo kan er berekend worden hoe groot de kans is dat een bepaalde groep overlijdt bij een bepaald scenario. Hiermee kan worden onderzocht hoe groot de maatschappelijke ontwrichting is bij een ramp. De overlijdenskansen kunnen vervolgens per scenario worden vergeleken met de oriëntatiewaarden van de externe veiligheid. Dit kan aan de hand van een FN curve, waarvan een voorbeeld is weergegeven in figuur 7.2. In de FN curve is de kans op een groep doden van een bepaalde grootte uitgezet tegen het aantal doden. Als de kans lager is dan de oriëntatiewaarden dan is het risico aanvaardbaar. Bij een hogere kans zijn extra voorzieningen noodzakelijk om de kans te beperken. Een voorbeeld van een berekening van het groepsrisico bij brand is weergegeven in bijlage IV. Het resultaat van deze berekening is weergegeven in figuur 7.2. Als het groepsrisico lager is dan de oriëntatiewaarde dan is er sprake van een veilige situatie.



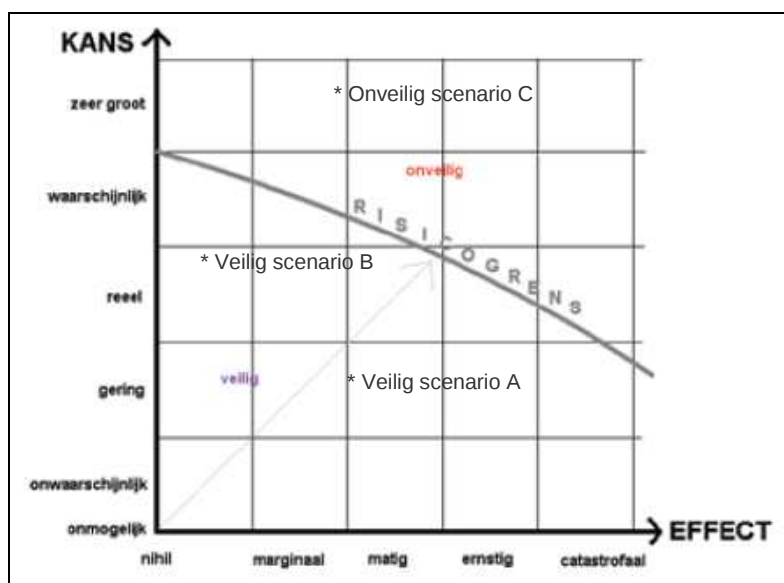
Figuur 6.2

FN curve voor bepaling groepsrisico bij brand.

6.3 Risicoanalyse

Het risico bij brand kan het best per scenario worden bepaald. Voordat een risicoanalyse kan worden opgezet is het dus van belang te inventariseren welke scenario's kunnen optreden en welke scenario's het meest maatgevend zijn voor de risicoanalyse. Er kan hierbij worden gedacht aan scenario's met meer aanwezigen dan wat de bezettingsgraadklasse toelaat of een snellere brandontwikkeling dan verwacht. Ook kunnen scenario's worden berekend waarbij een of meerdere vluchtroutes geblokkeerd zijn door de brand of door technische reden.

De risico's per scenario kunnen vervolgens worden uitgezet in risicodiagrammen. In deze diagrammen, zoals bijvoorbeeld weergegeven in figuur 6.3, worden de kansen dat scenario's optreden tegen de effecten van de scenario's uitgezet. Door een grens te stellen aan welk risico aanvaardbaar is en welk niet kan eenvoudig worden geanalyseerd welke scenario's moeten worden aangepakt.



Figuur 6.3

Risicodiagram waarin het risico van drie voorbeeld scenario's A, B en C is weergegeven.

Een risicovol scenario kan worden aangepakt door de kans of het effect van een risico te reduceren. Bij het reduceren van de kans kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het toepassen van slecht brandbare materialen of brandwerend geïmpregneerde meubels waardoor de kans op brand afneemt. Daarnaast kan er gedacht worden aan het reduceren van het effect van de brand. Zo kunnen er bijvoorbeeld extra vluchtroutes worden toegepast, waardoor er meer mensen de ruimte sneller kunnen verlaten.

7 Toepasbaarheid

Het fysisch brandmodel en de risicobenadering resulteren in een realistischere benadering van de brandveiligheid in een ruimte vergeleken met de huidige benadering. Toch is het belangrijk te weten of deze nieuwe modellen ook praktisch toepasbaar zijn. Dit hoofdstuk zal de toepasbaarheid van beide modellen behandelen.

7.1 Fysisch brandmodel

Het fysisch brandmodel is een goed model om een brand op een gedetailleerde manier te benaderen. Het model heeft dan ook enkele grote voordelen ten opzichte van de huidige benadering met de standaard brandkromme. Toch heeft het model ook enkele nadelen en beperkingen waardoor de toepassing van het model nu niet altijd mogelijk is.

Een belangrijk voordeel van het fysisch brandmodel is dat de brand op een gedetailleerde en realistische wijze wordt benaderd. Doordat het model rekening houdt met de ruimtekarakteristieken, zoals bijvoorbeeld het aantal ramen of de invloed van afkoeling aan de wanden, en de invloed van de brandbaarheid van de inventaris, wordt de brand op een realistische wijze benaderd. Dit in tegenstelling tot de huidige standaard brandkromme, die het brandverloop alleen beschrijft aan de hand van een ruimteonafhankelijke brandkromme. Door de gedetailleerdere en daardoor realistischere berekening kunnen de brandwerende voorzieningen beter worden afgestemd op het verwachte brandscenario. Hierdoor kan, zonder dat het veiligheidsniveau beperkt wordt, worden bespaard op brandwerende voorzieningen. Daarnaast kan het in bepaalde situaties voorkomen dat de brand dusdanig intens is dat het fysisch brandmodel aangeeft dat er juist meer brandwerende voorzieningen benodigd zijn dan aangegeven in het Bouwbesluit. In dit geval leidt de toepassing van het fysisch brandmodel tot meer veiligheid in het gebouw.

De realistischere benadering van het fysisch brandmodel leidt echter ook tot enkele nadelen. Een eerst nadeel is dat meer precisie leidt tot meer onzekerheid. In de preciezere benadering van het fysisch brandmodel zijn meer parameters van invloed dan in het vultijdenmodel en de standaard brandkromme. Dit creëert meer onzekerheid aangezien de kans groter wordt dat een brand zich in de praktijk anders gedraagt dan berekend. Waar in het vultijdenmodel de hoeveelheid gevelopeningen bijvoorbeeld onbelangrijk was, is deze van grote invloed op de berekende brandontwikkeling in het fysisch brandmodel.

Doordat de er meer parameters van invloed zijn op het fysisch brandmodel is de berekening ook complexer. Er is dan ook een hoog kennisniveau bij de adviseurs en de toetsende instantie, zoals de brandweer, benodigd om met het model te kunnen werken. De heer J. Mulder van de brandweer Utrecht en de heer J. van Sabben van de brandweer Leiden gaven aan dat de brandweer momenteel onvoldoende kennis heeft van het fysisch brandmodel om dit model te toetsen. Zo geeft de heer J. van Sabben aan dat er op dit moment maar een aantal korpsen voldoende kennis zullen bezitten over het fysisch brandmodel. Dit zou tot problemen kunnen leiden bij het gebruik van het fysisch brandmodel in een gelijkwaardige oplossing. Als de brandweer onvoldoende kennis heeft om een dergelijk model te beoordelen dan is de kans groot dat zij een gelijkwaardigheid op basis van het fysisch brandmodel niet zullen accepteren.

Toch wordt verwacht dat het fysisch brandmodel in de toekomst bruikbaar zal zijn. Zowel van Sabben en J. Mulder gaven aan dat de brandweer zich in het fysisch brandmodel aan het verdiepen is. Voor de acceptatie van het model is verspreiding van kennis dan ook van groot belang. Hoe sneller de kennis bij de verschillende korpsen beschikbaar is, hoe eerder het fysisch brandmodel kan worden toegepast in de praktijk.

Voor de brandweer zijn vooral de invoergegevens en de gehanteerde uitgangspunten van belang. Volgens Jelle Mulder mag worden aangenomen dat als de invoer van de berekening correct is de berekening zelf ook correct zal zijn, mits hierbij volgens een norm of met een rekenprogramma is gerekend. Van Sabben geeft aan dat een dergelijke norm ook nadelig kan werken aangezien de flexibiliteit van het model wordt beperkt. Hierdoor zou het model in de toekomst minder gemakkelijk voor andere aan brandveiligheid gerelateerde zaken kunnen worden gebruikt. Een andere mogelijkheid is het opstellen van een checklist voor de brandweer, waar staat aangegeven wat de belangrijkste parameters moeten zijn die moeten worden gecontroleerd. Een opzet van een dergelijke checklist is opgenomen in bijlage VI. Aan de hand van een dergelijke checklist kan een toetsende instantie eenvoudig bepalen of het kwaliteitsniveau, en daarmee de juistheid van de berekening, van voldoende niveau is.

Om te waarborgen dat de brand zich ontwikkelt zoals berekend in het model zullen de gehanteerde uitgangspunten, zoals de ruimtekenmerken, moeten worden gehandhaafd. Het plaatsen van een extra raam in een ruimte is dus niet zondermeer toegestaan aangezien dit invloed heeft op de berekende brandontwikkeling. Ook voor de hoeveelheid goederen in bijvoorbeeld een opslaghal gelden beperkingen. Zo mag de vuurlast in een hal niet hoger zijn dan is aangenomen in de berekening. Hoewel dit als een groot nadeel klinkt, zijn gebruiksbeperkingen al gangbaar in de praktijk. Zo resulteert de methode Beheersbaarheid van Brand, die veel wordt toegepast als gelijkwaardigheid, ook tot een gebruiksbeperking van de hoeveelheid materialen in een ruimte. In vergelijking met de bestaande gelijkwaardigheid modellen resulteert het fysisch brandmodel echter wel tot meer gebruiksbeperkingen. Waardoor het ook lastig te handhaven is.

Volgens Jelle Mulder, van de brandweer Utrecht, zouden gebouwbeheerders zelf verantwoordelijk moeten zijn voor de veiligheid in hun gebouw. Een handleiding van hoe het gebouw gebruikt moet worden om de brandveiligheid te waarborgen zou ook een goede mogelijkheid zijn.

Op het moment van schrijven kan het fysisch brandverloop het best met het programma Ozone bepaald worden. Met dit programma kan eenvoudig en snel het brandverloop conform het fysisch brandmodel worden berekend. Het programma bevindt zich echter in een prematuur stadium, waardoor het niet in elk project toepasbaar is. In het huidige programma kunnen alleen ruimtes met een eenvoudige geometrie worden ingevoerd. Zo kan het programma op dit moment alleen ruimtes met vier of minder gevels berekenen. Brandruimten met een complexe geometrie zijn op dit moment dus nog niet te berekenen. Ook zijn er beperkingen aan de invoer van gevel- & dakopeningen. Door deze beperkingen is het model op dit moment dus alleen toepasbaar op eenvoudige ruimten. Verwacht wordt dat het programma in de toekomst zal worden uitgebreid zodat ook complexere projecten kunnen worden berekend.

Geadviseerd wordt om het fysisch brandmodel alleen toe te passen op gebouwen met een eenvoudige geometrie, zoals bijvoorbeeld industriegebouwen. Ook kunnen alleen gebouwen worden berekend waarvan de uitgangspunten voor de branduitbreidingsnelheid, de vuurlast en het brandvermogen zijn opgenomen in het vultijdenmodel of Nationale Bijlage E van Eurocode 1.

7.2 Toepasbaarheid risicobenadering

In tegenstelling tot het fysisch brandmodel is de toepassing van de risicobenadering op dit moment onwaarschijnlijk. Ondanks dat het model enkele grote voordelen heeft ten opzichte van de huidige benadering kleven er ook enkele grote nadelen aan dit model.

De toepassing van een risicobenadering zal leiden tot brandveiligheidsvoorzieningen die zijn afgestemd op het gebruik, de ruimtekarakteristieken, de verwachte brandscenario's en het aanvaard risiconiveau in een gebouw. Hierdoor kan het gebruik van de brandveiligheidsvoorzieningen worden geoptimaliseerd. Dit kan leiden tot kostenbesparingen aangezien er niet geïnvesteerd hoeft te worden in brandveiligheidsinstallaties die onnodig zijn bij de verwachte brandscenario's. Ook is het mogelijk dat de risicobenadering zal leiden tot meer kosten voor de brandveiligheidsinstallaties. Hiermee wordt het veiligheidsniveau in het gebouw echter wel hoger. Daarnaast kunnen de kosten voor het advies hoger zijn dan de huidige advieskosten. Of deze extra kosten opwegen tegen de baten van het fysisch brandmodel zal afhankelijk zijn van de besparing die gerealiseerd kan worden met de probabilistische benadering.

Naast dit voordeel heeft het model ook nadelen. Zo geeft de risicobenadering een bepaalde kans op een aantal doden als resultaat. Deze kans zal moeten worden geaccepteerd door de toetsende instanties. Uit gesprekken met de brandweer is naar voren gekomen dat dit in de praktijk tot problemen zal leiden. Zo stelt de heer J. Mulder van de brandweer Utrecht dat het college van B&W, die uiteindelijk verantwoordelijk is voor het veiligheidsniveau, waarschijnlijk niet verantwoordelijk wil worden gehouden voor doden, ook al is de kans beperkt. Een mogelijkheid zou een landelijke norm kunnen zijn die aangeeft welke kans acceptabel is, zoals bijvoorbeeld in het Besluit externe veiligheid. Hoewel dit wetenschappelijk te verantwoorden is, zal de gemeenschap deze methode waarschijnlijk niet accepteren. Zo zou de kans op een bepaald aantal doden, zoals bijvoorbeeld in het Hemeltje in Volendam, wetenschappelijk geaccepteerd kunnen zijn. Toch zal een dergelijke ramp leiden tot veel maatschappelijke onrust, aangezien veel mensen doden bij brand niet willen accepteren.

De toepasbaarheid van het risicomodel is voor een belangrijk deel afhankelijk van de beschikbaarheid van statistische informatie. Op het moment van schrijven is er maar een beperkte hoeveelheid statistische informatie beschikbaar. Hierdoor is het op dit moment onmogelijk om een goede risicobenadering uit te kunnen voeren. Pas als er meer statistische informatie beschikbaar komt over de faalkansen van installaties, de kans dat vluchtroutes versperd zijn etc. is een risicobenadering theoretisch wel mogelijk.

8 Conclusie en advies

8.1 Algemeen

De huidige brandveiligheidsregelgeving heeft enkele grote beperkingen. Zo wordt er uitgegaan van een effectbenadering en niet gekeken naar het werkelijke risico in een gebouw. Tevens wordt vaak gerekend met de standaard brandkromme die verouderd is en het werkelijk brandverloop niet goed benaderd. Dit, omdat de standaard brandkromme geen rekening houdt met het werkelijke gebruik van de ruimte. Hierdoor zijn de brandveiligheidsvoorzieningen niet goed afgestemd op het werkelijke gebruik van het gebouw, met verschillen in het veiligheidsniveau als gevolg. Een probabilistische benadering leidt daarentegen tot brandveiligheidsvoorzieningen die beter zijn afgestemd op het werkelijke gebruik van een gebouw. Om aan het in de bouwregelgeving beoogde veiligheidsniveau te voldoen, kan er in sommige situaties met deze benadering worden bespaard op de brandveiligheidsvoorzieningen. In andere situaties zal een probabilistische benadering daarentegen leiden tot meer brandveiligheidsvoorzieningen dan vanuit de huidige bouwregelgeving zijn vereist om aan het beoogde veiligheidsniveau te voldoen.

8.2 Toepassing probabilistische benadering op constructieve veiligheid

Voor de berekening van de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken mag vanuit de Eurocodes een probabilistische methode worden toegepast. Deze methode maakt gebruik van het fysisch brandmodel. met dit model kan, met behulp van bouwkundige gegevens en gegevens over het gebruik van een ruimte, het brandverloop in een ruimte gedetailleerder en realistischer berekenen dan de huidige methoden. De invloed van brandveiligheidsvoorzieningen en het risico van brand zijn in het model verwerkt door middel van correctiefactoren. Afhankelijk van de grootte van het risico en het type brandveiligheidsvoorzieningen wordt het brandvermogen en daarmee ook de temperatuur in de ruimte verhoogd of verlaagd.

De toepassing van de correctiefactoren op het brandvermogen leidt tot een onrealistische benadering. De toepassing van een brandmeldinstallatie leidt bijvoorbeeld tot een snellere opkomst van de brandweer, waardoor er met een minder zware brand mag worden gerekend. Hierdoor is soms geen brandwerende bekleding meer noodzakelijk. Echter, doordat er geen bekleding meer noodzakelijk is, kan de constructie bezwijken voordat de brandweer arriveert. Dit, terwijl het uitgangspunt achter de reductie een snelle inzet van de brandweer is waardoor de constructie wordt beschermd tegen bezwijken. Een correctie op de brandduur in plaats van het brandvermogen leidt in dit geval dan ook tot een veiligere en realistischere benadering.

Doordat het fysisch brandmodel gedetailleerder rekent dan de huidige modellen, is er ook meer kennis noodzakelijk. De heer J. Mulder van de brandweer Utrecht en de heer J. van Sabben van de brandweer Leiden gaven aan dat de brandweer op dit moment onvoldoende kennis heeft van het fysisch brandmodel om dit model te toetsen. Ook leidt het fysisch brandmodel tot een gebruiksbeperking voor de gebouwbeheerder.

8.2.1 Advies toepassing probabilistische benadering op constructieve veiligheid

Geadviseerd wordt om het fysisch brandmodel alleen voor de toetsing van hoofddraagconstructies toe te passen als het project aan de volgende criteria voldoet:

- Het gebouw heeft een eenvoudige geometrie met maximaal vier gevelvlakken.
- Gegevens over de vuurlast, het brandvermogen en de branduitbreidingssnelheid van de inventaris zijn bekend.
- Projectontwikkelaar is akkoord met eventuele gebruiksbeperkingen die kunnen volgen uit de berekening.
- De brandweer van de gemeente waarin het project is geprojecteerd geeft aan voldoende kennis van het fysisch brandmodel te hebben om de berekening te beoordelen.

In de berekening met het fysisch brandmodel conform de Eurocodes is het van belang dat de invloed van de correctiefactoren kritisch wordt bekeken. Zo mag de toepassing van een correctiefactor niet leiden tot een constructie-element dat niet meer brandwerend bekleed hoeft te worden, terwijl een constructie-element zonder brandwerende bekleding binnen korte tijd bezwijkt. Daarnaast moet de constructie, ook al is dit niet aangegeven in de Eurocode, worden getoetst aan zowel een lokale brand als het zonemodel. Dit aangezien het lokaal brandmodel in het beginstadium van de brand vaak maatgevend is.

8.3 Toepassing probabilistische benadering op vluchtveiligheid

Het fysisch brandmodel kan theoretisch worden toegepast voor een risicobenadering of alle aanwezigen veilig kunnen vluchten. De risicobenadering wordt opgezet aan de hand van scenario's. Per scenario wordt bepaald wat de kans van optreden is en wat het effect is van het scenario. Het effect wordt uitgedrukt in het aantal mensen dat niet op tijd kan vluchten. Dit wordt bepaald door met het fysisch brandmodel te berekenen hoelang er veilig gevlucht kan worden en hoeveel tijd er daadwerkelijk benodigd is om de ruimte te ontruimen. Het risico dat de aanwezigen lopen wordt vervolgens vergeleken met de richtwaarden voor het persoonlijk- en groepsrisico uit het Besluit externe veiligheid.

Met deze benadering kunnen de brandveiligheidsvoorzieningen efficiënt worden ontworpen. Deze methode is op dit moment nog niet mogelijk. Zo mist er nog veel statistische informatie, waardoor een risicobenadering nog niet uitvoerbaar is. Tevens zullen toetsende instanties akkoord moeten gaan met een bepaald overlijdensrisico. Verwacht wordt dat niemand hiervoor verantwoordelijk wil zijn.

8.3.1 Advies toepassing probabilistische benadering op vluchtveiligheid

Een risicobenadering is op dit moment nog niet mogelijk. Geadviseerd wordt te wachten met de toepassing hiervan tot er meer draagvlak is voor het fysisch brandmodel en er meer statistische informatie beschikbaar is.

9 Literatuuropgave

Literatuur

- 1) Bouwbesluit Online. *Bouwbesluit 2003*. Geraadpleegd van januari tot mei 2010 via:
<http://www.bouwbesluitonline.nl>
- 2) Ministerie van BZK. *Methode Beheersbaarheid van Brand 2007*. Den Haag
- 3) Ministerie van VROM. *Gebruiksbesluit, staatsblad 327 van 2008*. Den Haag
- 4) Overheid.nl. *Wet Milieubeheer*. Geraadpleegd van januari tot mei 2010 via:
http://wetten.overheid.nl/BWBR0003245/geldigheidsdatum_30-05-2010
- 5) Ir. E.W. Janse. *SBR Presentatie Fire Safety Engineering Achtergronden*. Bijgewoond op 22 April 2010. Hand-out beschikbaar via:
http://www.sbr.nl/uploads/projecten/F1_Erik_Janse_FSE_achtergronden.pdf
- 6) Ministerie van BZK. *Brandbeveiligingsconcept Industriegebouwen*. Den Haag 1995
- 7) Eurocodes.nl. *Intrekken TGB-normen op 31 maart 2010*. geraadpleegd op 30 mei 2010 via: <http://www.eurocodes.nl/publicaties/4293&details=true>
- 8) NEN-EN 1991-1-2:2002+NB:2007 nl
- 9) Brand Informatie Systeem, *Stappenplan voor FSE volgens de Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-2*.
Geraadpleegd op 15 januari 2010 via: <http://www.brandveiligmetstaal.nl/pag/316/fse-stappenplan.html>
- 10) NIBRA, Handreiking Opslag van Autobanden. Beschikbaar via:
www.pmccoevorden.nl/nl/download/27
- 11) Centrum voor brandveiligheid. *Richtlijn Vultijdenmodel Grote Brandcompartiment*. Den Haag 1996
- 12) Gerda Klunder, *Menselijk gedrag bij vluchten uit gebouwen*, SBR Amsterdam/Rotterdam, 2007
- 13) Dougal Drydale, *An Introduction to Fire Dynamics*, Second edition, University of Edinburgh, UK 2002
- 14) Wikipedia. Combustion. Geraadpleegd op 7 mei 2010 via:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>
- 15) Philip J. DiNenno, *SPFE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd edition, NFPA 1995
- 16) Van Herpen, R.A.P. en Voogd, N., "*Fysisch brandmodel – Achtergronden: Normalisatie fysisch brandmodel - Submodellen*", Adviesbureau Nieman rapport Wu040430aaA2.rhe, (NEN-document 3510070004/2007/62).
- 17) NIBRA, *brandverloop*, Nederlands Instituut Fysieke Veiligheid NIBRA 2005
- 18) J.B. Schleich, *Valorisatie Project: natuurlijk Brandconcept*, 2001
- 19) Johan Lundin, *Safety in Case of Fire, the effect of changing regulations*, Department of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Sweden 2005
- 20) Van Herpen, R.A.P. en Voogd, N., "*Fysisch brandmodel – Achtergronden: Normalisatie fysisch brandmodel - Submodellen*", Adviesbureau Nieman rapport Wu040430aaA2.rhe, (NEN-document 3510070004/2007/62).
- 21) Van Herpen, R.A.P. en Voogd, N., "*Fysisch brandmodel – Achtergronden: Normalisatie fysisch brandmodel – Statistische en probabilistische aspecten*", Adviesbureau Nieman rapport Wu040430aaA3.rhe, (NEN-document 3510070004/2007/63).

Contactpersonen

- Dhr. J.M. van Sabben (brandweer Leiden)
- Dhr. J.W. Mulder (brandweer utrecht)

Kostengegevens brandmeldinstallatie

FireX B.V.
Kerkenbos 10-135
6546 BJ NIJMEGEN
Tel 024-360 71 71
Fax 024-360 75 62

Rekenprogramma's

Ozone v2.2.6.

Afbeeldingen

- Afb. 1: Natuurwetenschappen. Afbeelding gekopieerd op 22 mei 2010 via:
http://natuurwetenschap.web-log.nl/natuurwetenschap/2005/02/flashover_en_ba.html
- Afb. 2: Golden Valley Public Safety. Afbeelding gekopieerd op 22 mei 2010 via:
2010<http://www.ci.golden-valley.mn.us/publicsafety/firetimelapse.htm>

10 Symbolenlijst

Θ	=	temperatuur in $^{\circ}\text{C}$
q_d	=	ontwerplijnbelasting in kN/m^{-1}
q_p	=	permanente lijnbelasting
q_v	=	permanente veranderlijke belasting
t	=	tijd in minuten
t_{tot}	=	totaal benodigde tijd voor evacuatie brandruimte;
t_{det}	=	benodigde tijd voor detectie brand;
t_{res}	=	benodigde tijd voordat mensen beginnen met vluchten;
t_{vlu}	=	benodigde tijd voor het ontluchten van brandruimte.
P_{tot}	=	vermenigvuldigingsfactor voor referentiekans;
P_1	=	vermenigvuldigingsfactor voor activeringskans;
P_2	=	vermenigvuldigingsfactor voor risicoklasse;
P_{ni}	=	vermenigvuldigingsfactor voor brandveiligheidsinstallaties.

Bijlage I

Fysisch Brandmodel

I.1 Fysisch brandmodel

Het fysisch brandmodel gaat uit van een natuurlijke brandontwikkeling. Het natuurlijk brandverloop beschrijft aan de hand van de karakteristieken van de ruimte de ontwikkeling van een brand. Hiervoor is het van belang te weten wat brand is en wat de fysica achter een brand is.

I.1.1 Natuurlijke brandontwikkeling

I.1.1.1 Verbranding

Brand is een ongewenste verbrandingsgebeurtenis. Bij verbranding treedt er een chemische reactie op tussen een materiaal en zuurstof⁽¹³⁾. Bij deze reactie komt energie vrij in de vorm van warmte en licht. Een verbrandingsreactie treedt alleen op bij voldoende hoge temperaturen. Onder kamertemperatuur zijn de meeste stoffen te stabiel om te reageren met zuurstof. Bij veel producten kan er pas een verbrandingsreactie optreden als de temperatuur van de stof boven de 600°C komt. Voor de verbranding zijn dus brandstof, zuurstof en warmte van belang. Deze drie factoren zijn van essentieel belang worden vaak weergegeven in een branddriehoek, zie figuur I.1. Bij het ontbreken van een van de factoren is de driehoek niet compleet en zal de brand snel uitdoven.



Figuur I.1

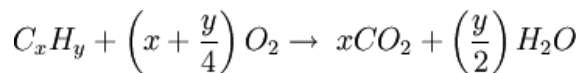
Branddriehoek met de drie essentiële factoren voor een brand

In veel gebouwen kan een verbrandingsreactie gemakkelijk plaatsvinden. Zuurstof is vooral in het begin van de brand ruim voldoende aanwezig om de brand te laten groeien. Als de brand verder ontwikkeld is, is de aanwezigheid van zuurstof niet meer vanzelfsprekend. Hier wordt verderop in deze paragraaf dieper op ingegaan.

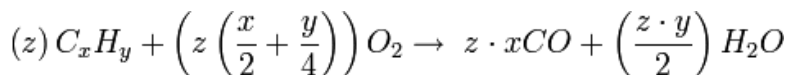
Voor het ontstaan van een verbrandingsreactie is ook voldoende warmte noodzakelijk. Deze warmte komt vaak van een externe bron. Hierbij kan gedacht worden aan kortsluiting of het verkeerd gebruiken van apparaten, maar ook aan brandstichting of blikseminslag.

Daarnaast is voldoende brandstof van belang. In veel gebouwen is ruim voldoende brandstof aanwezig voor de brand. Dit komt omdat de meeste materialen in onze omgeving zijn opgebouwd uit koolwaterstoffen (C_xH_y).

Koolwaterstoffen vormen de bouwsteen van het leven op aarde en komen dan ook zeer veel voor. Zo zijn er natuurlijke producten als hout en papier, maar ook uit aardolie vervaardigde producten, zoals kunststoffen, opgebouwd uit koolwaterstoffen. Koolwaterstoffen zijn ketens van één tot zestig koolstofatomen die aan elkaar en aan met name waterstofatomen zijn gebonden. Tot een bepaalde temperatuur zijn de waterstofatomen stevig verbonden met de koolstofatomen. Bij een temperatuur van ongeveer 600°C worden de bindingen tussen kool- en de waterstofatomen echter dusdanig zwak dat ze in de aanwezigheid van zuurstof zullen breken en een nieuwe binding met de zuurstof zullen aangaan⁽¹⁴⁾. De losse koolstofatomen reageren met zuurstof tot koolstofdioxide (CO₂). Ook de waterstofatomen reageren met zuurstof. Deze reactie vormt water (H₂O). De verbrandingsreactie verloopt volgens de volgende formule:



Als er onvoldoende zuurstof aanwezig is, wat vaak het geval is bij brand, dan treedt er onvolledige verbranding op. Een deel van de brandstof zal dan niet verbranden. De onverbrande roetdeeltjes en gassen stijgen in dit geval op naar de rooklaag. Tevens kan er ook het giftige en bij hoge temperaturen explosieve koolmonoxide worden gevormd in plaats van koolstofdioxide. Deze reactie treedt op als er onvoldoende zuurstof aanwezig is voor de vorming van koolstofdioxide. De reactie verloopt volgens de volgende formule:



Onvolledige verbranding creëert grote risico's bij brand. De temperatuur van de gassen bevindt zich vaak ver boven de verbrandingstemperatuur. Toch kunnen de gassen en roetdeeltjes niet verbranden door de afwezigheid van zuurstof. Zodra de hete gassen door een geopende deur of een gebroken raam stromen, komen zij in aanraking met zuurstofrijke lucht en zullen zij alsnog verbranden⁽¹⁵⁾. Dit proces is bij brand vooral zichtbaar als uitslaande vlammen.



Figuur 1.2

Door onvolledige verbranding ontbranden onverbrande gassen alsnog bij het in aanraking komen met zuurstofrijke buitenlucht.

1.1.1.2 Pyrolyse

In tegenstelling tot de bindingen tussen de kool- en de waterstofatomen zijn de bindingen tussen de koolstofatomen onderling minder sterk. Vanaf 400°C worden deze bindingen zo slap dat de koolwaterstofketens beginnen te ontbinden in meerdere kleinere koolwaterstofketens. Bij deze reactie is er alleen sprake van het uiteenvallen van de koolwaterstofketens; er treedt dus geen verbrandingsreactie op. Dit proces wordt pyrolyse genoemd⁽¹³⁾.

Pyrolyse speelt een belangrijke rol bij het verbrandingsproces. Lange koolwaterstofketens kunnen namelijk moeilijker met zuurstof reageren dan korte koolwaterstoffen. Dit komt omdat de verbrandingsreactie in één keer moet plaatsvinden. Bij de verbranding van de stof hexeen (C_6H_{12}) zijn bijvoorbeeld negen zuurstofmoleculen benodigd, die zich ook nog eens op de juiste plek langs de koolstofketen moeten bevinden. Bij methaan (CH_4) zijn er daarentegen maar twee zuurstofmoleculen benodigd voor de verbranding. De verbranding van methaan zal dan ook veel gemakkelijker en sneller verlopen dan de verbranding van hexeen. Dit is vooral in een later stadium van de brand van belang als de straling van de vlammen veel materialen sterk verwarmen. Door de hoge temperatuur zal er veel pyrolyse plaatsvinden in de materialen in de ruimte. Deze pyrolysegassen komen vervolgens vrij uit de materialen en verzamelen zich in de rooklaag. Zodra de temperatuur in de rooklaag hoog genoeg wordt zullen deze pyrolysegassen op explosieve wijze ontbranden⁽¹³⁾.

1.1.1.3 Brandontwikkeling

De ontwikkeling van een brand is onderverdeeld in verschillende fasen met elk eigen kenmerken. Een brand ontstaat altijd door de toevoeging van warmte uit een externe bron of door een chemisch proces. Zo kan een brand bijvoorbeeld ontstaan door kortsluiting, broei, brandstichting of een nog smeulende sigaret op een bank of in een prullenbak. Zodra deze warmtebron in aanraking komt met een brandbaar materiaal en er voldoende zuurstof aanwezig is, zal de verbrandingsreactie starten. Vaak is de beginnende brand nog dusdanig klein, dat er geen sprake is van vlammen. De brand smeult dan voornamelijk. Hierbij wordt de brandstof langzaam verder opgewarmd en worden veel pyrolysegassen geproduceerd. Afhankelijk van de brandstof en hoeveelheid toegevoegde warmte ontstaan al vrij snel vlammen. Dit gebeurt als de temperatuur van de vrijgekomen pyrolysegassen boven de verbrandingstemperatuur stijgt. De vrijgekomen warmte van de verbranding zal de brandstof verder opwarmen waardoor in een toenemend gebied pyrolyse en verbranding zal plaatsvinden. Dit proces gaat in het begin erg langzaam. Naar mate de brand zich verder ontwikkelt, komt er meer warmte vrij waardoor de brand zich steeds sneller gaat ontwikkelen.

Bij de verbranding van de brandstof komen verbrandingsgassen vrij. Deze gassen zullen, omdat ze warmer zijn dan de omgeving, opstijgen in de ruimte. Deze opstijgende stroming wordt de pluim genoemd⁽¹³⁾. In paragraaf 1.1.2.5 wordt verder ingegaan op de fysica achter de rookpluim. Bij een volledige verbranding zal de pluim voornamelijk onzichtbare verbrandingsgassen zoals CO_2 en waterdamp bevatten. Zodra er onvoldoende zuurstof aanwezig is of er onvoldoende zuurstof bij de brand kan komen zal de verbranding onvolledig worden. Naast verbrandingsgassen en warmte bevat de pluim dan ook onverbrande pyrolysegassen en roetdeeltjes. De pluim manifesteert zich dan als een duidelijk zichtbare rookpluim.

Zodra de pluim het plafond van de ruimte bereikt, zal deze zich radiaal uitspreiden. Omdat de lucht in de pluim warmer is dan de overige lucht in de ruimte, zal deze op de koele omgevingslucht gaan drijven. Hierdoor ontstaat een situatie met twee zones; een koele zone met daarin voornamelijk zuurstofrijke lucht en een hete zone met daarin hete verbrandingsgassen, brandbare gassen en rook⁽¹⁶⁾⁽²⁰⁾.

Naarmate de brand zich verder ontwikkelt, zal de hete rooklaag geleidelijk steeds dikker en heter worden. Ook zal de warmtestraling van de brand en de rooklaag toenemen. Hierdoor neemt ook de pyrolyse in de ruimte toe. Bij een voldoende hoge temperatuur zullen alle materialen in de ruimte beginnen uit te gassen. Hierdoor neemt de concentratie pyrolysegassen in de rooklaag sterk toe. Zodra de hete laag een temperatuur van 500-600°C bereikt, bestaat de kans op een flashover⁽¹³⁾⁽²⁰⁾. De brand gaat dan een nieuwe fase in.

1.1.1.4 Flashover

De tweede fase van een brand is de flashover. De flashover in de ruimte start vaak met de ontbranding van de rooklaag. De temperatuur van de rooklaag is dan tot een dusdanig hoge temperatuur gestegen dat de verbrandingstemperatuur van de onverbrande pyrolysegassen en roetdeeltjes wordt bereikt. De hete pyrolysegassen ter hoogte van de interface (de scheiding tussen de hete en de koude laag) zullen vervolgens reageren met de zuurstofrijke lucht van de koude zone. In figuur 1.3 is dit weergegeven.

Bij de ontbranding van de rooklaag komt dusdanig veel warmte vrij dat alle brandbare materialen in de ruimte die nog niet branden spontaan zullen ontbranden. De temperatuur in de ruimte zal hierdoor in een relatief korte tijd stijgen tot ruim 1.000°C. Na de flashover is er dan ook vaak geen sprake meer van een hete en een koude zone. De ruimte gedraagt zich als een brandende ruimte. Ook daalt het zuurstofniveau in de ruimte dusdanig dat hoeveelheid binnenstromende zuurstof de intensiteit van de brand gaat bepalen⁽¹³⁾.



Figuur 1.3

Flashover. De temperatuur in de rooklaag wordt dusdanig hoog dat onverbrande gassen alsnog ontbranden^(afb. 1).

1.1.1.5 Brandfase

Na de flashover komt de brand in de brandfase. Tijdens deze fase zullen alle materialen, zoals in figuur 1.4 is weergegeven, in brand staan en geleidelijk verbranden. De mate van verbranding wordt in deze fase voornamelijk bepaald door de hoeveelheid zuurstof in de ruimte⁽¹⁶⁾. Bij de ontwikkeling van de brand was de brand voornamelijk brandstof beheerst. De hoeveelheid en aard van de brandstof bepaalden hoe snel de brand zich ontwikkelde. In de brandfase is de hoeveelheid zuurstof een beperkende factor. Vaak is de hoeveelheid zuurstof beperkt, waardoor de brand niet op vol vermogen verbrandt. Dit leidt tot onvolledige verbranding⁽¹⁶⁾.

Onvolledige verbranding kan leiden tot uitslaande vlammen of een pulserende brand. Uitslaande vlammen treden op als er nog voldoende openingen in de omhulling van de brand aanwezig zijn. Als er geen openingen in deze omhulling aanwezig zijn, kan zuurstof alleen via kieren en naden de brandruimte instromen. Door de hoge temperaturen die bij de brand ontstaan, zal de luchtdruk in de ruimte hoger zijn dan in de buitenlucht. Hierdoor zullen alleen hete verbrandingsgassen door de kieren en naden stromen. Doordat er geen zuurstof de ruimte instroomt zal de brand uitdoven. Hierdoor daalt de temperatuur en de luchtdruk in de brandruimte. Toch blijft er veel pyrolyse plaatsvinden. Door de dalende luchtdruk wordt verse zuurstofrijke lucht aangezogen door de kieren en naden. Hierdoor zal het vuur na enige tijd weer opvlammen en de pyrolysegassen doen ontbranden, met een stijgende temperatuur en luchtdruk tot gevolg. In dit geval is er sprake van een pulserende brand⁽¹⁷⁾.



Figuur 1.4

Volledig ontwikkelde brand ^(afb. 2).

1.1.1.6 Dooffase

Naarmate de hoeveelheid brandbaar materiaal in de ruimte minder wordt, zal de intensiteit van de brand afnemen. Als ongeveer 70% van alle brandbare materialen in de ruimte is opgebrand begint de dooffase. De temperatuur zal in deze ruimte gestaag dalen en uiteindelijk zal de brand doven⁽¹⁶⁾.

I.1.2 Fysisch brandmodel

Het fysisch brandmodel benadert de natuurlijke brandontwikkeling aan de hand van een zone-model. Zoals in de voorgaande paragraaf is vermeld, ontstaat er bij brand een hete en koude zone. Het zonemodel berekent aan de hand van deze zones, en de veranderingen in deze zones, de condities in de brandruimte. Voor deze berekening maakt het zonemodel gebruik van een model voor brandontwikkeling en de (rook)pluim⁽¹⁶⁾⁽²⁰⁾.

Bij het modelleren van een brand is ook de modellering van de brandontwikkeling van belang. Een aantal factoren hebben een grote invloed op de ontwikkeling van een brand, te weten:

- de verbranding van de brandstof;
- de groei van de brand;
- het vermogen van de brand;
- de hoeveelheid brandstof;
- de hoeveelheid zuurstof.

Deze paragraaf zal globaal de rekenwijze van het fysisch brandmodel uitleggen. Voor een gedetailleerde beschrijving en de formules achter het fysisch brandmodel wordt verwezen naar het rapport van Van Herpen, R.A.P. en Voogd, N., "*Fysisch brandmodel – Achtergronden: Normalisatie fysisch brandmodel - Submodellen*", Adviesbureau Nieman rapport Wu040430aaA2.rhe, (NEN-document 3510070004/2007/62)

I.1.2.1 Verbrandingsreactie

De materialen die in ruimtes worden toegepast, zijn opgebouwd uit vele verschillende moleculen. Aangezien elke stof andere verbrandingseigenschappen heeft, kan een berekening erg groot worden als er met elk stof in een product rekening gehouden wordt. Zo moeten de verbrandingsreacties, de verbrandingsenergieën, de benodigde hoeveelheid zuurstof voor de brand, en de hoeveelheid gegenereerde verbrandings- en pyrolysegassen worden berekend per stof.

Aangezien veel materialen uit cellulose zijn opgebouwd, is er in het fysisch brandmodel gerekend met een pure cellulosebrand⁽¹⁶⁾. Er wordt aangenomen dat alle materialen volledig bestaan uit cellulose. De invloed van andere stoffen wordt niet meegerekend in het model. Door het rekenen met een enkele stof, kan de berekening efficiënt worden uitgevoerd.

De stof cellulose is net als veel andere natuurlijke producten een koolwaterstof. In tegenstelling tot veel uit aardolie afkomstige koolwaterstoffen bevinden zich ook gebonden zuurstof atomen in het molecuul. De stof cellulose heeft de volgende structuur: $C_4H_6O_3$. De verbranding van deze stof levert 17,5 MJ/kg aan energie op. Voor deze verbranding is 4,18 m³ lucht nodig. Bij de verbranding ontstaat vervolgens 4,84 m³ aan verbrandingsgassen.

1.1.2.2 Branduitbreidingssnelheid

De branduitbreidingssnelheid geeft in seconde aan hoe snel de brand zich ontwikkelt tot een brand van 1 MW. De groei van een brand is sterk afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de brandende stof. De volgende materiaaleigenschappen zijn van invloed:

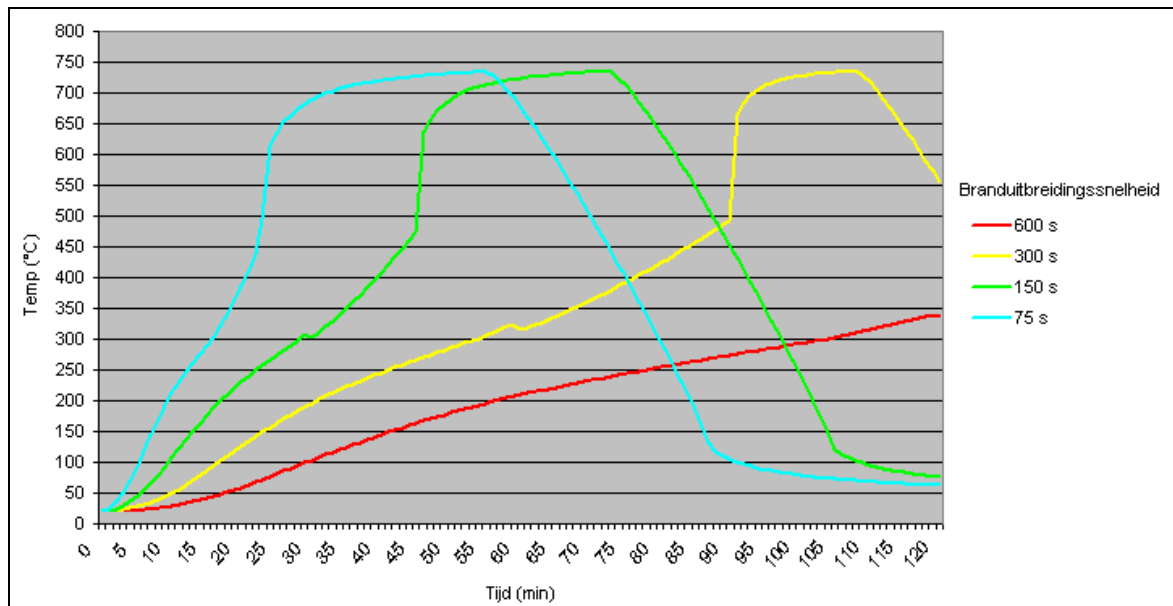
- *Dichtheid*
De dichtheid van de stof bepaalt hoe gemakkelijk zuurstof met de stof kan reageren. Bij een hoge dichtheid van een stof zal zuurstof moeilijk bij de moleculen van de stof kunnen komen, waardoor de reactie traag verloopt. De hoeveelheid warmte die in dit geval wordt geproduceerd, is dan ook beperkt. Bij een stof met een lage dichtheid zal er veel ruimte voor zuurstof aanwezig zijn tussen de moleculen van de stof. Hierdoor kan het verbrandingsproces snel verlopen, waardoor de verbrandingssnelheid in dit geval hoog is.
- *Warmtegeleiding*
De warmtegeleiding bepaalt hoe snel warmte in de stof doordringt. Als de warmtegeleiding hoog is, zal warmte zich snel door de stof verspreiden. Dit is gunstig voor de verbrandingsreactie. Bij een stof met een lage warmtegeleiding zal alleen de schil van de stof opwarmen. Omdat de warmte zich langzaam verspreidt door de stof zal de stof plaatselijk snel opwarmen en ontbranden. De verspreiding van de brand is echter wel trager.
- *Chemische samenstelling*
De chemische samenstelling van een stof zal bepalen hoe gemakkelijk of hoe moeilijk zuurstof met de stof kan reageren. Grote koolwaterstoffen reageren moeilijk met zuurstof. Zij zullen eerst pyrolyse moeten ondergaan voordat ze kunnen verbranden. Kleine koolwaterstoffen kunnen daarentegen gemakkelijk reageren.

Ondanks de invloed van de materiaaleigenschappen zullen de meeste branden zich kwadratisch ontwikkelen. De groei van de brand wordt daarom in het fysisch brandmodel uitgerukt in de tijd die de brand nodig heeft om een vermogen van 1 MW te bereiken. Globaal kan er onderscheid worden gemaakt in vier branduitbreidingssnelheden.

- Traag: $t_a = 600$ s: ruimten met slecht brandbare stoffen of slechts kleine hoeveelheden.
- Matig: $t_a = 300$ s: ruimten met brandbare stoffen, zoals woningen, scholen, kantoren en hotels.
- Snel: $t_a = 150$ s: ruimte met veel of gemakkelijk brandbare stoffen zoals theaters, winkels en houtopslag.
- Ultra snel: $t_a = 75$ s: ruimte met zeer brandbare stoffen zoals chemische industrie en opslag van alcohol of gestoffeerde meubels.

De invloed van de branduitbreidingssnelheid op het temperatuurverloop in de ruimte is weer-gegeven in figuur 1.5. In deze, en de hierna volgende figuren, is uitgegaan van een brandruimte van 2.600 m^2 met een vuurlast van 1.140 MJ/m^2 verspreid over 1.000 m^2 . De gehanteerde geometrie van de ruimte is conform de tekeningen als opgenomen in bijlage III.

Uit figuur 1.5 valt af te lezen dat de branduitbreidingssnelheid niet alleen invloed heeft op de groei van de brand, maar ook het moment dat flashover optreedt. Door de snellere brandontwikkeling zal de brandstof in de ruimte ook eerder opgebrand zijn. Hierdoor duurt een brand met een ultra snelle branduitbreiding aanzienlijk korter dan een brand met een trage ontwikkeling.

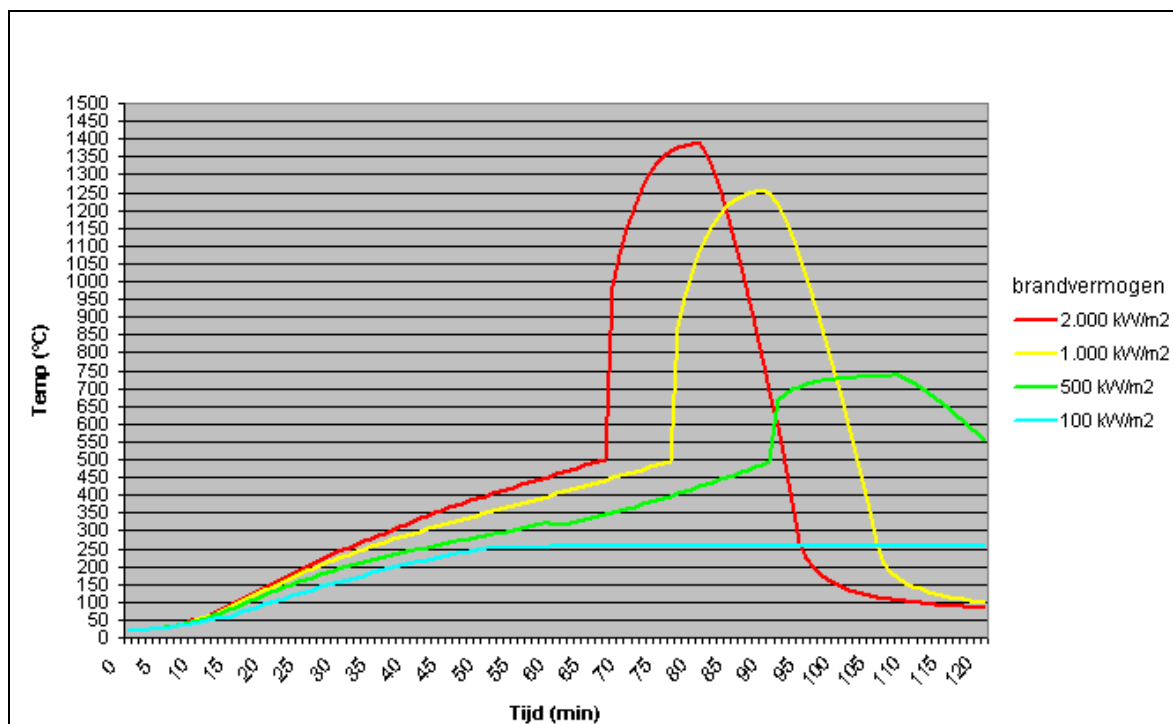


Figuur I.5

Invloed branduitbreidingssnelheid op temperatuurverloop hete zone.

1.1.2.3 Brandvermogen

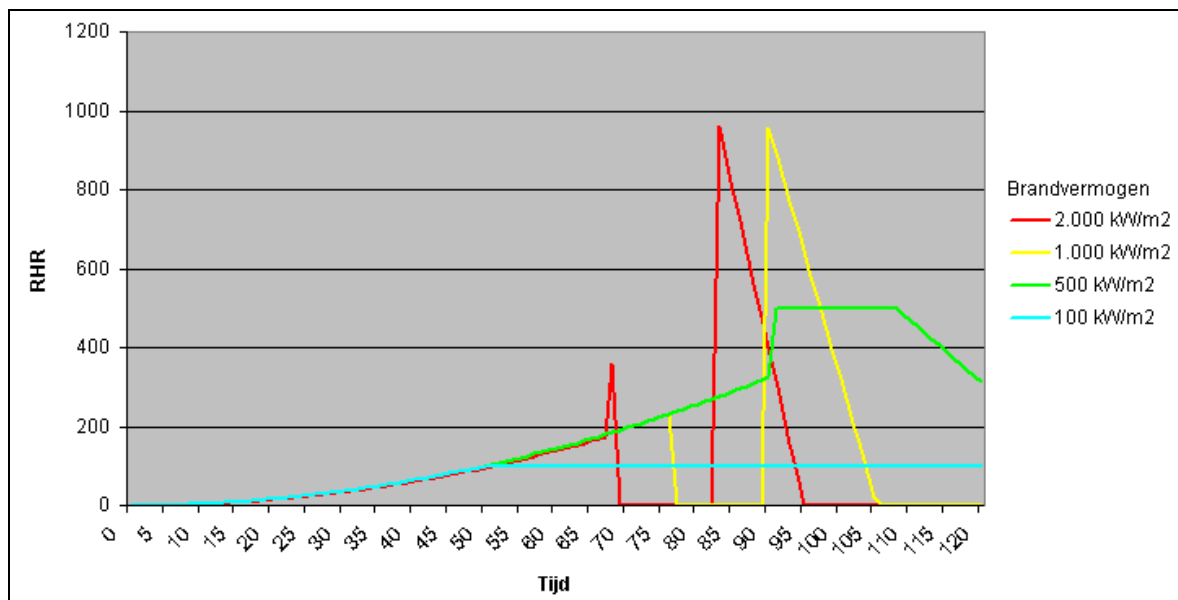
Naast de ontwikkelingssnelheid is ook het brandvermogen van groot belang bij een brand. Waar de ontwikkelingssnelheid de snelheid bepaald waarmee de brand groeit, geeft het brandvermogen de uiteindelijke intensiteit van de brand aan. Het brandvermogen is dan ook van grote invloed op de maximale temperaturen die bij brand optreden in een ruimte, zoals weergegeven in figuur I.6.



Figuur I.6

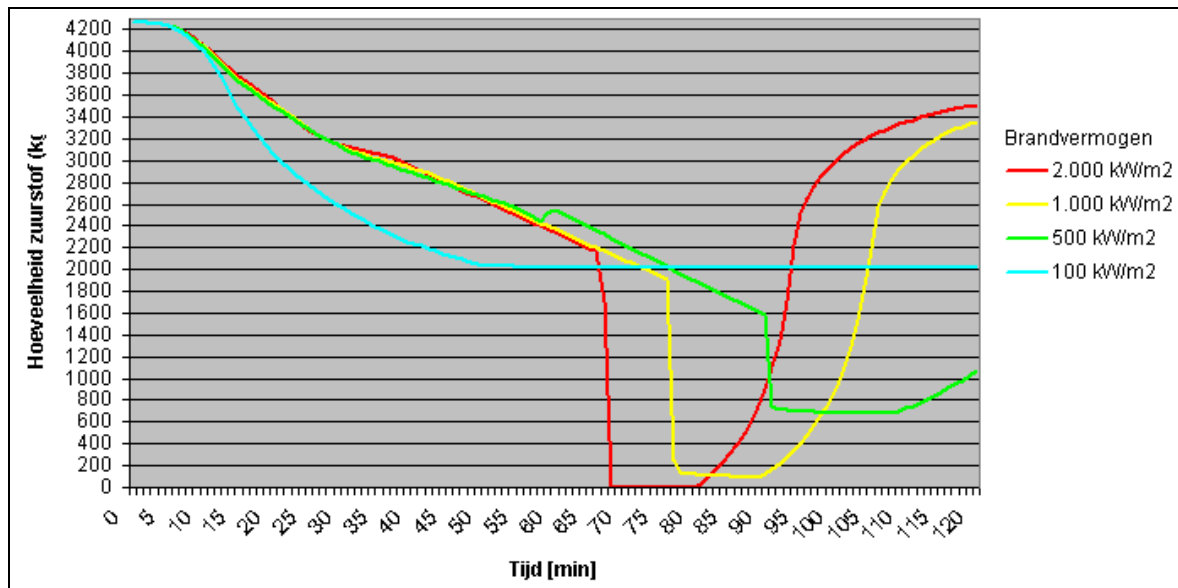
Invloed brandvermogen op temperatuurverloop in ruimte

Het brandvermogen (Rate of Heat Release, RHR [kW/m^2]) geeft de hoeveelheid energie die per seconde per m^2 vrijkomt. Het brandvermogen geeft dan ook aan hoeveel materiaal er per seconde verbrandt. De intensiteit van het brandvermogen is sterk afhankelijk van de hoeveelheid brandbare materialen en de hoeveelheid zuurstof die bij de brand kan komen. Zo zal een brand in een opslaghal met veel materialen in opslagrekken een hoger brandvermogen hebben als een brand in een bulkopslag waar zuurstof moeilijk bij de brand kan komen. Ook de hoeveelheid zuurstof die via gevel- en dakopeningen in een ruimte kan stromen is van invloed op het brandvermogen. De hoeveelheid zuurstof in de ruimte zal uiteindelijk bepalen hoe groot het brandvermogen daadwerkelijk zal worden. Deze invloed wordt geïllustreerd in figuur I.7. In een ruimte met dezelfde karakteristieken zijn branden met vier verschillende brandvermogens gesimuleerd. Ondanks het feit dat een brand met een potentieel brandvermogen van 2.000 kW/m^2 tweemaal intenser is dan een brand van 1.000 kW/m^2 , zal het brandvermogen niet boven de 950 kW/m^2 stijgen. Dit komt doordat er onvoldoende zuurstof via de gevelopeningen naar binnen stroomt voor een volledige verbranding. Het zuurstofniveau in de ruimte is weergegeven in figuur I.8.



Figuur I.7

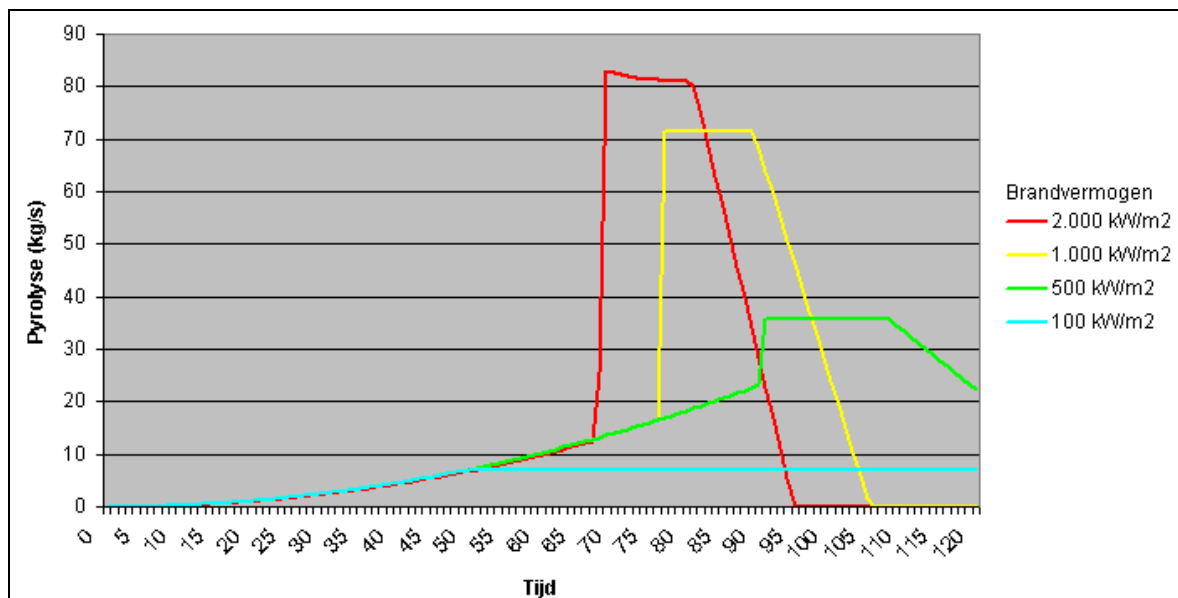
Brandvermogen in vier brandscenario's



Figuur I.8

Hoeveelheid zuurstof in brandruimte

Uit figuur I.8 kan tevens worden opgemaakt dat het brandvermogen tijdelijk tot 0 daalt. Dit komt doordat alle in de ruimte aanwezige zuurstof verbruikt wordt tijdens de flashover, waardoor er geen verbranding meer kan optreden. De pyrolyse van de materialen gaat echter wel door, zoals weergegeven in figuur I.9. Na een aantal minuten is er voldoende zuurstof in de ruimte gestroomd om de ontstane hoeveelheid pyrolysegassen te doen ontbranden. Door de beperkte hoeveelheid zuurstof zal het vermogen van deze verbranding nooit hoger worden dan ca. 950 kW/m².



Figuur I.9

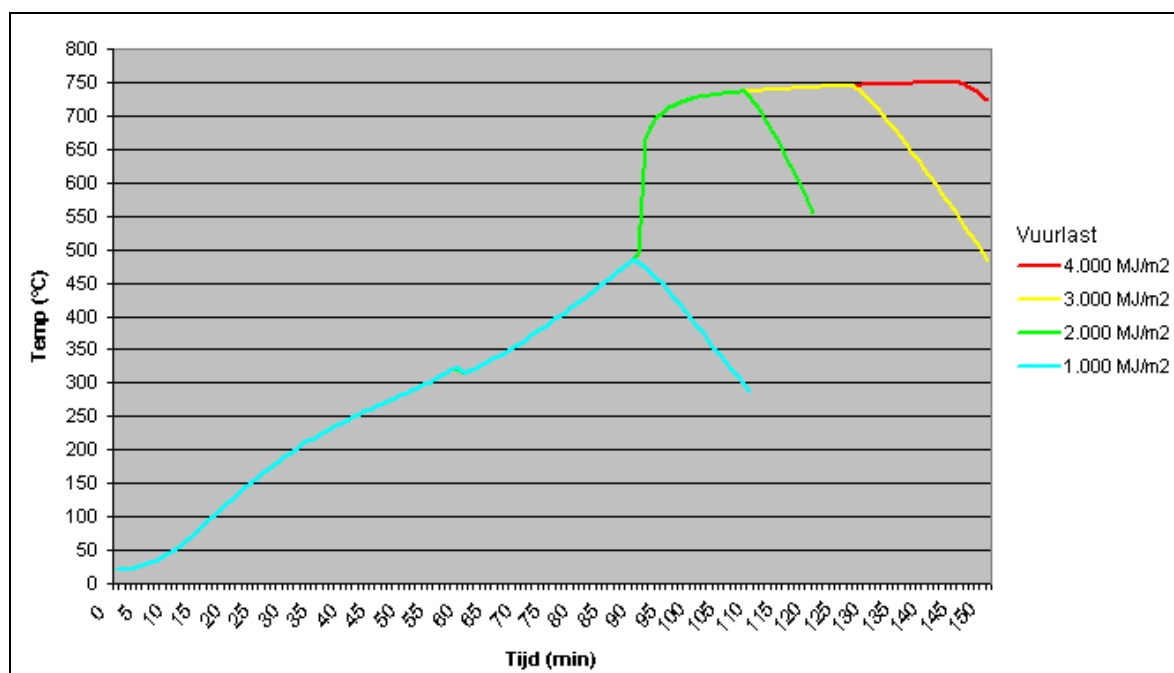
Productie pyrolysegassen bij vier brandscenario's

Bij een beperkt brandvermogen, zoals de scenario's met 500 en 100 kW/m², is er voldoende zuurstof in de ruimte.

Hierdoor is de brand niet meer ventilatiebeheerst en is de hoeveelheid vrijgekomen energie gelijk aan het brandvermogen dat vrij kan komen bij de brand. Ook kan uit figuur I.9 worden opgemerkt dat de maximale temperaturen in de ruimte lager zijn dan bij kleinere brandvermogens. Daarnaast zal de brandduur bij een klein brandvermogen langer zijn. Dit komt doordat er per seconde minder materiaal verbrandt.

I.1.2.4 Vuurlast

De vuurlast in de ruimte is naast de groeisnelheid en het brandvermogen ook een belangrijke parameter bij de brandontwikkeling. De vuurlast [MJ] geeft aan hoeveel brandstof er in een ruimte aanwezig is. Hierbij moet gedacht worden aan meubels of goederen, maar ook aan houten of plastic constructiedelen zoals balkenlagen, kozijnen en kabelgoten. De grootte van de vuurlast bepaalt hoe lang de brand duurt in een ruimte. Een brand met een grote vuurlast zal langer blijven branden dan een brand met een kleine vuurlast. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur I.10. Bij branden met een zeer beperkte vuurlast zal de brand dusdanig beperkt zijn dat er geen flashover optreedt. Er is dan alleen sprake van een lokale brand.



Figuur I.10

Invloed vuurlast op brandduur

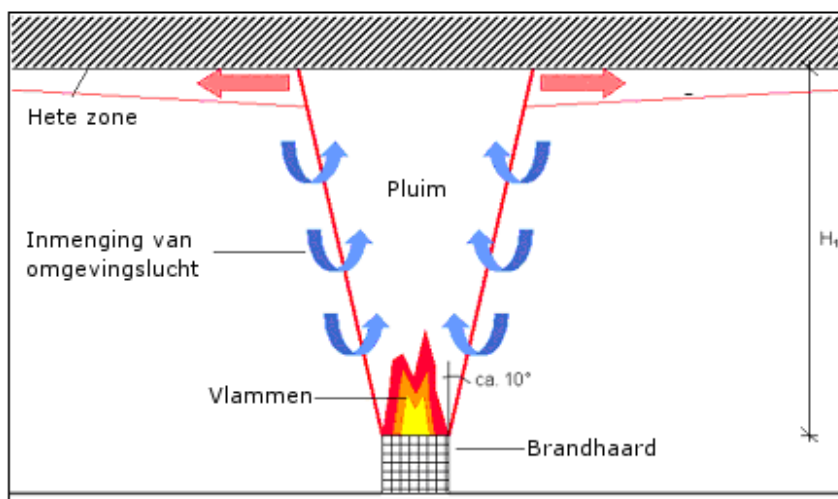
Zoals uit figuur I.10 is op te maken, heeft de vuurlast maar een beperkte invloed op de maximale temperatuur in de ruimte. Na de flashover stijgt de temperatuur erg langzaam. Dit komt doordat het brandvermogen na de flashover niet meer verder stijgt. De lichte stijging in de temperatuur ontstaat alleen doordat er minder energie wegstroomt dan dat er gegenereerd wordt.

1.1.2.5 Rookpluim

Bij de verbranding van een stof ontstaat veel rook. Rook bestaat voornamelijk uit onverbrande roetdeeltjes, pyrolyse- en verbrandingsgassen. Door de energie die vrijkomt bij de verbranding heeft de rook een hoge temperatuur. De gasdichtheid en daarmee ook het gewicht van de rook zal hierdoor lager zijn dan de gasdichtheid van de koudere omgevingslucht⁽¹³⁾. De rook zal hierdoor opstijgen naar de bovenkant van de ruimte. Door de turbulentie die ontstaat door het langs elkaar stromen van de rook en de omgevingslucht wordt koude omgevingslucht in de rookpluim gemengd. Hierdoor neemt de massa van de rookpluim toe, maar nemen de temperatuur en de stijgsnelheid van de pluim af. Zolang de ruimte niet te hoog is, zal de pluim blijven opstijgen totdat het plafond is bereikt. Zodra de pluim het plafond van de ruimte bereikt, zal deze zich radiaal uitspreiden. Omdat de lucht in de pluim warmer is dan de overige lucht in de ruimte zal deze op de koele omgevingslucht gaan drijven. Naarmate de brand langer voortduurt, zal de laag met verbrandingsgassen dikker worden en de koude lucht onder deze laag naar beneden stuwten. De mate waarmee deze hete laag groeit kan worden berekend met het pluimmodel⁽¹³⁾. Dit proces is weergegeven in figuur 1.11

Als het plafond van de ruimte erg hoog ligt, zal de temperatuur in de pluim dusdanig dalen dat de temperatuur gelijk is aan de omgevingstemperatuur. Hierdoor stopt de pluim met stijgen. De rook uit de pluim gaat zich dan horizontaal verspreiden in de ruimte. Hierdoor ontstaat een rooklaag halverwege de ruimte. Dit proces wordt stratificatie genoemd⁽¹⁵⁾. Pas als de brand verder groeit en de temperatuur van de rook hoger wordt, kan de rook verder stijgen.

Het gedrag van de pluim kan worden berekend aan de hand van een tweetal modellen. Het model van Thomas en het model van Heskestad. Beide modellen gaan uit van een situatie die onafhankelijk is van de tijd. Dit betekent dat veranderingen in de pluim, zoals het toenemen van het brandvermogen, directe gevolgen zal hebben op het gedrag van de rookpluim. Deze modellen zijn dus alleen bruikbaar bij stationaire en quasi-stationaire branden. Bij stationaire branden blijven de van invloed zijnde parameters constant gedurende een bepaalde tijd. Bij quasi-stationaire branden zijn de veranderingen in de parameters te verwaarlozen in vergelijking met de stijgsnelheid van de pluim. Deze situatie zal zich bij praktisch alle branden voordoen. Beide pluimmodellen kunnen dus worden toegepast in het fysisch brandmodel.



Figuur 1.11
Pluimmodel

Voor het fysisch brandmodel kunnen twee pluimmodellen worden toegepast. Namelijk het pluimmodel van Thomas en het pluimmodel van Heskestad. Aan de hand van deze modellen is te bepalen hoe de rookpluim zich zal gedragen.

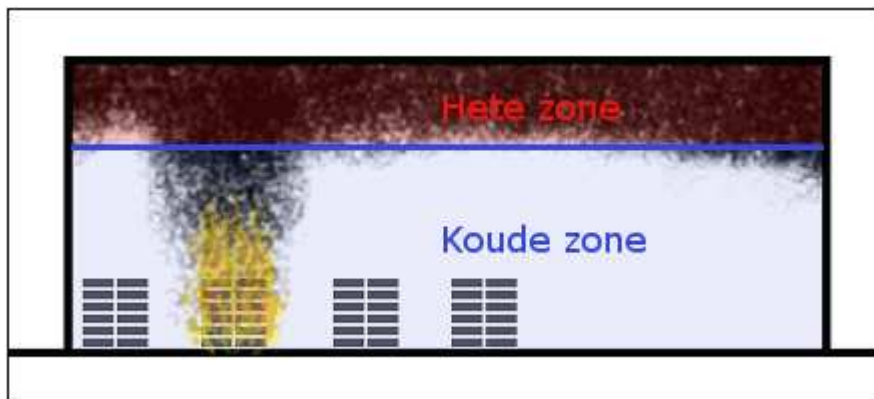
Het model van Thomas is alleen afhankelijk van de omtrek van de brand. Het pluimmodel van Heskestad rekent daarentegen met de omvang en het brandvermogen van de brand. Dit model is dus gedetailleerder dan het model van Thomas. Het heeft dan ook de voorkeur om het model van Heskestad te hanteren voor de berekeningen in het fysisch brandmodel.

1.1.2.6 Twee zonemodel

Voordat de brand ontstaat, kan de ruimte worden gezien als een enkele homogene zone waarin de condities in de ruimte overal hetzelfde zijn. Na het ontstaan van de brand zullen verbrandingsgassen via de pluim opstijgen en onder het plafond een hete laag opbouwen. In deze situatie is er sprake van twee zones. Een hete zone met daarin de rook- en verbrandingsgassen en een koude zone met daarin de oorspronkelijke lucht in de ruimte, zie figuur 1.12.

In het fysisch brandmodel wordt deze situatie als uitgangspunt gehanteerd voor de berekening van de ontwikkeling van de brand. Hier zijn vooral de opbouw van de hete rooklaag en de temperatuur van deze laag van belang. Ook wordt berekend hoe de temperatuurontwikkeling zich in de koude zone zich ontwikkelt. Voor deze berekeningen hanteert het twee zonemodel een aantal submodellen, te weten:

- model om brandontwikkeling te berekenen;
- pluimmodel om het massatransport naar de hete laag te berekenen;
- model om massatransport door gevel- en dakopeningen te berekenen;
- model om afkoeling van de lagen ter hoogte van de omhulling te berekenen.



Figuur 1.12

Hete verbrandingsgassen stijgen bij brand op en creëren een hete zone boven in de ruimte.

1.1.2.7 Flashover

Een belangrijke gebeurtenis tijdens een brand is de flashover. Naarmate een brand zich verder ontwikkelt, stijgt de temperatuur van de hete laag. Ook neemt de hoeveelheid onverbrande roetdeeltjes en pyrolysegassen in deze laag sterk toe. Zodra de hete laag een temperatuur van 500-600°C bereikt, zullen deze gassen ontbranden. Deze verbranding vindt vooral plaats op het scheidingsvlak tussen de twee zones, de interface. In dit gebied komen de hete gassen in aanraking met de koudere, maar zuurstofrijke lucht. Op het moment van flashover zal de brand zich zeer snel ontwikkelen. Doordat de rooklaag voor een groot deel in brand zal staan, zal de temperatuur in de ruimte zeer snel stijgen. Hierdoor zullen alle, nog niet brandende producten, in brand vliegen. De ruimte zal zich in dit geval als een brandende zone gaan gedragen.

In het fysisch brandmodel wordt er niet alleen na de flashover overgeschakeld naar één zonemodel. Ook in andere situaties schakelt het fysisch brandmodel over op één zonemodel. Dit omdat er meer situaties zijn waarbij de ruimte zich als een enkele zone gaat gedragen. Het fysisch brandmodel schakelt in de volgende situaties over van een twee naar een één zonemodel⁽¹⁶⁾:

1. De gastemperatuur van de hete zone bedraagt $>500^{\circ}\text{C}$. Afhankelijk van de luchtdruk en de zuurstofconcentratie treedt er vanaf deze temperatuur een flashover op. Tevens is de warmtestraling van de rooklaag dusdanig hoog dat de materialen in de ruimte zullen ontbranden.
2. De brandstof in de brandruimte bevindt zich gedeeltelijk in de hete zone en de temperatuur van de hete zone bevindt zich boven de 300°C .
3. De gastemperatuur van de koude zone overschrijdt de 300°C .
4. De hete zone vult $>80\%$ van het ruimtevolume.
5. Het brandoppervlakte bedraagt meer dan 50% van het oppervlak van de ruimte.

Indien er aan voorwaarde één of twee wordt voldaan, zal dit leiden tot een flashover in de brandruimte. In situatie drie en vier vindt er echter geen flashover plaats. In deze situaties blijft er sprake van een lokale brand.

In geval van een niet-uniform verdeelde vuurbelasting, maar van een lokale vuurlast treedt in situatie één en twee wel een flashover op. Deze flashover zal echter niet automatisch leiden tot een één zonemodel. De overgang vindt pas plaats als er naast voorwaarde één of twee ook aan voorwaarde drie wordt voldaan.

1.1.2.8 Eén zonemodel

Na de flashover is er geen sprake meer van een hete rooklaag en een koude zone. De temperatuur in de ruimte zal overal even hoog zijn. De ruimte zal zich in dit geval als een enkele zone gaan gedragen. Na de flashover wordt er dan ook in het fysisch brandmodel gerekend met het één zonemodel. In dit model is de temperatuur in de ruimte uniform verdeeld en sterk afhankelijk van het brandvermogen in de ruimte. De tijdduur van de brand wordt bepaald door de vuurlast die in de ruimte aanwezig is. Zodra 70% van de brandstof in de ruimte is opgebrand, treedt de dooffase in. Tijdens deze fase daalt het brandvermogen in de ruimte lineair en neemt de temperatuur van de ruimte gestaag af.

I.1.3 Randvoorwaarden

Hoewel het zonemodel in veel situaties toepasbaar is, zijn er toch enkele randvoorwaarden waar aan voldaan moet worden voordat er met dit model mag worden gerekend⁽¹⁶⁾.

Verhoudingen brandruimte

Een kenmerk van een zonemodel is de homogeniteit van massa en energie binnen de zones. Er mag worden aangenomen dat er voldoende homogeniteit aanwezig is als er wordt voldaan aan de volgende ruimteverhoudingen:

- lengte/breedte van de ruimte < 5 ;
- lengte/hoogte van de ruimte < 6 ;
- breedte/hoogte van de ruimte $> 0,2$.

Eisen WBDBO omhulling brandruimte

Indien de brandruimte onderdeel uitmaakt van een groter (sub)brandcompartiment en de brandwerendheid van de omhulling < 30 minuten moet naast de berekening van de brandruimte ook een berekening voor het brandcompartiment worden gemaakt. De situatie met de zwaarste consequenties is maatgevend.

Randvoorwaarden branduitbreidingssnelheid

Voor de pre-flashover fase geldt als randvoorwaarde dat de brandvoortplanting via de permanente vuurlast ondergeschikt moet zijn aan de variabele vuurlast. Bij Euroklasse Cfl (of beter) voor vloeren en Euroklasse B (of beter) voor de overige binnenafwerking wordt er voldaan aan deze randvoorwaarde. Hier mag maximaal 5% van het oppervlak van afwijken.

I.1.4 Lokaal brandmodel

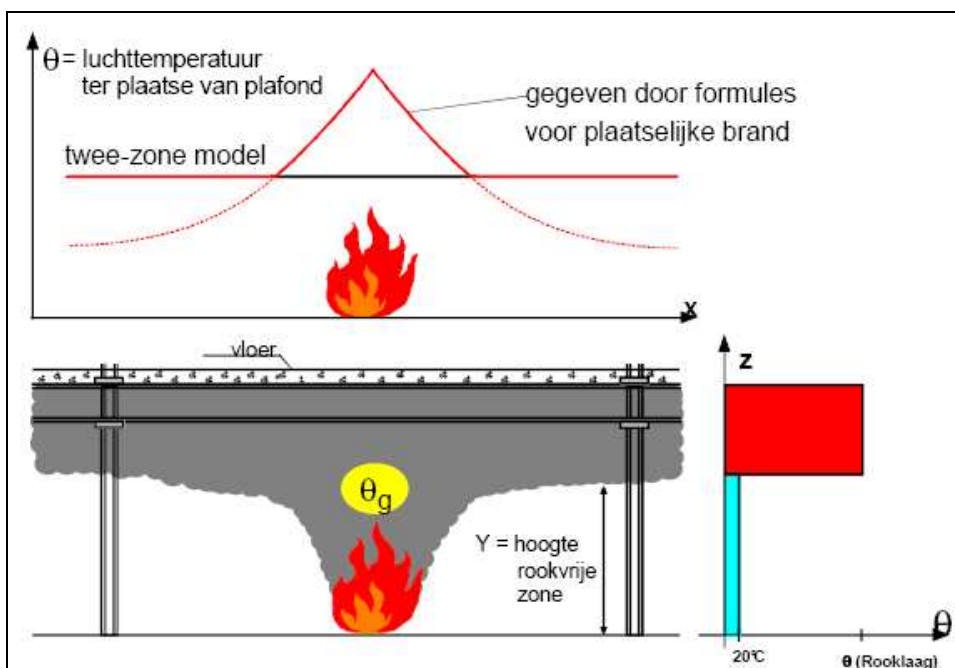
Het zonemodel in het fysisch brandmodel gaat uit van een brand die uitgroeit tot een volledig ontwikkelde brand in de gehele ruimte. Hierbij wordt verondersteld dat de temperatuur in beide lagen uniform is verdeeld. De temperaturen die uit het zonemodel volgen, zijn dan ook gemiddelde temperaturen in de koude en hete zone. In een situatie waarbij de vuurlast gelijkmatig is verspreid over de brandruimte is dit uitgangspunt correct. Er zijn echter ook situaties, zoals in figuur I.13 is weergegeven, waarbij de vuurlast geconcentreerd is op een enkele plek in de brandruimte. In dit geval zal de constructie niet overal even zwaar worden belast. De belasting door de brand ter hoogte van de brandhaard kan in dit geval niet nauwkeurig worden ingeschat met het zonemodel.

In de Eurocode wordt dan ook vermeld dat zodra het brandoppervlak minder dan 25% van de brandruimte beslaat de brand als lokaal moet worden aangemerkt⁽⁸⁾. In dit geval mag het zonemodel niet worden toegepast voor de toetsing van de constructie boven de brandhaard. De temperatuurontwikkeling van de constructie boven de brandhaard kan in dit geval worden berekend met het lokaal brandmodel van Hasemi. De constructie die zich niet boven de brandhaard bevindt, mag wel worden getoetst aan de hand van het zonemodel. De hoogste temperatuur die volgt uit deze combinatie is maatgevend voor het te toetsen van een bepaald constructie-element. Zoals in figuur I.14 is weergegeven zal een ligger boven een brandhaard zwaarder belast worden door brand dan een ligger op enige afstand van de brandhaard.



Figuur I.13

Lokale brandhaard creëert alleen een lokale belasting door brand op de constructie. De constructie boven de brandweermannen wordt dan ook minder zwaar belast dan de constructie boven het brandende bankstel.

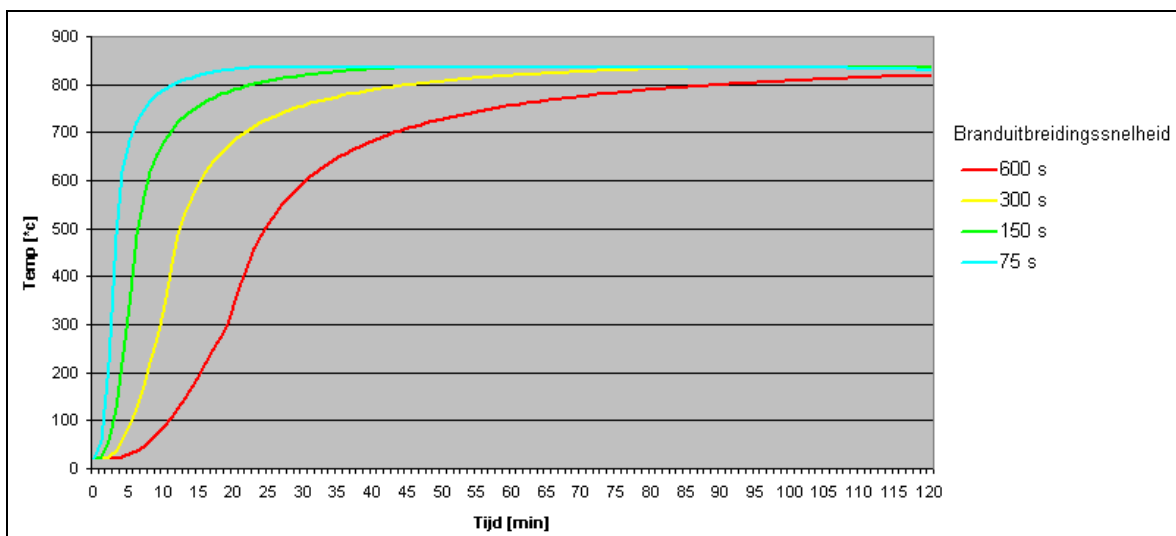


Figuur I.14

Combinatie van het lokale brandmodel en het zonemodel op de temperatuur ter plaatse van het plafond

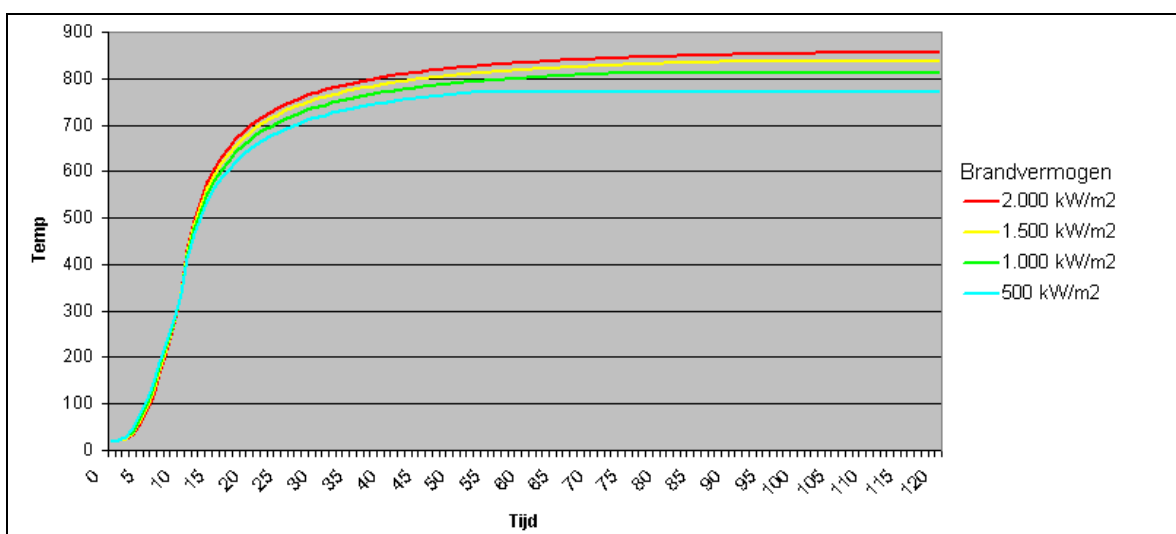
Het lokaal brandmodel van Hasemi berekent aan de hand van het brandvermogen en de omvang de brand de temperatuur onder het plafond. Voor deze berekening zijn met name de groeisnelheid van de brandomvang en het brandvermogen van belang. Aan de hand van deze gegevens wordt de vlamlengte en de temperatuur boven de vlammen berekend.

In het lokaal brandmodel van Hasemi is, zoals weergegeven in figuur I.15, met name de groeisnelheid van het brandoppervlak van invloed op het temperatuurontwikkeling. De invloed van het brandvermogen is, zoals weergegeven in figuur I.16, beperkt. Het brandvermogen heeft slechts een kleine invloed op de maximale temperatuur onder het plafond. Het brandvermogen heeft geen invloed op de ontwikkelingssnelheid van de temperatuur. Dit omdat de temperatuur onder het plafond in het model van Hasemi voornamelijk wordt bepaald door de hoogte van de vlammen en in beperkte mate door de intensiteit van de vlammen.



Figuur I.15

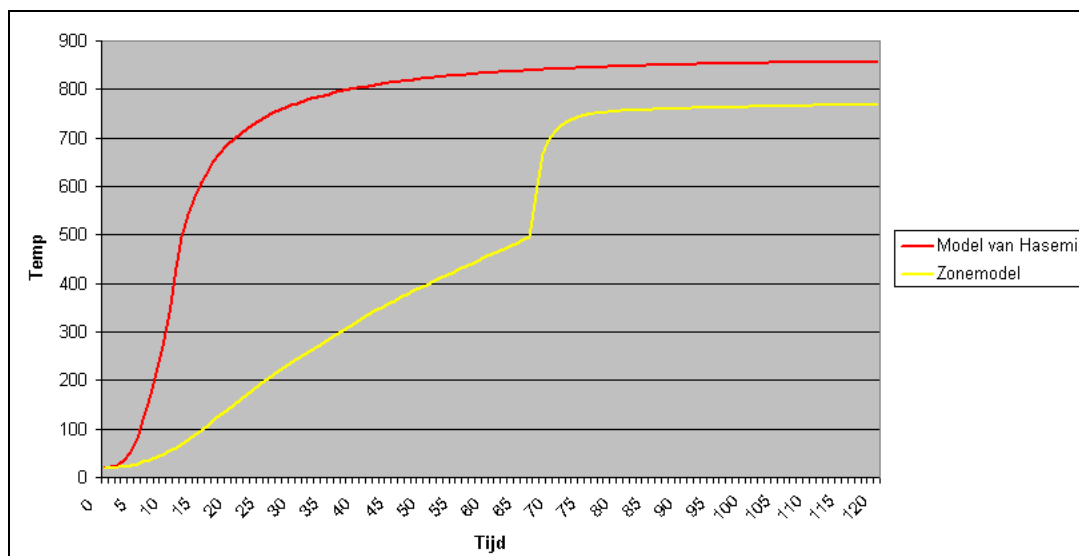
Invloed branduitbreidingssnelheid op temperatuur



Figuur I.16

Invloed brandvermogen op temperatuur

In de Eurocodes staat vermeld dat het lokaal brandmodel van Hasemi alleen toegepast hoeft te worden bij een lokale vuurlast. Toch zal ook een brand die zich ontwikkelt naar een volledige brand een stadium kennen waarin de brand lokaal is. In deze situatie zou het model van Hasemi in principe ook van toepassing moeten zijn. De temperatuur direct boven de vlammen is namelijk hoger dan de gemiddelde temperatuur in de hete laag. Onderzocht is hoe groot het temperatuurverschil is boven de vlammen in vergelijking met de rest van de ruimte. Hieruit volgt dat de temperatuur die berekend is aan de hand van het lokaal brandmodel significant hoger is dan de temperatuur berekend aan de hand van het zonemodel. Bij een kritische staaltemperatuur van 600°C zal een ligger boven de brandhaard binnen 15 minuten bezwijken. Dit terwijl een ligger getoetst aan de hand van het zonemodel gedurende 70 minuten voldoende sterk zou moeten zijn. Figuur I.17 illustreert dit.



Figuur I.17

Vergelijking tussen temperatuur Zonemodel en model van Hasemi

Uit het bovenstaande onderzoek kan geconcludeerd worden dat de constructie, met uitzondering van de constructie boven de brandhaard, gedurende 70 minuten voldoende weerstand tegen bezwijken zal bieden. Ter hoogte van de brandhaard zal de constructie echter na 15 minuten al falen.

Voor een veilige beoordeling van de weerstand tegen bezwijken is het dus beter om ook bij een gelijkmatig verdeelde vuurlast de constructie niet alleen te toetsen op de temperaturen die volgen uit het zonemod, maar ook op de temperaturen die volgen uit het lokaal brandmodel van Hasemi.

I.1.5 Probabilistische aspecten

In het zonemodel en het lokaal brandmodel van Hasemi wordt geen rekening gehouden met de invloed van brandveiligheidsinstallaties zoals sprinklers, brandmeldinstallaties e.d. op het verloop van de brand. Ook de kans op brand wordt niet meegenomen in beide modellen. Om toch de invloed van brandveiligheidsinstallaties en het risico van brand mee te nemen in het model verschaft de Eurocode de mogelijkheid om een correctiefactor op de brand toe te passen⁽¹⁸⁾⁽²¹⁾.

Het uitgangspunt achter de correctiefactor is dat de kans op een ernstige brand, die de hoofd-draagconstructie zou kunnen bedreigen, gereduceerd wordt door de toepassing van brand-veiligheidsinstallaties en toeneemt bij een groter vloeroppervlak of een hogere risicoklasse⁽¹⁸⁾. Bij de toepassing van bijvoorbeeld een sprinklerinstallatie zal de brand beheerst of zelfs geblust worden. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat een brand dusdanig groot wordt dat het de constructie bedreigt. Hetzelfde geldt voor de toepassing van een brandmeldinstallatie die in een vroeg stadium de brandweer zal waarschuwen. Door de snelle opkomsttijd zal de brand snel onder controle zijn. Hierdoor is de kans op het bezwijken van de constructie door brand minder groot dan in een situatie zonder brandveiligheidsinstallaties⁽²¹⁾. Vanuit de Eurocode geldt de eis dat de kans dat de hoofddraagconstructie instort ten gevolge van een brand niet hoger mag zijn dan de kans dat hoofddraagconstructie faalt onder normale gebruiksomstandigheden.

Deze kans bedraagt $7,23 \cdot 10^{-5}$ per jaar. De kans op instorting door brand moet dus kleiner of gelijk zijn aan $7,23 \cdot 10^{-5}$ per jaar⁽¹⁸⁾. Doordat de kans op bezwijken bij de toepassing van brandveiligheidsinstallaties afneemt mag er worden gerekend met een minder zware brand. Het veiligheidsniveau van het risico van brand en de invloed van brandveiligheidsinstallaties wordt hiermee gekoppeld aan de zwaarte van een brand. Een kleine brand met een laag brandvermogen zal de constructie in dezelfde mate bedreigen als een grote brand die beheerst wordt door een sprinklerinstallatie.

De correctiefactor wordt bepaald aan de hand van verschillende factoren. Deze hebben betrekking tot:

- de kans op brand;
- de vloeroppervlakte van brandcompartiment;
- de risicoklasse van gebouw;
- de toegepaste brandveiligheidsinstallaties.

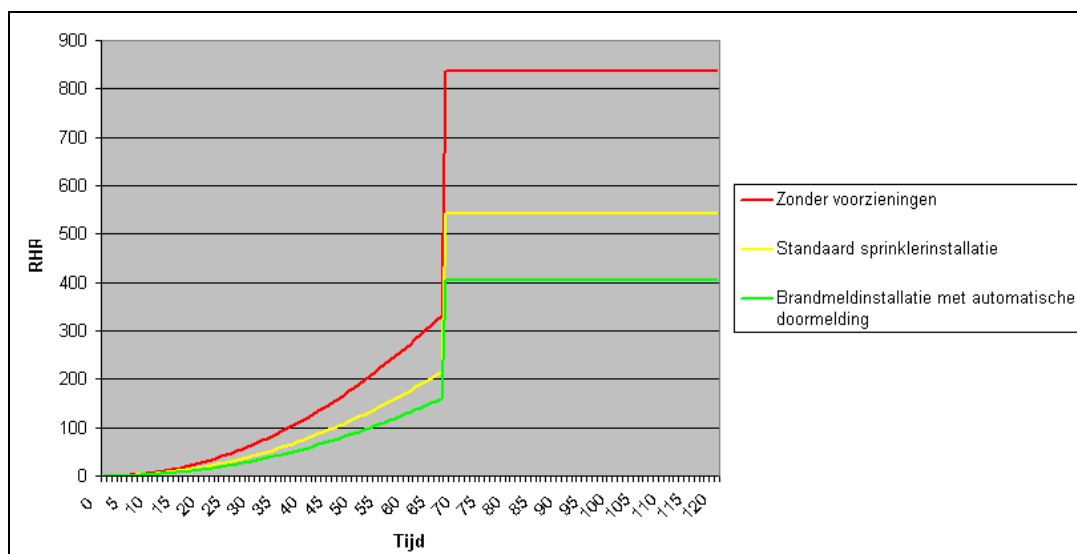
Voor elk van de genoemde factoren zijn in Nationale Bijlage E van Eurocode 1 vermenigvuldigingsfactoren gegeven. Aan de hand van deze vermenigvuldigingsfactoren wordt de correctiefactor bepaald. Deze waarde wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$P_{tot} = P_1 * P_2 * P_{ni}$$

Waarin:

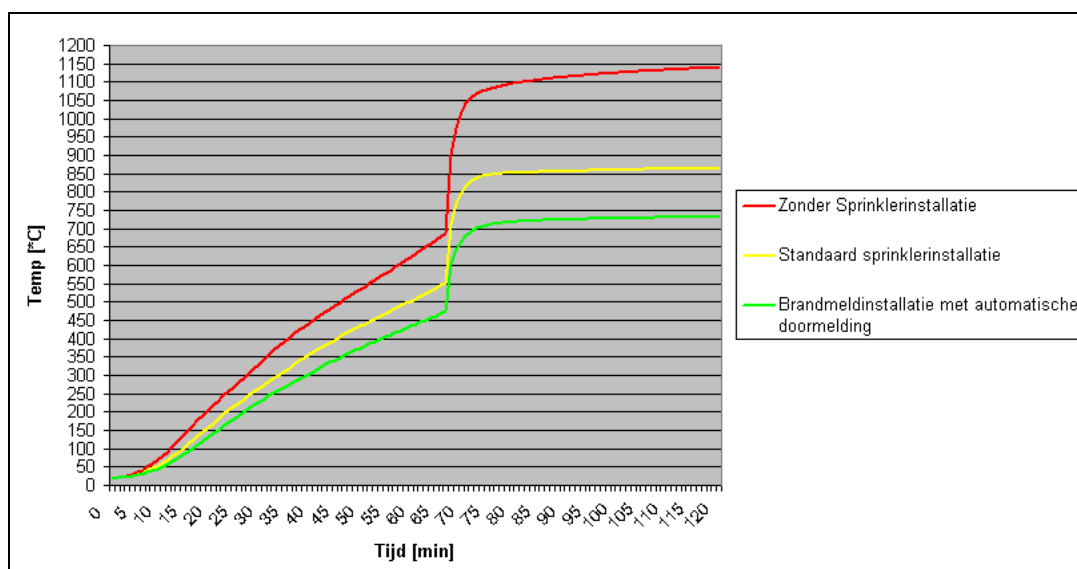
- P_{tot} : vermenigvuldigingsfactor voor referentiekans;
- P_1 : vermenigvuldigingsfactor voor activeringskans;
- P_2 : vermenigvuldigingsfactor voor risicoklasse;
- P_{ni} : vermenigvuldigingsfactor voor brandveiligheidsinstallaties.

Aan de hand van de uitkomst van deze formule wordt de correctiefactor bepaald. De te hanteren correctiefactor wordt bepaald aan de hand van tabel E.4 in de Nationale Bijlage van Eurocode 1. De berekende correctiefactor wordt vervolgens toegepast op het brandvermogen. Door deze correctiefactor zal het brandvermogen toe- of afnemen. Hierdoor zal ook het temperatuurverloop in het zonemodel gecorrigeerd worden. Bij een afname van het brandvermogen zal de temperatuur minder hoog worden in de ruimte, waardoor de staalconstructie langer weerstand biedt tegen de brand. Een voorbeeld van de invloed van verschillende brandveiligheidsinstallaties is weergegeven in figuur I.18 en I.19.



Figuur I.18

Invloed correctiefactor brandveiligheidsinstallatie op brandvermogen.



Figuur I.19

Invloed correctiefactor brandveiligheidsinstallatie op temperatuur in hete zone.

I.2 Invloed parameters op fysisch brandmodel

Op het fysisch brandmodel zijn een groot aantal parameters van invloed. Zo zijn naast de branduitbreidingssnelheid, het brandvermogen en de vuurlast zijn ook enkele ruimte-karakteristieken van invloed op de brandontwikkeling in de ruimte. Te weten:

- invloed van de gevel- of dakopeningen;
- invloed van een eventuele rook- en warmte afvoerinstallatie;
- omvang van het brandcompartiment;
- invloed van de scheidingsconstructie tussen de brandruimte en de rest van de omgeving.

I.2.6 Invloed gevelopeningen

Gevelopeningen hebben een grote invloed op het brandverloop in de ruimte. De invloed van de gevelopeningen kan worden onderverdeeld in de invloed van de oppervlakte van de openingen en de invloed van de plaats van de gevelopeningen. Hierbij is voornamelijk van belang of de opening zich aan de boven- of aan de onderkant van de gevel bevindt.

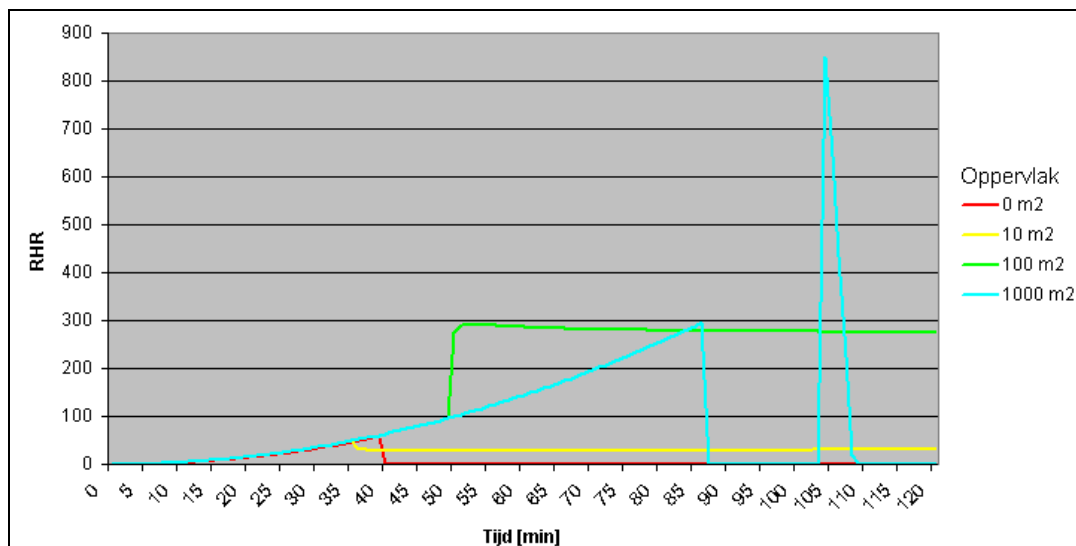
De openingen in de gevel bepalen het massatransport door de gevel. Na het breken van het glas in de ramen zal rook, zoals weergegeven in figuur I.20, de brandruimte uitstromen en verse zuurstofrijke lucht de ruimte instromen. Dit proces ontstaat door de drukverschillen in de ruimte. Door de hoge temperatuur is de luchtdruk hoog in de hete laag. Hierdoor zullen de verbrandingsgassen de ruimte uitstromen. In de koude zone heerst echter een lage luchtdruk. Door de verbranding van de materialen in de ruimte wordt continu lucht onttrokken uit de koude zone. Hierdoor daalt de luchtdruk gestaag. Hierdoor zal verse zuurstofrijke lucht de ruimte in stromen.



Figuur I.20

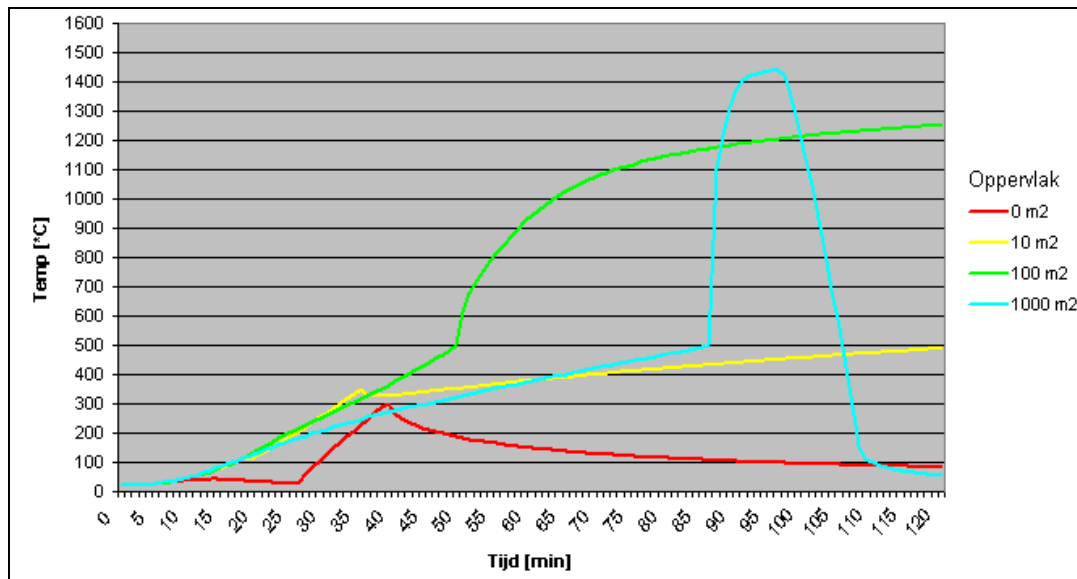
Massatransport door gevelopening bij brand

De hoeveelheid zuurstof die de ruimte instroomt is van grote invloed op het brandverloop in de ruimte. In figuur I.21 t/m I.23 is de invloed van het oppervlak van de gevelopeningen op het brandverloop weergegeven. Zoals uit de figuren valt af te lezen zal in een ruimte zonder gevelopeningen de hoeveelheid zuurstof snel verbruikt zijn. De intensiteit van de brand is dan afhankelijk van de hoeveelheid kieren en naden in de constructie. Deze hoeveelheid lucht is echter dusdanig beperkt dat de brand en daarmee de temperatuuropbouw beperkt zal zijn. Tevens zal de luchtdruk snel oplopen waardoor hoge belastingen worden uitgevoerd op de omhulling van het brandcompartiment. Ook bij een beperkte hoeveelheid gevelopeningen zal de brand beperkt blijven. Pas bij een geveloppervlak van 100 m² op een vloeroppervlak van 2.600 m² zal de brand op een normaal vermogen branden. Bij een grote hoeveelheid gevelopeningen zal veel rook en warmte via de gevelopeningen de ruimte uitstromen. Hierdoor blijft de temperatuurontwikkeling beperkt en treedt de flashover pas laat op. Door de grote hoeveelheid zuurstof zal de flashover een groot vermogen hebben. Hierdoor zal de temperatuur in korte tijd aanzienlijk stijgen. Binnen korte tijd zal, ondanks de grote hoeveelheid gevelopeningen, de zuurstof in de ruimte op zijn. Tevens is de meeste brandstof na de flashover op. Hierdoor dooft de brand snel uit.



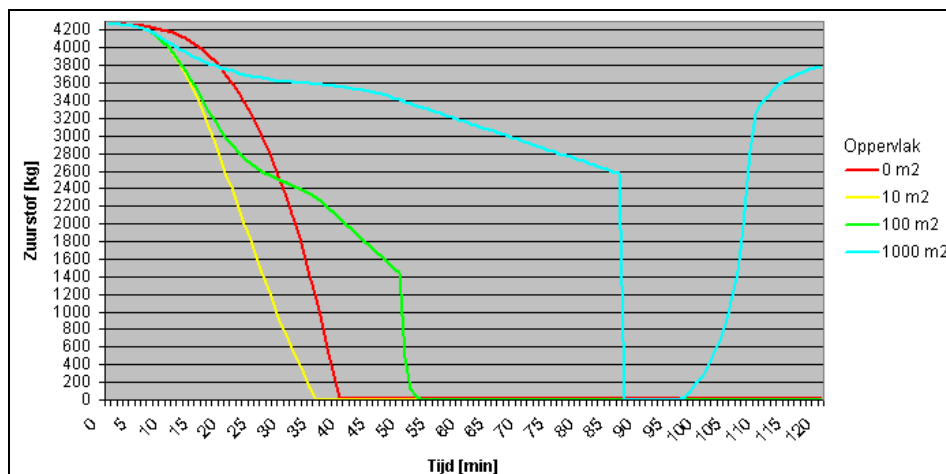
Figuur I.21

Invloed oppervlak gevelopeningen op brandvermogen in ruimte.



Figuur I.22

Invloed oppervlak gevelopeningen op temperatuurontwikkeling in ruimte.



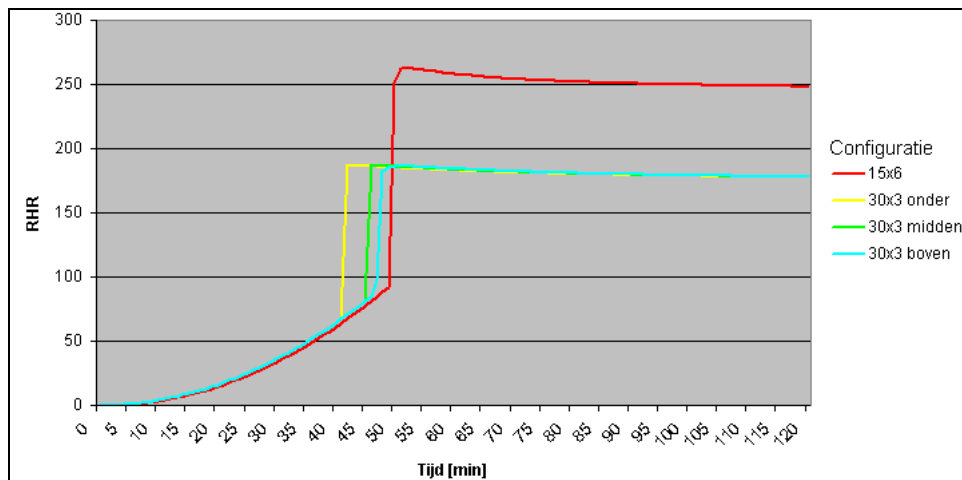
Figuur I.23

Invloed oppervlak gevelopeningen op hoeveelheid zuurstof in ruimte.

Naast het oppervlak van de gevelopeningen speelt ook de plaats van de gevelopening een rol. Zo zal er door een opening aan de onderkant van een gevel voornamelijk zuurstofrijke lucht binnenstromen. Door een opening aan de bovenzijde van gevel zullen voornamelijk hete gassen de ruimte uitstromen. Bij een opening in het midden van de gevel stromen zowel hete gassen de ruimte uit als koude gassen de ruimte in.

De rol van de locatie van de gevelopening is echter beperkt. Bij een gevelopening aan de onderzijde van de gevel treedt de flashover ongeveer 10 minuten eerder op dan bij een opening aan de bovenzijde van de ruimte. Het uiteindelijke brandvermogen na de flashover is onafhankelijk van de plaats van de gevelopening, zie figuur I.24.

Een gevelopening over de volle hoogte van de ruimte heeft daarentegen veel effect op het brandvermogen. Door de balans tussen in- en uitstromende gassen ontstaat een goede verbranding waardoor het brandvermogen hoger is.

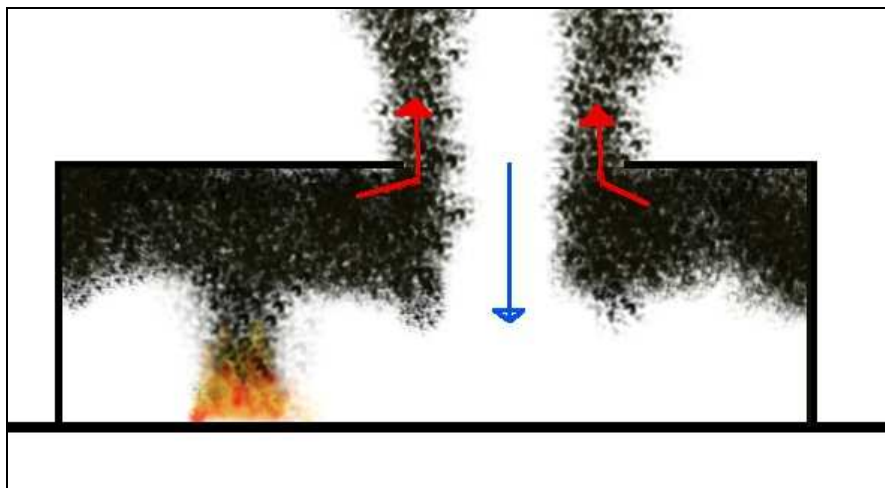


Figuur I.24

Invloed locatie gevelopening op brandvermogen

I.2.7 Invloed dakopeningen

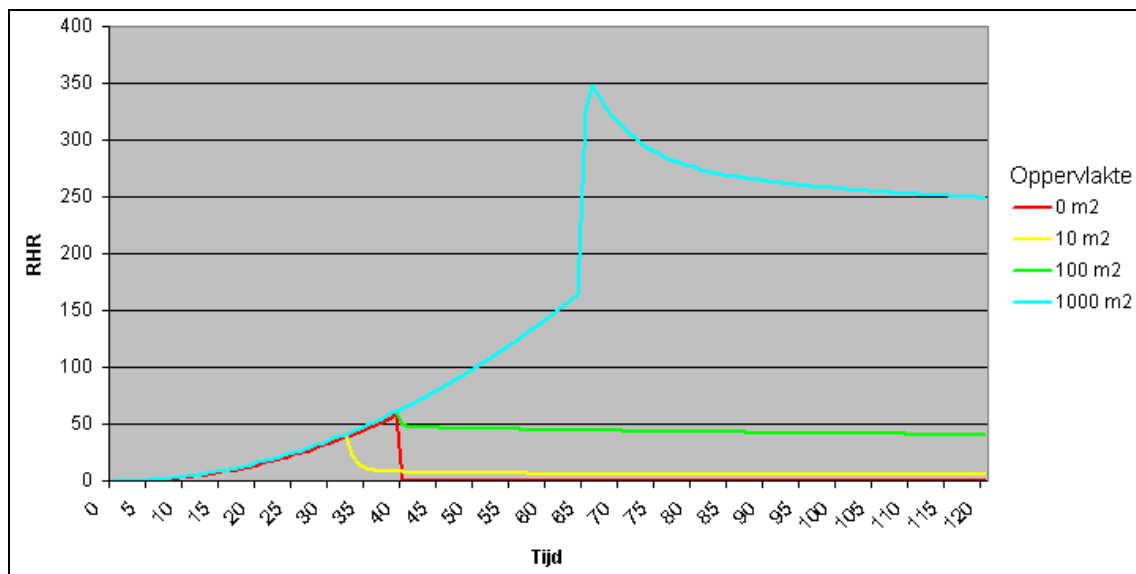
Door een dakopening zullen voornamelijk hete rookgassen wegstromen. Dit komt enerzijds door de hoge luchtdruk van de hete zijde en anderzijds doordat hete lucht van naturen wil opstijgen. Dit proces is voornamelijk het geval bij kleine of smalle openingen in het dak. Bij grote openingen zal de opwaartse kracht van de pluim uit de gevelopening onvoldoende zijn om de koude lucht boven de gevelopening weg te drukken. In dit geval zal de koude lucht in het midden van de gevelopening de ruimte instromen. Aan de randen van de dakopening blijven hete gassen echter wel wegstromen, zie figuur I.25.



Figuur I.25

Invloed grote dakopening op massatransport door dakopening

De invloed van het oppervlak van een gevelopening is weergegeven in figuur I.26. Hieruit kan worden opgemaakt dat in een situatie zonder gevelopeningen een aanzienlijke oppervlakte aan dakopeningen noodzakelijk is om voldoende zuurstof bij de brand te laten komen.

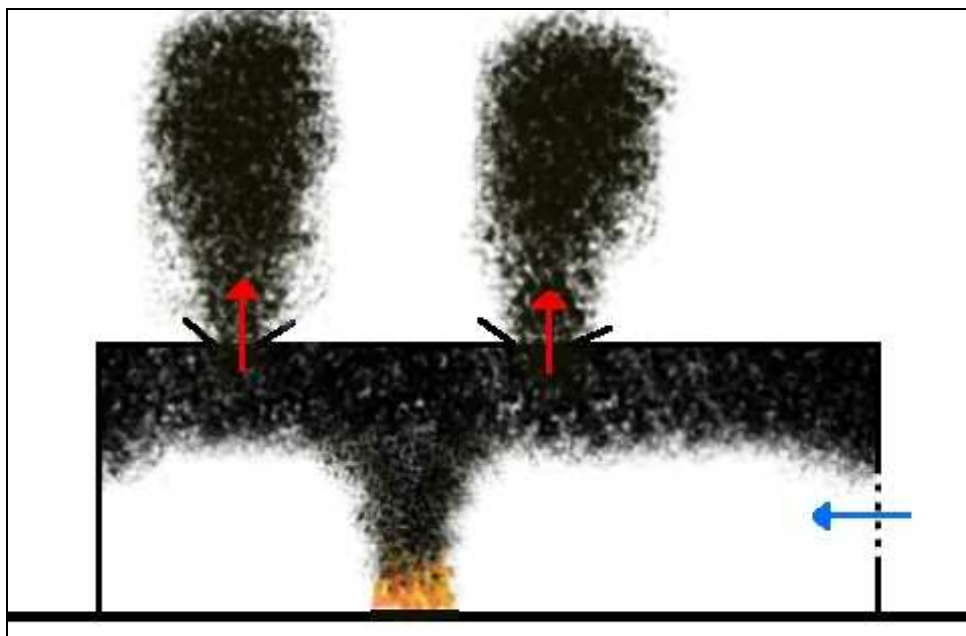


Figuur 1.26

Invloed oppervlak dakopening op brandvermogen

1.2.8 Rook- & warmteafvoer

In tegenstelling tot de meeste brandveiligheidsinstallaties kan de invloed van een RWA systeem worden berekend. Bij een RWA systeem zorgen rookluiken of –ventilatoren voor de afvoer van de bij de brand geproduceerde rook. Daarnaast stroomt verse lucht via gevelroosters de ruimte in. De werking van een RWA systeem met rookluiken is weergegeven in figuur 1.27.



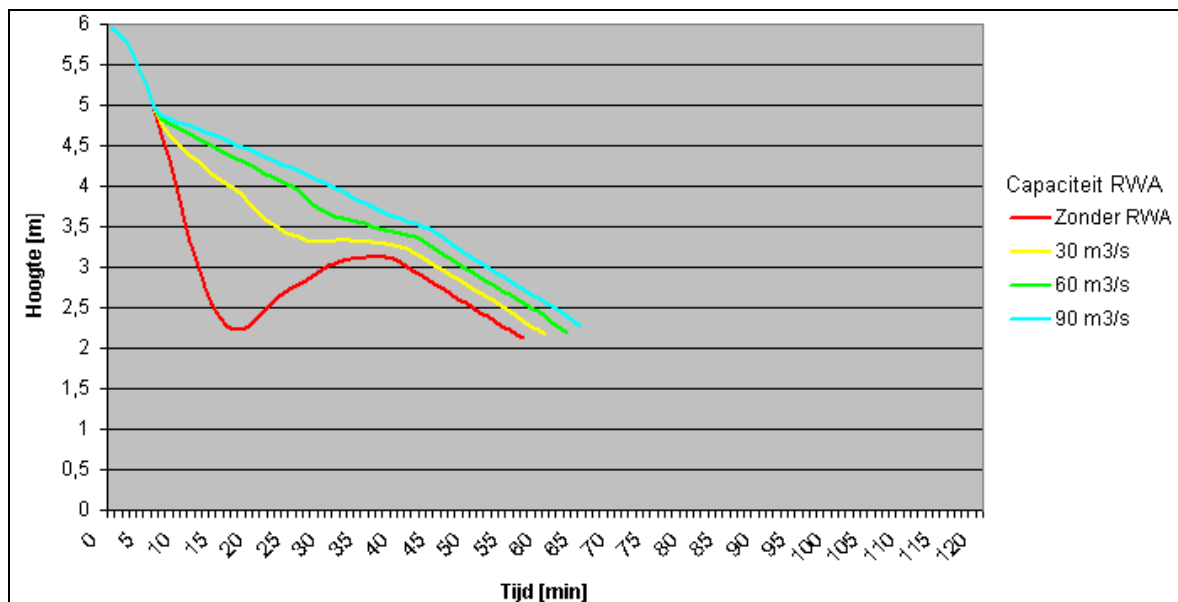
Figuur 1.27

De RWA installatie zal de hete rookgassen afvoeren en koude buitenlucht aanzuigen.

Werking RWA. Bij brand worden luiken in het dak geopend waardoor rook de ruimte uitstroomt. Ter hoogte van de blauwe pijl komt verse lucht via roosters de ruimte in.

Onderzocht is wat de invloed is van RWA systemen met verschillende capaciteiten op de ontwikkeling van de hete rooklaag. Uit figuur I.28 blijkt dat zonder RWA systeem de hete laag snel dikker wordt tot het moment dat de ramen in de gevel breken. Hierna stroomt een deel van de rook weg. Na ca. 40 minuten begint de rooklaag weer dikker te worden. Dit komt doordat de brand vanaf dat moment meer rook produceert dan dat er via de ramen kan wegstromen. Bij de toepassing van een RWA systeem wordt een groot deel van de rook afgevoerd. Daarnaast zal ook de flashover later optreden dan in een situatie zonder RWA systeem. Dit komt doordat een deel van de rook en warmte wordt afgevoerd.

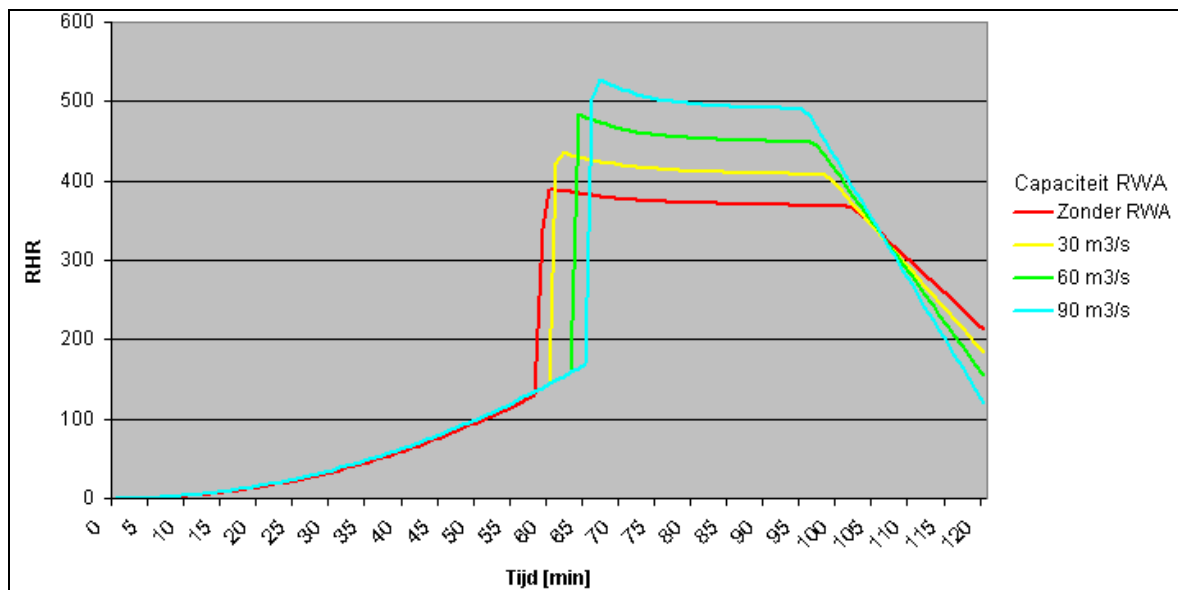
Toch is de capaciteit van RWA systemen onvoldoende om alle rook af te voeren die bij de brand geproduceerd wordt. Dit is apart aangezien er uit een berekening aan de hand van het vultijdenmodel volgt dat er bij een capaciteit van $60 \text{ m}^3/\text{s}$ gedurende de eerste 20 minuten van de brand meer rook kan worden afgevoerd dan dat er wordt geproduceerd bij de brand. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het fysisch brandmodel of het vultijdenmodel niet goed met de invloed van het RWA systeem kan rekenen. Hier zou verder onderzoek naar kunnen worden uitgevoerd.



Figuur I.28

Invloed RWA systeem op hoogte rooklaag

Naast de invloed op de dikte van de hete rooklaag heeft een RWA systeem ook invloed op het brandvermogen en de temperatuurontwikkeling in de ruimte. Doordat het RWA systeem verse lucht via roosters in de gevel toevoert, kan de brand feller branden. Naarmate de capaciteit van het RWA systeem groter wordt, zal ook het brandvermogen hoger worden. Dit is weergegeven in figuur I.29.

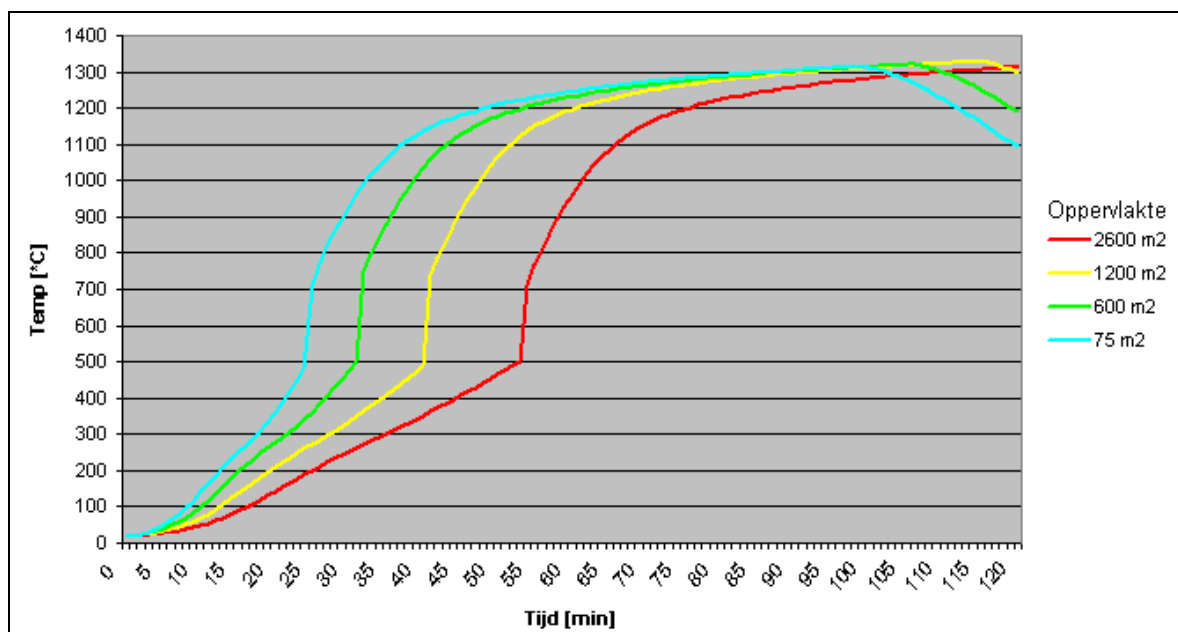


Figuur 7.29

Invloed RWA systeem op brandvermogen.

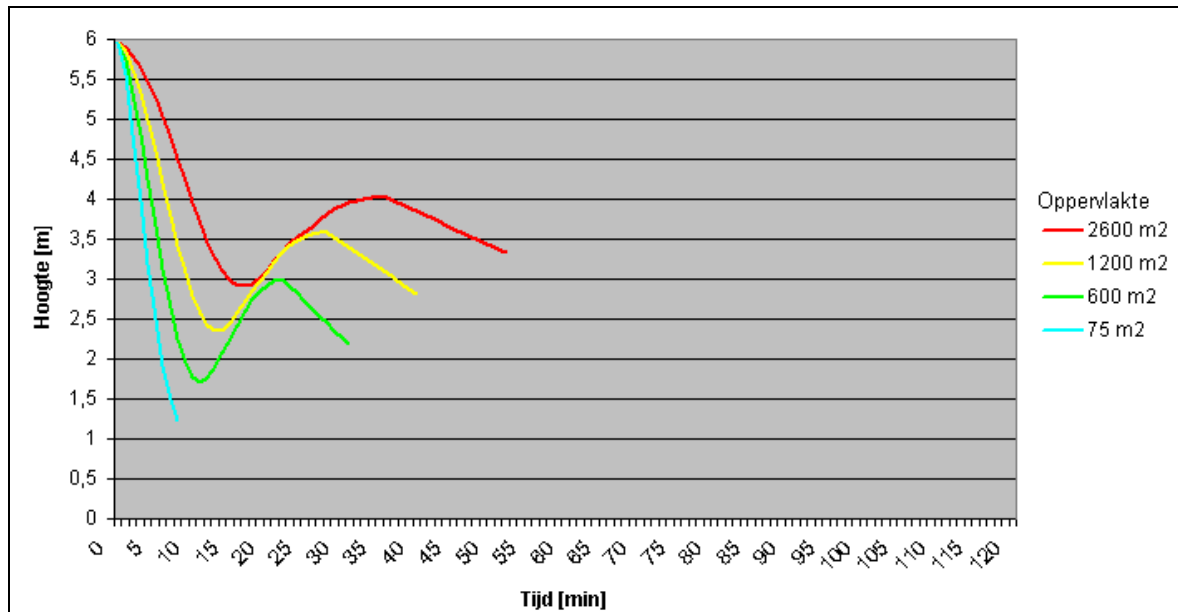
1.2.9 Invloed omvang brandruimte

De omvang van de brandruimte is voornamelijk van invloed op de snelheid waarmee de brand ontwikkelt en het moment waarop flashover optreedt. Zoals uit figuur I.30 blijkt zal een brand zich sneller ontwikkelen in een kleine ruimte dan in een grote ruimte. Dit komt doordat in een kleine ruimte de hete laag zich sneller zal opbouwen, zoals weergegeven in figuur I.31. Door de snelle opbouw zal ook de temperatuur snel stijgen. De warmte kan zich immers niet verspreiden over de ruimte.



Figuur I.30

Invloed omvang brandruimte op temperatuurverloop.



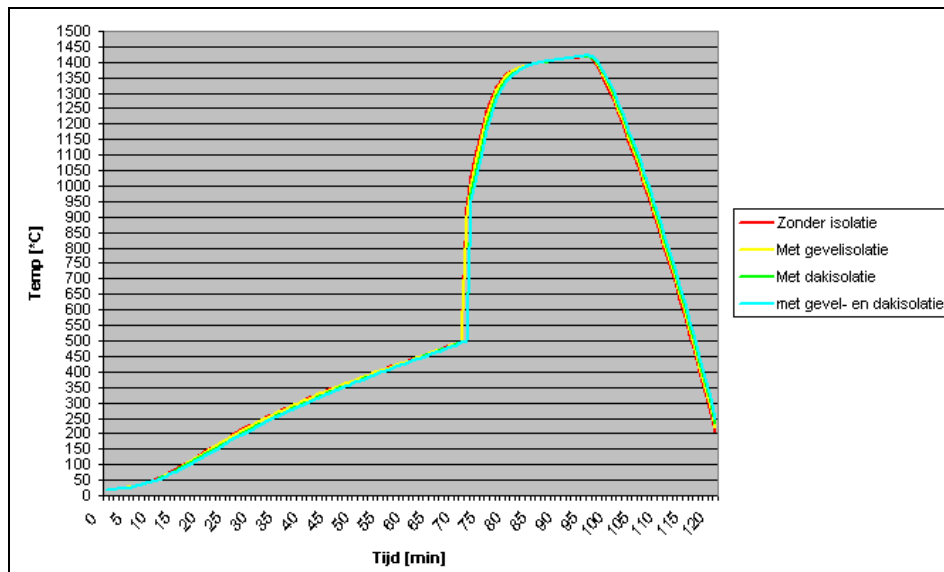
Figuur I.31

Invloed omvang brandruimte op opbouw hete laag.

I.2.10 Invloed omhulling ruimte

De omhulling van de brandruimte heeft een zeer beperkte invloed op het brandverloop. Bij geïsoleerde wanden en daken zal warmte minder snel door de constructie stromen dan bij ongeïsoleerde wanden en daken. Hierdoor zal de warmtestroom door de constructie lager zijn, waardoor er minder energie verloren gaat uit de brandruimte. Dit heeft als gevolg dat de temperatuur hoger is dan in een ongeïsoleerde ruimte. Bovendien zal een ongeïsoleerde constructie de hete laag meer afkoelen dan een geïsoleerde constructie, omdat de temperatuur in de constructie lager zal zijn als energie gemakkelijk wegstroomt. Bij een geïsoleerde constructie zal de warmte in de constructie blijven 'hangen', waardoor deze een zelfde temperatuur krijgt als de rooklaag. Hierdoor treedt er geen afkoeling op, waardoor flashover eerder optreedt.

In figuur I.32 is onderzocht wat de invloed is van een geïsoleerd dak en / of geïsoleerde wand in vergelijking met een ongeïsoleerde brandruimte. Het verschil tussen de temperatuur in een geïsoleerde en een ongeïsoleerde ruimte is echter beperkt. Zo is er amper verschil tussen de brandontwikkelingen in de verschillende ruimten.



Figuur I.32

Invloed omhulling op brandverloop.

Bijlage II

Constructieve berekening

II.1 Constructieve berekeningen aan de hand van de Eurocode 1

Aan de hand van de Eurocodes is een staalconstructie van een project getoetst op weerstand tegen bezwijken bij brand. Het project betreft een industriële hal in Vianen. De hal heeft een vloeroppervlak van 2.600 m². In bijlage III zijn bouwkundige en constructieve tekeningen opgenomen van het project.

De industriële hal betreft een bestaand gebouw waar een nieuw bedrijf in wordt gevestigd. Dit bedrijf zal gespecialiseerd zijn in de opslag en bewerking van autobanden. Het gebouw zal dan ook grotendeels dienen als opslag voor autobanden. De gebouwbeheerder heeft aangegeven dat er maximaal 14.000 banden in het bedrijf aanwezig zullen zijn. Deze banden worden over een oppervlak van 260 m² opgeslagen in stapels met een oppervlak van elk 9 m². Deze stapels zijn van elkaar gescheiden door een open ruimte, zoals is vereist in de Handleiding Opslag Autobanden.

Door de beperkte afstand tussen de aangrenzende panden dient de omhulling van de hal een brandwerendheid van 60 minuten te hebben. De hoofddraagconstructie, die deze omhulling draagt, dient daarom ook 60 minuten brandwerendheid met betrekking tot bezwijken te bieden bij brand.

De hoofddraagconstructie is op twee brandscenario's getoetst. Ten eerste is er gerekend met een lokale brand die beperkt blijft tot een enkele stapel banden. Conform de Handleiding Opslag Autobanden worden de banden opgeslagen in kleine stapels die van elkaar gescheiden zijn door een open ruimte. Hierdoor is de kans beperkt dat de brand uitgroeit over meerdere stapels. Dit scenario gaat er dan ook vanuit dat de brand niet verder uitgroeit.

Het tweede scenario betreft een volledig ontwikkelde brand waarbij alle bandenstapels in de hal in brand zullen vliegen. Verondersteld wordt dat in dit scenario de uitgangspunten van de Handleiding Opslag Autobanden er niet in hebben geslaagd de brand beperkt te houden tot één enkele stapel banden.

II.1.1 Gehanteerde gegevens

In de berekening van het fysisch brandmodel zijn de volgende gegevens gehanteerd:

- Bouwkundige en constructieve tekeningen zoals opgenomen in bijlage III.
- Branduitbreidingssnelheid: 300 seconde.
- Brandvermogen: 1.500 kW/m².
- Vuurlast: 13.481 MJ/m²
- brandveiligheidsvoorzieningen:
 - overheidsbrandweer|
 - rookdetectie|
 - warmtedetectie|
 - automatische doormelding aan brandweer|
 - rook- en warmteafvoer.

II.1.2 Berekening constructie

De toetsing van de staalconstructie is uitgevoerd in het programma Ozone (versie 2.2.6). Dit programma berekent aan de hand van de dimensies en de belastingen op een constructie-element de kritische staaltemperatuur in een ligger of een kolom. Deze temperatuur wordt vervolgens getoetst aan de optredende staaltemperatuur in de constructie. De optredende staaltemperatuur in de constructie wordt in Ozone berekend aan de hand van het fysisch brandmodel. De toetsingsmethode is uitgevoerd conform de nieuwe Eurocodes.

In de berekening zijn de belastingen op de constructie en de dimensies van de constructie van belang. De dimensies zijn bepaald aan de hand van de tekeningen als weergegeven in bijlage 3. Voor de permanente belastingen op het dak en de gevel zijn de volgende lasten gehanteerd:

Eigen gewicht dakconstructie:

Cellenbeton (150mm):	1,07	kN/m ²	
Bitumen	0,07	kN/m ²	
Installaties	0,10	kN/m ²	+
Totaal P-last	1,24	kN/m²	

Eigen gewicht gevel:

Cellenbeton (150mm):	1,07	kN/m ²
----------------------	------	-------------------

Aan de hand van de permanente belasting per m² zijn de permanente q-lasten op de liggers berekend en de belasting op de kolommen. Deze zijn weergegeven in de onderstaande tabellen.

Tabel II.1

Belastingen liggers dak

	<i>Lengte</i>	<i>h.o.h. liggers</i>	<i>q_{dak}</i>	<i>Eigengewicht ligger</i>	<i>q_{tot}</i>
Ligger L3: IPE 330	12,91 m	3,85 m	4,77 kN/m ¹	0,491 kN/m ¹	5,27 kN/m ¹
Ligger L2: IPE 360	7,69 m	12,91 m	16,01 kN/m ¹	0,571 kN/m ¹	16,58 kN/m ¹

Tabel II.2

Belastingen liggers gevel

	<i>Lengte</i>	<i>0,5*hoogte gevel</i>	<i>q_{gevel}</i>	<i>Eigengewicht ligger</i>	<i>q_{tot}</i>
Ligger L1: HE 160A	6,45 m	3 m	3,21 kN/m ¹	0,304 kN/m ¹	3,52 kN/m ¹
Ligger L5: HE 120A	3,85 m	3 m	3,21 kN/m ¹	0,199 kN/m ¹	3,41 kN/m ¹

Tabel II.3

Belastingen kolommen hoofddraagconstructie

	<i>Hoogte</i>	<i>Dragend opp</i>	<i>F_{dak}</i>	<i>Eigengewicht kolom</i>	<i>F_{tot}</i>
Kolom K1: HE 160A	4,7 m	49,64 m ²	61,55 kN	1,43 kN	62,98 kN
Kolom K2: HE 140A	4,7 m	49,64 m ²	61,55 kN	1,16 kN	62,71 kN
Kolom K3: HE 180A	4,7 m	99,3 m ²	123,1 kN	1,67 kN	124,80 kN

De constructie wordt getoetst op weerstand tegen bezwijken bij brand. Aangezien brand een bijzondere belastingscombinatie is, zijn de standaard belastingcombinaties niet van toepassing.

Conform de NEN 6702 is bepaald dat de correctiefactor voor de permanente belasting 1,0 bedraagt en er geen variabele belasting op het dak en op de gevel hoeft te worden verondersteld. De gehanteerde belastingcombinatie is dan ook:

$$q_d = 1,0 * q_p + 0,0 * q_v$$

II.2 Brandwerendheid met betrekking tot bezwijken hoofddraagconstructie

II.2.1 Brandwerendheid met betrekking tot bezwijken berekend conform standaard brandkromme

Voor de vergelijking van de resultaten die volgen uit een toetsing aan de hand van het fysisch brandmodel, is eerst conform de huidige regelgeving getoetst. Deze toetsing is uitgevoerd aan de hand van Brawesta. Dit programma berekent de weerstand tegen bezwijken aan de hand van de standaard brandkromme. Zoals weergegeven in tabel II.4 is de weerstand tegen bezwijken van de staalconstructie zonder bescherming maximaal 13 minuten. Voor de benodigde weerstand tegen bezwijken van 60 minuten zal de gehele hoofddraagconstructie brandwerend worden bekleed.

Tabel II.4

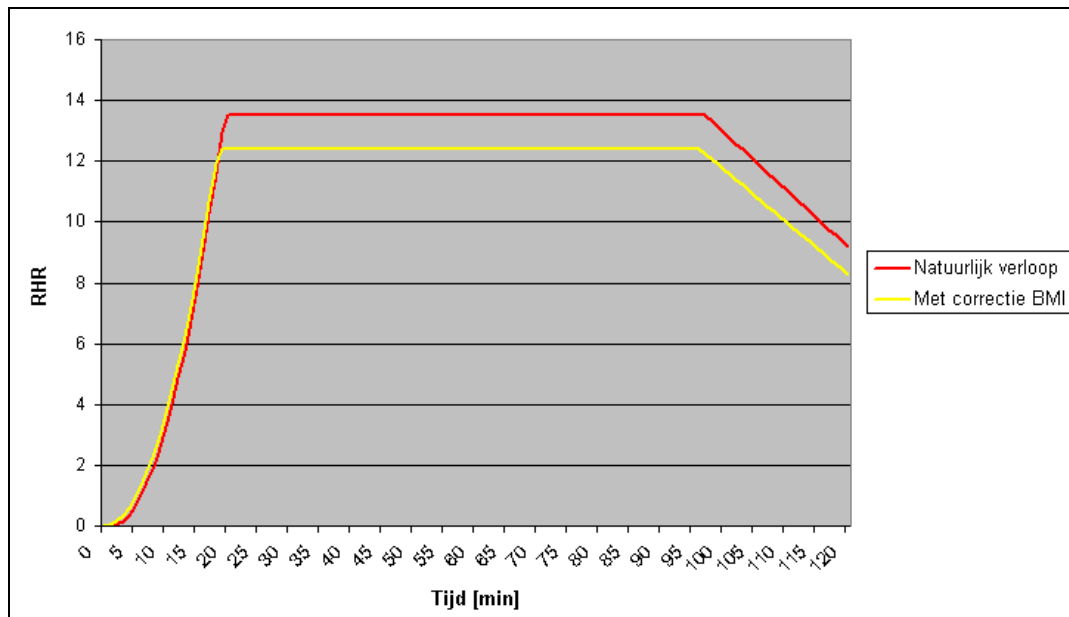
Brandwerendheid met betrekking tot bezwijken berekent conform standaard brandkromme

<i>Element</i>	<i>brandwerendheid onbeschermd</i>
L3 IPE 330	15 Min
L2 IPE 360	13 Min
L1 HE 160A	15 Min
L5 HE 120A	19 Min
K1 HE 160A	27 Min
K2 HE 140A	23 Min
K3 HE 180A	20 Min

II.2.2 Scenario 1, lokale brand in bandenstapel

In dit scenario wordt uitgegaan van een lokale brand in een enkele stapel banden. Conform de Handleiding Opslag Autobanden worden de banden in het bedrijf opgeslagen in meerdere stapels van elk 9 m². Tussen deze stapels bevindt zich 3 m open ruimte. Hierdoor is de kans groot dat de brand beperkt blijft tot een enkele stapel banden.

De brand is aan de hand van het fysisch brandmodel op twee manieren berekend. Ten eerste is er berekend hoe de brand zich op een natuurlijke wijze zal ontwikkelen zonder de invloed van correctiefactoren. Daarnaast is het brandverloop herberekend met de invloed van de correctiefactor voor een brandmeldinstallatie met rook- en warmtedetectie en automatische doormelding naar de brandweer. Het brandvermogen van de ongecorrigeerde brand en de gecorrigeerde brand zijn weergegeven in figuur II.1. In tabel II.5 zijn de maximale temperaturen in de rooklaag en boven de brandhaard weergegeven voor beide berekeningen.



Figuur II.1

Ontwikkeling brandvermogen bij brand in een enkele bandenstapel

Uit figuur II.1 valt af te lezen dat de brand zich gedurende de eerste 20 minuten ontwikkelt. Na 20 minuten staat de gehele stapel banden in brand. Na 100 minuten is het merendeel van het rubber in de banden opgebrand en treed de dooffase in. In deze fase neemt het brandvermogen gestaag af totdat de brand volledig uitgedoofd is. Uit de maximale temperaturen als weergegeven in tabel II.5 valt op te merken dat de temperatuur bij de toepassing van een brandmeldinstallatie beperkt blijft tot 646°C.

Tabel II.5

Maximale temperatuur brandruimte

	<i>Natuurlijk verloop</i>	<i>Gecorrigeerde brand</i>
Boven brandhaard (Hasemi)	661 °C	646 °C
Hete laag (zonemodel)	202 °C	194 °C

Berekend is dat de minimale kritische staaltemperatuur 657°C bedraagt, zie tabel II.6. Aangezien de kritische temperatuur hoger ligt dan de optredende staaltemperatuur tijdens de brand, voldoet de staalconstructie aan een weerstand tegen bezwijken van 120 minuten. Indien er geen brandmeldinstallatie zou worden toegepast bedraagt de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken echter nog maar 19 minuten.

Tabel II.6

Brandwerendheid constructie ter hoogte opslag banden

<i>Element</i>	<i>Kritische staaltemperatuur</i>	<i>Brandwerendheid onbeschermd</i>	<i>Brandwerendheid met BMI</i>
L3 IPE 330	685 °C	120 Min	120 Min
L2 IPE 360	657 °C	19 Min	120 Min
L1 HE 160A	771 °C	120 Min	120 Min
L5 HE 120A	814 °C	120 Min	120 Min
K1 HE 160A	880 °C	120 Min	120 Min
K2 HE 140A	848 °C	120 Min	120 Min
K3 HE 180A	793 °C	120 Min	120 Min

II.2.3 Scenario 2, compartimentbrand

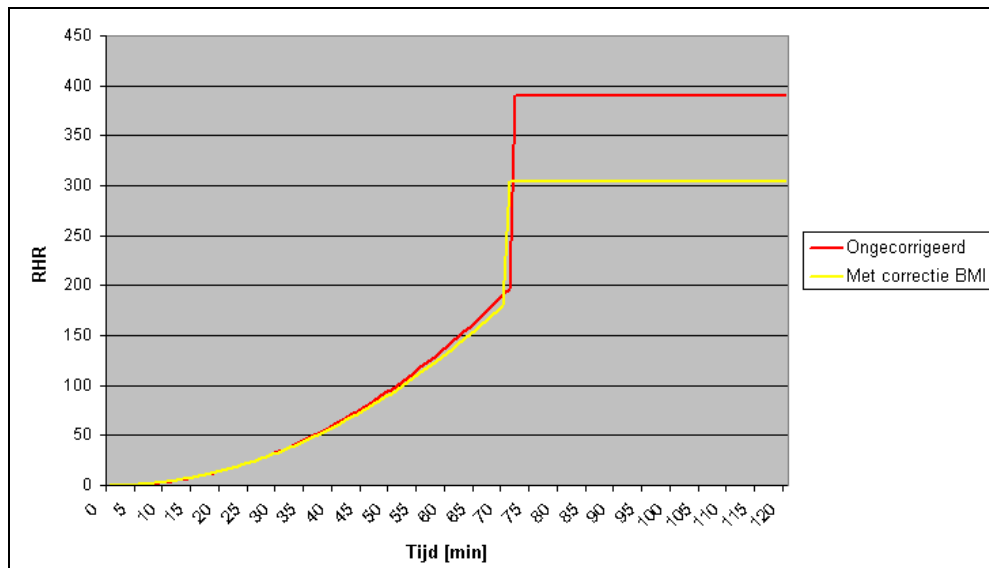
In dit scenario wordt uitgegaan van een volledig ontwikkelde brand in de hal. Er wordt verondersteld dat de veiligheidsmaatregelen uit de Handleiding Opslag Autobanden falen en dat de brand zich uitbreidt over alle stapels banden.

In dit scenario is de brand op drie manieren berekend:

- brandverloop zonder correctiefactoren;
- brandverloop met correctie van BMI met rook- en warmtedetectie en automatische doormelding;
- brandverloop met correctie van BMI met rook- en warmtedetectie en automatische doormelding en invloed van RWA systeem;

In dit scenario is de invloed van een RWA systeem apart berekend. Dit is gedaan aangezien zich in het dak diverse lichtstraten van polycarbonaat bevinden. Deze lichtstraten zullen bij een temperatuur van ca. 200°C wegsmelten. In combinatie met het breken van het glas in de ramen zal de rook via de dakopeningen wegstromen en komt verse lucht de ruimte binnen via de gebroken ramen. Hierdoor ontstaat een situatie die in principe het zelfde doet als een RWA systeem, namelijk de rook afvoeren.

Aan de hand van Ozone is berekend dat een brand in de bandenopslag zich gedurende de eerste 70 minuten ontwikkelt. Hierna treedt flashover op en staan alle in de ruimte aanwezige materialen in brand. Na 140 minuten is de meeste brandstof in de ruimte verbrand en treedt de dooffase in. Het brandvermogen zal hierna gestaag afnemen. Deze ontwikkeling van de brand is weergegeven in figuur II.2.



Figuur II.2

Ontwikkeling brandvermogen bij compartimentbrand

In tabel II.7 zijn de temperaturen weergegeven die optreden in de ruimte. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de temperaturen die optreden in de hete rooklaag en direct boven de brandhaard.

Tabel II.7

Maximale temperatuur brandruimte

	Temp zonder BMI	Temp met BMI	Temp met BMI & RWA
Boven brandhaard (Hasemi)	839 °C	831 °C	831 °C
Hete laag (zonemodel)	705 °C	619 °C	603 °C

De berekende kritische staaltemperaturen zijn weergegeven in tabel II.8 en II.9. Uit deze tabellen kan geconcludeerd worden dat alleen de constructie boven de brandhaard onvoldoende weerstand tegen bezwijken biedt bij brand. Dit deel van de constructie zal dan ook bij de toepassing van een BMI moeten worden bekleed met brandwerend materiaal. Daarnaast kan uit de resultaten van tabel II.8 t/m II.9 worden geconcludeerd dat een RWA systeem geen invloed heeft op de brandontwikkeling in de ruimte. De invloed van de smeltende lichtstraten is al voldoende om een groot deel van de rook af te voeren.

Tabel II.8

Brandwerendheid constructie ter hoogte van bandenopslag

<i>Element</i>	<i>Kritische staaltemperatuur</i>	<i>Brandwerendheid onbeschermd</i>	<i>Brandwerendheid met BMI</i>	<i>Brandwerendheid met BMI & RWA</i>
L3 IPE 330	685 °C	21 Min	30 Min	30 Min
L2 IPE 360	657 °C	19 Min	26 Min	26 Min
L1 HE 160A	771 °C	30 Min	48 Min	48 Min
L5 HE 120A	814 °C	33 Min	62 Min	62 Min
K1 HE 160A	880 °C	120 Min	120 Min	120 Min
K2 HE 140A	848 °C	120 Min	120 Min	120 Min
K3 HE 180A	793 °C	30 Min	51 Min	51 Min

Tabel II.9

Brandwerendheid constructie rest van loods

<i>Element</i>	<i>Kritische staaltemperatuur</i>	<i>Brandwerendheid onbeschermd</i>	<i>Brandwerendheid met BMI</i>	<i>Brandwerendheid met BMI & RWA</i>
L3 IPE 330	685 °C	71 Min	120 Min	120 Min
L2 IPE 360	657 °C	70 Min	120 Min	120 Min
L1 HE 160A	771 °C	120 Min	120 Min	120 Min
L5 HE 120A	814 °C	120 Min	120 Min	120 Min
K1 HE 160A	880 °C	120 Min	120 Min	120 Min
K2 HE 140A	848 °C	120 Min	120 Min	120 Min
K3 HE 180A	793 °C	120 Min	120 Min	120 Min

II.2.4 Resultaten

De brandwerendheid met betrekking tot bezwijken bij brand van de hoofddraagconstructie is bepaald in twee scenario's. In het eerste scenario is uitgegaan van een lokale brand in een enkele stapel banden. Er wordt verondersteld dat de brand zich in dit scenario niet verder uitbreidt in het compartiment en beperkt blijft tot een enkele stapel brandende banden.

In het tweede scenario wordt uitgegaan van een volledig ontwikkelde brand waarin het gehele brandcompartiment in brand zal vliegen. Alle in het compartiment aanwezige banden zullen in dit scenario bijdragen aan de brand.

II.2.4.1 Benodigde voorzieningen bij scenario1, lokale brand

In dit scenario is de brandontwikkeling dusdanig beperkt dat de hoofddraagconstructie voldoende brandwerendheid met betrekking tot bezwijken biedt. Er is dan ook geen brandwerende bekleding noodzakelijk. Dit in tegenstelling tot de berekening conform de standaard brandkromme, waar de gehele hoofddraagconstructie brandwerend bekleed dient te worden. Doordat er geen brandwerende bekleding noodzakelijk is kan er ca. € 45.000,- bespaard worden.

Wel dient de hal te worden voorzien van een brandmeldinstallatie met volledige bewaking en automatische doormelding naar de brandweer. Deze brandmeldinstallatie is dus uitgebreider dan de niet-automatische brandmeldinstallatie (alleen handmelders, slow whoop en geen doormelding naar brandweer) die vanuit het gebruiksbesluit vereist is. Daarnaast zal de berekening aan de hand van het fysisch brandmodel meer kosten dan een berekening aan de hand van het huidige model. De meerkosten van deze berekening worden geraamd op ca. € 3.500,-. Ondanks de aanzienlijk hogere kosten van de uitgebreidere brandmeldinstallatie en de meerkosten van het advies levert een berekening conform het fysisch brandmodel een besparing op van ca. € 24.000,-.

Als er met een natuurlijke brand wordt gerekend zonder de invloed van correctiefactoren dan hoven in dit scenario alleen de dakliggers L3 langs as 3 t/m 6 tussen A en C brandwerend bekleed te worden. Ook is in dit scenario geen BMI met automatische doormelding noodzakelijk. Hiermee kan ca. € 23.000 euro bespaard worden ten opzichte van een berekening aan de hand van de standaard brandkromme. Een vergelijking van de kosten is opgenomen in tabel II.9.

II.2.4.2 Benodigde voorzieningen bij scenario 2, compartimentbrand

In dit scenario zal de brand uitgroeien tot een volledige compartimentbrand. Door de locale vuurlast van de bandenopslag zal slechts een beperkt deel van de hoofddraagconstructie onvoldoende brandwerendheid met betrekking tot bezwijken bieden. Dit deel van de hoofddraagconstructie bevindt zich boven de bandenopslag en omvat:

- de dakliggers L3 langs as 3 t/m 6 tussen as A en C;
- de dakligger L2 langs as B tussen as 3 en 6;
- de dakligger L2 langs as C tussen as 1 en 6;
- de ligger L5 langs as A tussen as 3 en 6;
- de ligger L1 langs as 1 tussen as B en C;
- de kolommen K2 langs as A tussen as 3 en 6;
- de kolommen K3 langs as B en C tussen as 2 en 6.

Deze constructie-elementen moeten brandwerend worden afgewerkt voor voldoende weerstand tegen bezwijken. De kosten van de brandwerende bekleding worden in dit scenario geraamd op ca. € 18.000,-. Uit de vergelijking in tabel II.9 kan worden geconcludeerd dat er in dit scenario ca. € 24.000,- kan worden bespaard.

Tabel II.9

Vergelijking kosten brandwerende voorzienigen hal

Gehanteerde gegevens

brandwerende bekleding: <i>Promatect 30S</i>	€ 25,00 /m2
Kosten timmerman:	€ 40,00 /h
Arbeidsnorm:	0,5 h/m2

Bendodigde voorzieningen bij berekening conform Scenario 1 (met BMI met automatische doormelding)

Constructie element	aantal	opp/element	totaal opp	kosten materiaal	benodigde manuren	kosten bekleden
N.V.T.	-	- m2	- m2	-	-	-
BMI (volledige bewaking en auto doormelding)	€ 23.000,00					
Martiaalkosten:	€ 0,00					
Kosten bekleden:	€ 0,00					
Marge 10%	€ 0,00					
Meerkosten advies	€ 3.500,00					
Totaal kosten:	€ 26.500,00					

Bendodigde voorzieningen bij berekening conform Scenario 1 (met brandwerende bekleding)

Constructie element	aantal	opp/element	totaal opp	kosten materiaal	benodigde manuren	kosten bekleden
Ligger L3, IPE 330	19	11,0 m2	209,0 m2	€ 5.225,00	104,5	€ 4.180,00
BMI (niet automatisch & geen doormelding)	€ 5.000,00					
Martiaalkosten:	€ 5.225,00					
Kosten bekleden:	€ 4.180,00					
Marge 10%	€ 1.881,00					
Meerkosten advies	€ 3.500,00					
Totaal kosten:	€ 19.786,00					

Bendodigde voorzieningen bij berekening conform Scenario 2

Constructie element	aantal	opp/element	totaal opp	kosten materiaal	benodigde manuren	kosten bekleden
Kolom K3, HE 180A	9	3,6 m2	32,4 m2	€ 810,00	16,2	€ 648,00
Ligger L1, HE 160A	2	2,0 m2	4,1 m2	€ 101,50	2,0	€ 81,20
Ligger L2, IPE 360	10	7,8 m2	77,5 m2	€ 1.938,00	38,8	€ 1.550,40
Ligger L3, IPE 330	19	11,0 m2	209,0 m2	€ 5.225,00	104,5	€ 4.180,00
Ligger L5, HE 120A	6	0,9 m2	5,4 m2	€ 135,00	2,7	€ 108,00
BMI (niet automatisch & geen doormelding)	€ 5.000,00					
Martiaalkosten:	€ 8.209,50					
Kosten bekleden:	€ 6.567,60					
Marge 10%	€ 2.955,42					
Meerkosten advies	€ 3.500,00					
Totaal kosten:	€ 26.232,52					

Bendodigde voorzieningen bij berekening conform standaard brandkromme

Constructie element	aantal	opp/element	totaal opp	kosten materiaal	benodigde manuren	kosten bekleden
Kolom K1, HE 160A	10	2,2 m2	21,8 m2	€ 545,00	10,9	€ 436,00
Kolom K2, HE 140A	32	1,9 m2	61,1 m2	€ 1.528,00	30,6	€ 1.222,40
Kolom K3, HE 180A	16	3,6 m2	57,6 m2	€ 1.440,00	28,8	€ 1.152,00
Ligger L1, HE 160A	12	2,0 m2	24,4 m2	€ 609,00	12,2	€ 487,20
Ligger L2, IPE 360	16	7,8 m2	124,0 m2	€ 3.100,80	62,0	€ 2.480,64
Ligger L3, IPE 330	48	11,0 m2	528,0 m2	€ 13.200,00	264,0	€ 10.560,00
Ligger L5, HE 120A	30	0,9 m2	27,0 m2	€ 675,00	13,5	€ 540,00
BMI (niet automatisch & geen doormelding)	€ 5.000,00					
Martiaalkosten:	€ 21.097,80					
Kosten bekleden:	€ 16.878,24					
Marge 10%	€ 7.595,21					
Totaal kosten:	€ 50.571,25					

Bijlage III
Tekeningen

Bijlage IV

Berekening risicobenadering

Voor het onderzoek naar het veilig vluchten uit een brandruimte en de toepassing van de risicobenadering op veilig vluchten is een voorbeeld project toegepast. In tegenstelling tot de toetsing van de constructie is voor dit onderzoek geen gebruik gemaakt van een industrieel gebouw. Dit aangezien er in een industriefunctie, met bezettingsgraadklasse B5, onvoldoende mensen aanwezig zijn voor een interessante risicobenadering. In een industrieel gebouw zullen de condities over het algemeen dusdanig langzaam verslechteren dat de beperkte hoeveelheid aanwezigen ruim op tijd het pand kan verlaten.

Berekend is of de dancing, ondanks een beperkte totale deurbreedte, toch veilig ontruimd kan worden. Tevens is berekend wat het risico is voor de aanwezigen als er een of meerdere uitgangen geblokkeerd zijn.

IV.1 Gehanteerde gegevens

Voor dit project is er dan ook gerekend met een kleine dancing van 450 m². De tekeningen van dit gebouw zijn opgenomen in bijlage III. De dancing heeft bezettingsgraadklasse B1, wat betekent dat er, bij maximale bezetting, 563 mensen aanwezig zullen zijn in het gebouw.

Uit het Bouwbesluit volgt dat de dancing een totale deurbreedte van 6.200 mm (hoofduitgang plus nooduitgangen) dient te beschikken om in geval van brand de ruimte voldoende snel te ontruimen. De dancing beschikt daarentegen maar over 4.150 mm aan totale deurbreedte.

IV.2 Scenario's

Er zijn diverse scenario's denkbaar waarbij de aanwezigen in de dancing door brand bedreigd kunnen worden. Zo kan gedacht worden aan geblokkeerde vluchtroutes een zeer snelle brandontwikkeling of een grotere bezetting dan aangenomen in de dancing. Aangezien veel statistische informatie rond dit onderwerp niet aanwezig is, heeft het onderzoek zich beperkt tot scenario's met betrekking tot geblokkeerde vluchtroutes. Scenario's met een snelle brandontwikkeling of een hogere bezetting kunnen echter op dezelfde wijze worden berekend.

In de dancing zijn drie nooduitgangen en één hoofduitgang. Aangenomen is dat altijd via minimaal één nooduitgang gevlucht kan worden. De onderzochte scenario's zijn weergegeven in tabel IV.1

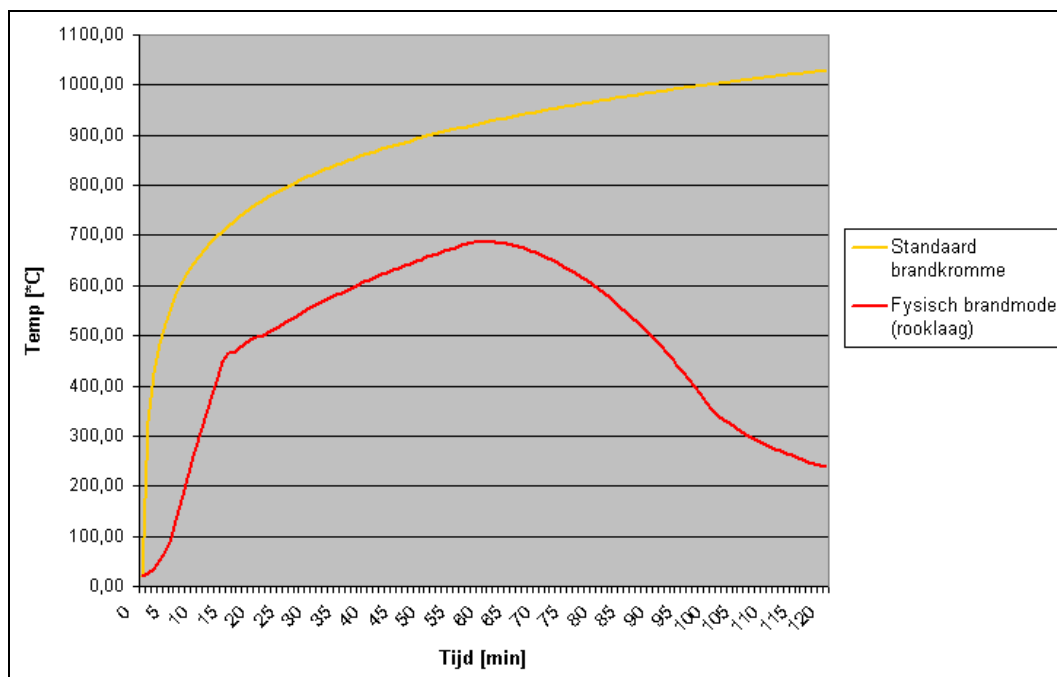
Tabel IV.1

Onderzochte scenario's

Scenario nummer	Brand bij hoofdingang	Nooduitgang 1 geblokkeerd	Nooduitgang 2 geblokkeerd
Scenario 1	Nee	Nee	Nee
Scenario 2	Ja	Nee	Nee
Scenario 3	Ja	Ja	Nee
Scenario 4	Ja	Ja	Ja
Scenario 5	Nee	Ja	Ja
Scenario 6	Nee	Nee	Nee
Scenario 7	Nee	Nee	Ja
Scenario 8	Nee	Ja	Nee

IV.3 Brandontwikkeling dancing

Ter beoordeling van de risico van de aanwezigen in de dancing bij brand is de brandontwikkeling in de ruimte berekend. De brandontwikkeling in de ruimte is berekend aan de hand van het fysisch brandmodel. In figuur IV.1 is de brandontwikkeling in de ruimte weergegeven. Ter vergelijking met de huidige regelgeving is ook het brandverloop conform de standaard brandkromme weergegeven.



Figuur IV.1
Brandontwikkeling in Dancing

Voor de dancing is gerekend met een snel ontwikkelende brand die zich binnen 150 seconde ontwikkelt tot brand met een vermogen van 1 MW. Voor de brand zijn een maximaal brandvermogen van 500 kW/m² gehanteerd en een vuurlast van 365 MJ/m².

Aan de hand van het fysisch brandmodel is berekend hoe de temperatuur in de hete zone, de dikte van de rooklaag en de zichtlengte zich ontwikkelen in de ruimte, ter bepaling van de maximaal beschikbare vluchttijd. Als grens voor de maximaal beschikbare vluchttijd worden de volgende condities in de brandruimte als grenswaarde gehanteerd:

- temperatuur hete zone (rooklaag) meer dan 200°C;
- hoogte rooklaag minder dan 2,5 m;
- zicht voor lichtgevende voorwerpen in de ruimte minder dan 30 m.

In tabel IV.2 zijn de ontwikkelingen van deze condities weergegeven. Uit deze tabel kan geconcludeerd worden dat na 3 minuten de rooklaag onder de 2,5 m daalt. De maximaal beschikbare vluchttijd in de dancing bedraagt dan ook 3 minuten.

Tabel IV.2

Kansen per scenario

Tijd [min]	Temperatuur hete zone	Hoogte rooklaag	Zichtlengte lichtgevende voorwerpen (in rook)	Zichtlengte lichtgevende voorwerpen (koude zone)
0	20,0 °C	4,0 m	158,1 m	- m
1	24,8 °C	3,7 m	90,0 m	- m
2	36,0 °C	3,2 m	62,1 m	6816,5 m
3	51,3 °C	2,5 m	43,9 m	1971,5 m
4	71,2 °C	1,7 m	30,3 m	394,9 m
5	97,4 °C	1,0 m	20,6 m	61,6 m
6	131,6 °C	0,7 m	10,8 m	10,8 m
7	172,6 °C	0,5 m	3,4 m	3,4 m
8	216,3 °C	0,5 m	2,3 m	2,3 m
9	257,8 °C	0,6 m	2,1 m	2,1 m
10	296,8 °C	0,6 m	1,8 m	1,8 m

IV.4 Berekening persoonlijk risico

Onder het persoonlijk risico wordt de kans verstaan dat iemand overlijdt ten gevolge van een bepaald scenario. Het persoonlijk risico wordt bepaald aan de hand van twee kansen. Ten eerste is de kans dat een scenario zich voordoet van belang. Hierbij kan gedacht worden aan de kans dat er brand uitbreekt en er een nooduitgang geblokkeerd is. Daarnaast speelt ook de kans dat iemand slachtoffer wordt van dit scenario een belangrijke rol. Ondanks dat een vluchtroute bijvoorbeeld geblokkeerd is, zal toch een deel van de mensen in een ruimte kunnen vluchten. Voor deze kans is het dus van belang te bepalen hoe groot de kans is dat iemand niet kan vluchten.

IV.4.1 Kans op een scenario

De kans op een bepaald scenario wordt bepaald aan de hand van een boomdiagram. In dit diagram zijn verschillende van invloed zijnde gebeurtenissen met hun kans van optreden opgenomen. De volgende kansen zijn van invloed op de brandveiligheid in de dancing:

- *Kans op ontstaan van brand.* De kans op brand bedraagt conform de achtergronden van het fysisch brandmodel $1,00 \cdot 10^{-5}$ per m^2 per jaar. De dancing heeft een oppervlakte van $450 m^2$. Dit betekent dat de kans op brand per jaar $450 \cdot 1,00 \cdot 10^{-5} = 0,0045$ bedraagt.
- *Kans op brand ter hoogte van de hoofdingang.* Aan de hand van deze kans kan bepaald worden hoe groot de kans is dat de hoofdingang niet meer gebruikt kan worden voor het vluchten. Voor deze kans wordt er uitgegaan dat een beginnende brand ca. $5 m^2$ onbruikbaar maakt voor het vluchten. Dit door de warmtestraling van de vlammen en de angst van mensen om dicht bij de vlammen te komen. De kans dat $5 m^2$ ter hoogte van de hoofdingang onbruikbaar wordt door brand bedraagt: het oppervlak dat onbruikbaar wordt door de brand gedeeld door de oppervlakte van de ruimte, dus: $5 / 450 = 0,011$.

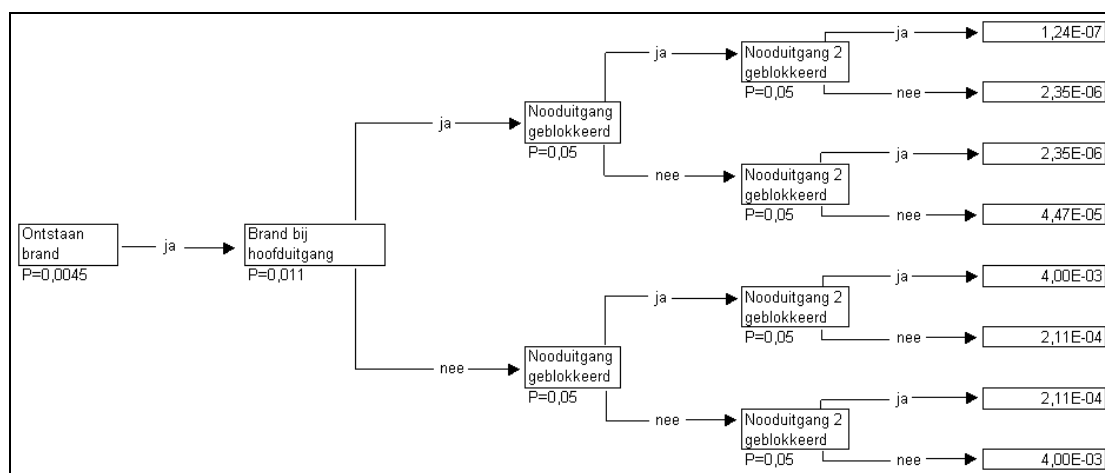
- *Kans geblokkeerde vluchtroute.* De kans dat een vluchtroute geblokkeerd is door brand is gebaseerd op een aanname, dit aangezien er geen Nederlandse statistiek beschikbaar is over dit onderwerp. Er is daarom aangenomen dat 5% van alle vluchtroutes geblokkeerd is. Dit komt overeen met een Amerikaans onderzoek. Voor een correcte risicobenadering is het van groot belang dat er in Nederland onderzoeken worden gedaan naar statistische informatie over dit onderwerp.

In het boomdiagram, zoals weergegeven in figuur IV.2, is per scenario de kans van optreden berekend. Dit is berekend door de kans van het wel of niet optreden van gebeurtenissen met elkaar te vermenigvuldigen. Hieruit volgen de in tabel IV.3 weergegeven kansen per scenario.

Tabel IV.3

Kansen per scenario

Brand bij hoofdingang	Nooduitgang 1 geblokkeerd	Nooduitgang 2 geblokkeerd	Kans
Ja	Ja	Ja	1,24E-07
Ja	Ja	Nee	2,35E-06
Ja	Nee	Ja	2,35E-06
Ja	Nee	Nee	4,47E-05
Nee	Ja	Ja	4,00E-03
Nee	Ja	Nee	2,11E-04
Nee	Nee	Ja	2,11E-04
Nee	Nee	Nee	4,00E-03



Figuur IV.2

Boomdiagram voor kans geblokkeerde vluchtroutes

IV.4.2 Overlijdenskans

De persoonlijke overlijdenskans is de kans dat iemand niet op tijd de ruimte kan verlaten in geval van brand. Hiervoor zijn met name de beschikbare vluchttijd en de doorstroomcapaciteit van de (nood)uitgangen van belang. De maximaal beschikbare ontruimingstijd en doorstroomcapaciteit zijn per scenario bepaald, zoals weergegeven in tabel IV.4. Bij de verschillende scenario's is uitgegaan van een snelle detectie en snelle alarmering van de aanwezigen in de ruimte. Door de hoge bezetting in de ruimte mag verondersteld worden dat de brand in een vroeg stadium ontdekt wordt en dat het voor de aanwezigen snel duidelijk is dat er gevlucht moet worden. Aangenomen is dat het vluchten 45 seconden na het uitbreken van de brand op gang komt. Aan de hand van het fysisch brandmodel is berekend dat er dan nog gedurende 2 minuten en 15 seconden veilig gevlucht kan worden. Hierna zullen de condities in de dancing dusdanig verslechterd zijn, dat het onwaarschijnlijk is dat een dan nog aanwezig persoon de brand overleeft.

In de verschillende scenario's is berekend wat het effect is van geblokkeerde (nood)uitgangen. Door de blokkade van een (nood)uitgang zal de totale doorstroomcapaciteit van de uitgangen afnemen, met als gevolg dat er gedurende de 2.15 minuten minder aanwezigen de ruimte kunnen ontvluchten. Bij de blokkade van de hoofduitgang zullen bijvoorbeeld 47 aanwezigen niet op tijd de ruimte kunnen ontvluchten.

De overlijdenskans per persoon wordt bepaald door het aantal aanwezigen dat niet op tijd de brandruimte kan verlaten te delen door het aantal personen dat totaal in de ruimte aanwezig was voor het uitbreken van de brand. In scenario 2 is de kans dat iemand bij de 47 doden behoort dan ook $47 / 563 = 0,08$.

Het persoonlijk risico dat een persoon in de dancing loopt is de kans op het scenario vermenigvuldigd met de overlijdenskans. Uit scenario 2 volgt bijvoorbeeld een risico van $4,47 \cdot 10^{-4} \cdot 0,08 = 3,7 \cdot 10^{-6}$. Dit risico is hoger dan het aanvaardbaar risico uit het Besluit externe veiligheid. Dit betekent dat de dancing dus onveilig is. In deze situatie zouden dan ook maatregelen noodzakelijk zijn om de kans op het scenario of overlijden te beperken. Hierbij kan gedacht worden aan een extra nooduitgang of aan de toepassing van slecht brandbare materialen om de kans op brand te beperken.

Tabel IV.4

Onderzochte scenario's

Algemene informatie				
<i>Statistische gegevens</i>				
Kans op brand	1,00E-05	per jaar per m2		
Kans geblokkeerde nooduitgang	0,05			
kans op brand ter hoogte van hoofdingang	0,01			
<i>Gegevens bezetting</i>				
Aanwezige personen	563	personen		
<i>Bouwkundige gegevens</i>				
GBO	450	m2		
Hoogte ruimte	4	m		
Lengte	30	m		
Breedte	15	m		
Breedte hoofdingang	1,60	m		
Nooduitgang 1	0,85	m		
Nooduitgang 2	0,85	m		
Nooduitgang 3	0,85	m		
Scenario 1				
Scenario	Brand midden in ruimte			
Detectietijd	0,50	min		
Alarmeringstijd	0,25	min		
<i>uitgang</i>	<i>Geblokkeerd (op slot / verspert)</i>	<i>Geblokkeerd door brand vanaf</i>	<i>capaciteit pers/s</i>	<i>capaciteit tot blokkade</i>
Hoofdingang		2,25 minuten	2,4	324 personen
Nooduitgang 1	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
Nooduitgang 2	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
Nooduitgang 3	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
				+
Totaal capaciteit				840 personen
kans op scenario	3,00E-04			
Maximaal beschikbare vluchttijd	3	min		
Aantal doden	0	personen		
Persoonlijk risico	0			
Scenario 2				
Scenario	Brand bij hoofdingang			
Detectietijd	0,50	min		
Alarmeringstijd	0,25	min		
<i>uitgang</i>	<i>Geblokkeerd (op slot / verspert)</i>	<i>Geblokkeerd door brand vanaf</i>	<i>capaciteit pers/s</i>	<i>capaciteit tot blokkade</i>
Hoofdingang		0 minuten	2,4	0 personen
Nooduitgang 1	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
Nooduitgang 2	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
Nooduitgang 3	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
				+
Totaal capaciteit				516 personen
kans op scenario	4,47E-05			
Maximaal beschikbare vluchttijd	3	min		
Aantal doden	47	personen		
Persoonlijk risico	3,70E-06			

Tabel IV.4 (vervolg)

Onderzochte scenario's

Scenario 3				
Scenario	Brand bij hoofduitgang & geblokkeerde nooduitgang			
Detectietijd	0,50 min			
Alarmeringstijd	0,25 min			
<i>uitgang</i>	<i>Geblokkeerd (op slot / verspert)</i>	<i>Geblokkeerd door brand vanaf</i>	<i>capaciteit pers/s</i>	<i>capaciteit tot blokkade</i>
Hoofduitgang		0 minuten	2,4	0 personen
Nooduitgang 1	ja	0 minuten	1,275	0 personen
Nooduitgang 2	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
Nooduitgang 3	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
				+
Totaal capaciteit				344 personen
kans op scenario	2,35E-06			
Maximaal beschikbare vluchttijd	3 min			
Aantal doden	219 personen			
Persoonlijk risico	9,13E-07			

Scenario 4				
Scenario	Brand bij hoofduitgang & 2 geblokkeerde nooduitgangen			
Detectietijd	0,50 min			
Alarmeringstijd	0,25 min			
<i>uitgang</i>	<i>Geblokkeerd (op slot / verspert)</i>	<i>Geblokkeerd door brand vanaf</i>	<i>capaciteit pers/s</i>	<i>capaciteit tot blokkade</i>
Hoofduitgang		0 minuten	2,4	0 personen
Nooduitgang 1	ja	0 minuten	1,275	0 personen
Nooduitgang 2	ja	0 minuten	1,275	0 personen
Nooduitgang 3	nee	2,25 minuten	1,275	172 personen
				+
Totaal capaciteit				172 personen
kans op scenario	1,24E-07			
Maximaal beschikbare vluchttijd	3 min			
Aantal doden	391 personen			
Persoonlijk risico	8,61E-08			

IV.4.3 Groepsrisico

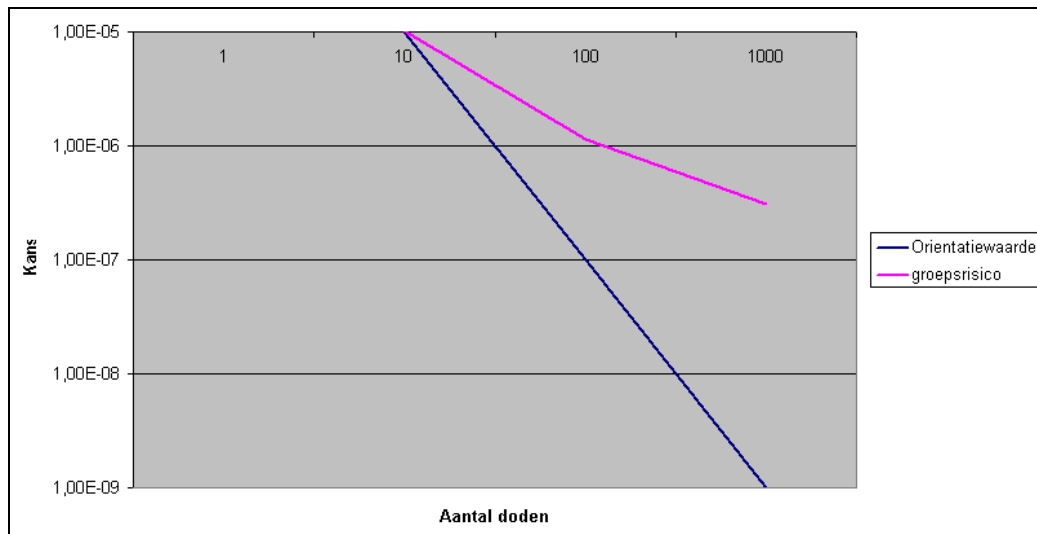
Naast het persoonlijk risico is ook het groepsrisico van belang in het Besluit externe veiligheid. Dit risico geeft aan hoe groot de kans is dat een groep van 10, 100 of 1.000 mensen tegelijk overlijdt bij een ramp. Aan de hand van deze waarden kan de maatschappelijke ontwrichting van de ramp worden bepaald.

Het groepsrisico wordt bepaald aan de hand van het aantal doden bij een scenario en de kans op het scenario. Het aantal doden en de kans op het aantal doden worden in een tabel aflopend geordend, zie tabel IV.5. Vervolgens wordt de cumulatieve kans F bepaald. Dit is de kans op een scenario plus de kans op één of meerdere scenario's met meer doden. Aan de hand van de oriëntatiewaarde inrichtingen (OWI) kan worden bepaald of het groepsrisico acceptabel is. Voor een duidelijk overzicht kunnen deze getallen worden uitgezet in een FN curve, zoals in figuur IV.3 is weergegeven.

Tabel IV.5

Afleiding FN curve

<i>Aantal doden</i>	<i>Kans gebeurtenis (f)</i>	<i>Cumulatieve kans (F)</i>	<i>OWI</i>	<i>F/OWI</i>
391	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	18,96
219	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	118,66
47	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$4,8 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	106,42

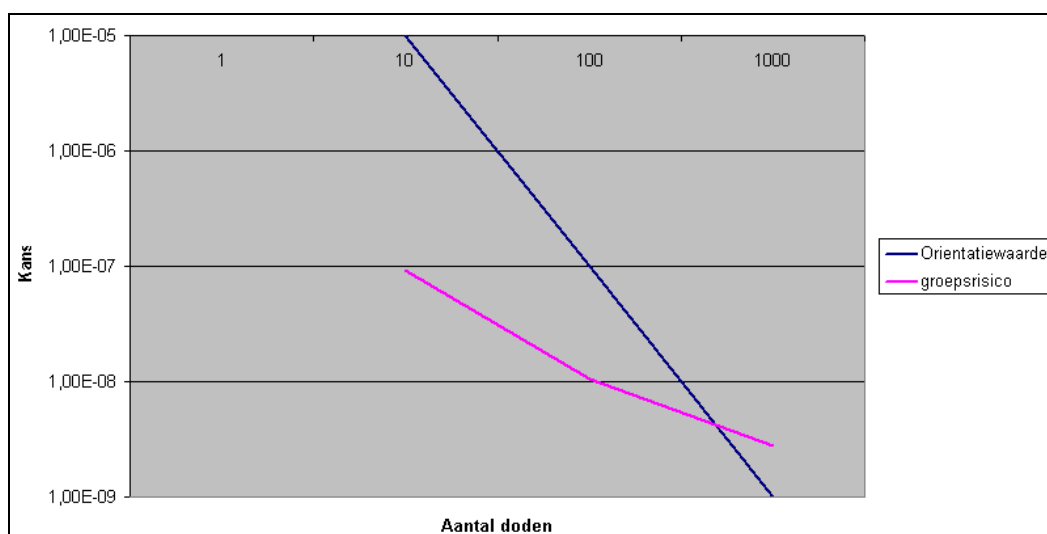


Figuur IV.3

Groepsrisico dancing

Zoals uit de bovenstaande grafiek kan worden afgeleid, is het groepsrisico - ondanks het beperkte persoonlijke risico en de kleine kans op een scenario - onaanvaardbaar groot. Hoewel de kans op een scenario met doden klein is, is het effect dusdanig groot dat een onacceptabele maatschappelijke ontwrichting te verwachten is. In de dancing zijn dus maatregelen noodzakelijk die de kans op een scenario beperken of het aantal slachtoffers reduceert.

Een mogelijkheid om aan de oriëntatiewaarde te voldoen, is het toepassen van moeilijk brandbare of geïmpregneerde materialen ter hoogte van de hoofdingang. Hierdoor wordt de kans op een scenario met een geblokkeerde hoofdingang gereduceerd, wat gunstig is voor het veiligheidsniveau in de ruimte. Een voorbeeld van deze invloed is weergegeven in figuur IV.4. Uitgangspunt achter dit figuur is een kans op brand ter hoogte van de hoofdingang van 1×10^{-4} in plaats van 1×10^{-2} .



Figuur IV.4

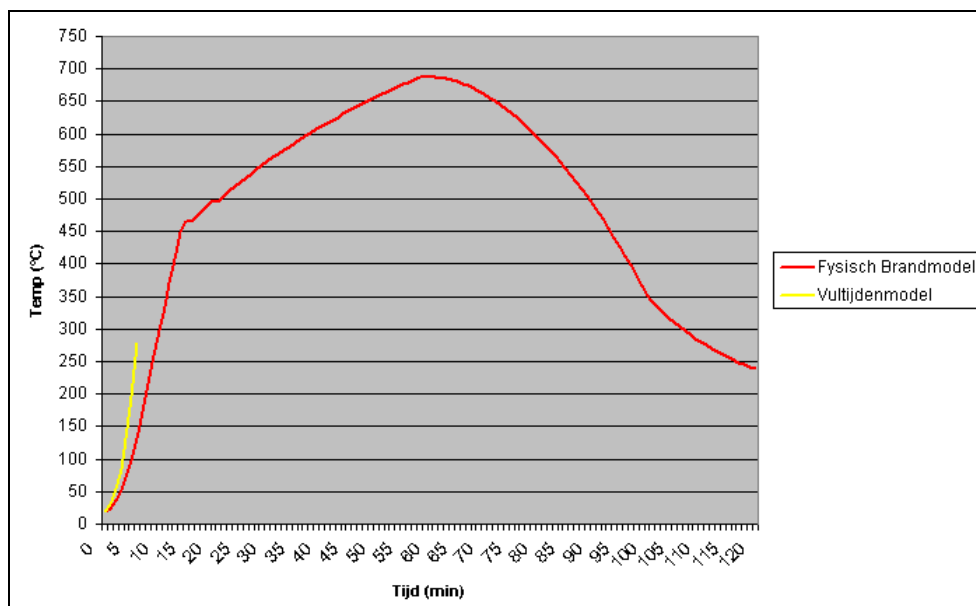
Aangepast groepsrisico dancing

Bijlage V

Vergelijking fysisch brandmodel met vultijdenmodel

V.1 Vergelijking fysisch brandmodel met vultijdenmodel

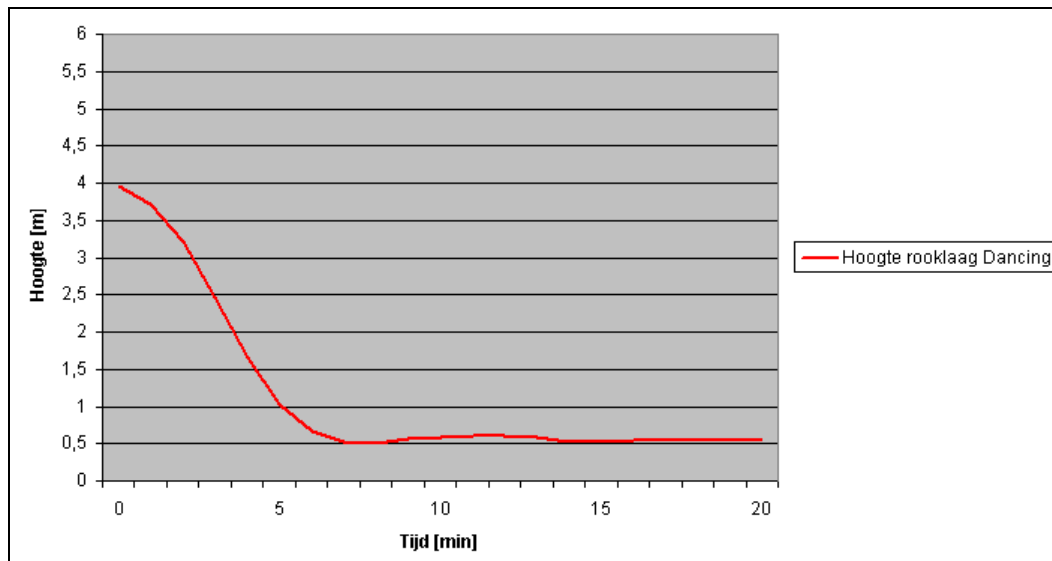
Hoewel het vultijdenmodel en het fysisch brandmodel op elkaar lijken, bestaan er ook verschillen tussen beide modellen. In tegenstelling tot het vultijdenmodel dat alleen met een twee zonemodel rekent, rekent het fysisch brandmodel met zowel een één als een twee-zonemodel. Het fysisch brandmodel is dan ook toepasbaar voor de brandfase na de flashover. Het vultijdenmodel is daarentegen alleen toepasbaar voor de pre-flashover fase. Tevens rekent het fysisch brandmodel het brandverloop preciezer uit dan het vultijdenmodel. Zo neemt het fysisch brandmodel, in tegenstelling tot het vultijdenmodel, ook de invloed mee van de hoeveelheid zuurstof in de ruimte, de luchtdruk in de ruimte en de invloed van (brekende) gevelopeningen. het vultijdenmodel rekent daarentegen met een brand in een 'dichte doos' waar altijd voldoende zuurstof aanwezig is. Deze verschillen in uitgangspunten resulteren in een iets snellere temperatuurontwikkeling met het vultijdenmodel. In figuur V.1 is dit weergegeven.



Figuur V.1

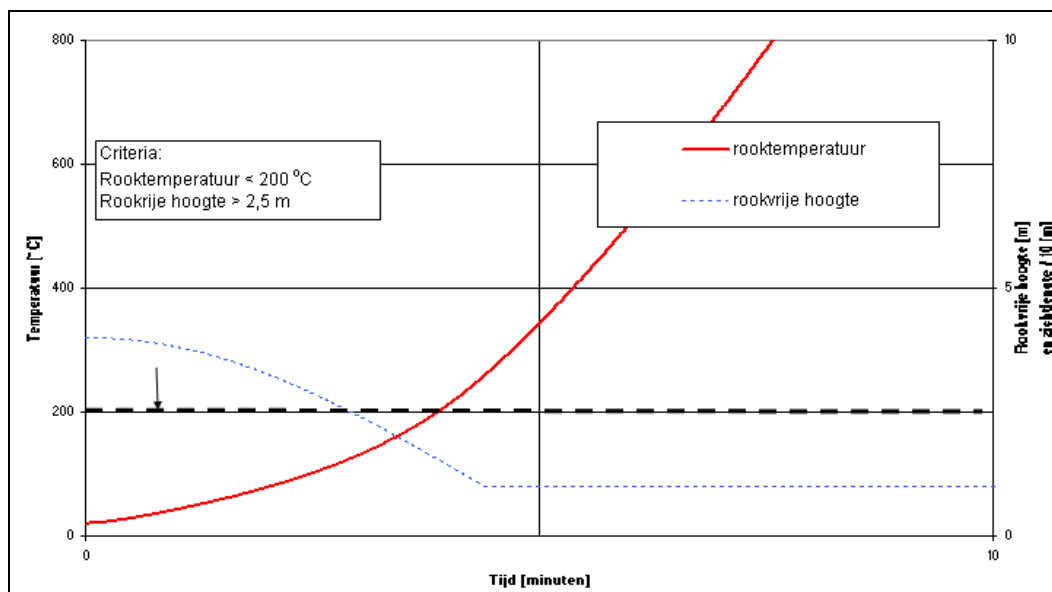
Vergelijking tussen fysisch brandmodel en vultijdenmodel

Naast de temperatuurontwikkeling is de rookontwikkeling in de ruimte van belang. Uit een vergelijking tussen beide modellen kan geconcludeerd worden dat er geen significante verschillen zijn tussen de rookontwikkeling berekend conform het vultijdenmodel en het fysisch brandmodel. In beide modellen daalt de rooklaag na 3 minuten onder de 2,5 meter. De resultaten van beide modellen zijn weergegeven in figuur V.2 en V.3.



Figuur V.2

Ontwikkeling rooklaag berekend met fysisch brandmodel.



Figuur V.3

Ontwikkeling rooklaag berekend met vultijdenmodel.

Bijlage VI

Checklist invoer Ozone

Checklist Invoer Fysisch Brandmodel

Geometrie ruimte

Lengte, breedte en hoogte brandruimte conform tekeningen	Ja	Nee
Oppervlak gevelopeningen in model gelijk aan oppervlak gevelopeningen op tekeningen	Ja	Nee
Opbouw wanden conform tekeningen	Ja	Nee

Gebruik ruimte

Branduitbreidingsnelheid & brandvermogen verantwoord in rapport	Ja	Nee
Vuurlast bepaald aan de hand van normen / inspectie	Ja	Nee

Berekening strategie & overgang 1 zonemodel

Geselecteerde strategie: combinatie 2 Zonemodel - 1 zonemodel	Ja	Nee
Omslag bij hete zone: $\geq 500^{\circ}\text{C}$	Ja	Nee
Omslag bij brandbare materialen in hete zone & hete zone = 300°C	Ja	Nee
Omslag bij hoogte interface $\leq$ hoogte brandruimte	Ja	Nee
Omslag bij brandoppervlak $\geq 0,25 \times$ vloeroppervlak	Ja	Nee
Pluimmodel: Heskestad	Ja	Nee
$\delta n,1$ t/m $\delta n,10$ gelijk aan 1	Ja	Nee
$\delta q,1$ & $\delta q,2$ gelijk aan 1	Ja	Nee

Toetsing staalconstructie

Keuze en dimensies kolommen / ligger conform tekeningen	Ja	Nee
Belastingen bepaald aan de hand van geldende Normen	Ja	Nee
Bij lokale vuurlast ($< 0,25 \times$ Vloeroppervlak) kolom / ligger getoetst aan zonemodel en lokaal brandmodel Hasemi	Ja	Nee
Bij compariment brand kolom / ligger getoetst aan zonemodel	Ja	Nee

Indien een van de bovenstaande punten met nee is beantwoord dan moet dit punt zijn toegelicht in een bijgeleverd rapport