



**BRANDWEER**

Brandweeracademie

# Brandoverslag

Handelingsperspectief en literatuuronderzoek



Instituut Fysieke Veiligheid  
Brandweeracademie  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
www.ifv.nl  
info@ifv.nl  
026 355 24 00

## Colofon

Brandweeracademie (2018). *Brandoverslag. Handelingsperspectief en literatuuronderzoek*.  
Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

Opdrachtgever: Brandweeracademie  
Contactpersoon: dr. ir. Jos Post  
Titel: Brandoverslag Handelingsperspectief en literatuuronderzoek  
Datum: 21 september 2018  
Status: Definitief  
Versie: 1.0  
Auteurs: Tamo Vogel MSc, dr. ir. Jos Post  
Projectleider: dr. ir. Jos Post  
Review: dr. ir. Ricardo Weewer, Lieuwe de Witte, BA  
Eindverantwoordelijk: dr. ir. Ricardo Weewer  
Foto op cover: Marcel Klip 112groningen.nl

# Voorwoord

Met genoegen presenteer ik u dit kennisdocument dat brandweermensen gaat helpen bij het voorkomen van brandoverslag. Het document bestaat uit twee delen. Het eerste deel bestaat uit een handelingsperspectief voor het voorkomen van brandoverslag, waarbij het mogelijk wordt om op basis van vuistregels de kans op overslag te bepalen. In het tweede deel wordt een literatuuronderzoek beschreven, waarbij goed in beeld is gebracht hoe branden nu eigenlijk kunnen overslaan en welke technieken en werkwijzen op basis van deze kennis het meest effectief en efficiënt zijn om branduitbreiding naar belendingen te voorkomen. De defensieve buiteninzet dus.

Brandoverslag voorkomen is wellicht de oudste tactiek die de brandweer kent. Toch was het nodig om eens goed te kijken of de werkwijzen die we daarvoor gebruiken nog wel effectief en efficiënt genoeg zijn. De laatste jaren is de samenleving kritischer geworden op het milieu. Zodra een brand niet meer te blussen valt, kiezen we meestal voor een defensieve buiteninzet. Vragen als: hoe beperken we dan het effect van de rook en hoe kunnen we de hoeveelheid (verontreinigd) bluswater beperken, zijn meer dan ooit actueel. Dit document is opgesteld om te bepalen hoe we met zo weinig mogelijk water branduitbreiding in de vorm van overslag kunnen voorkomen.

Het vreemde is dat, ondanks het feit dat de defensieve buiteninzet als tactiek al heel lang bestaat, er toch zo veel niet bekend was en er ook veel aannames bestonden. Zo wisten we niet precies wanneer er kans was op brandoverslag, tenminste dat konden we niet voorspellen. Het kan dus zomaar zijn, dat veel branden niet zijn overgeslagen dankzij de inzet van de brandweer, maar dat ook veel branden zonder inzet niet zouden zijn overgeslagen. In dat geval was het dus niet nodig om zo veel (verontreinigd) bluswater te produceren. Anderzijds kan het ook zijn dat branden zijn overgeslagen ondanks de inzet van de brandweer, omdat we niet precies weten wat het effect van verschillende technieken is die we momenteel gebruiken om brandoverslag te voorkomen. Toch nog interessante materie dus!

In een volgende stap gaan we nog onderzoeken hoe zo efficiënt mogelijk een waterlaagje op een gevel kan worden aangebracht. Daarnaast gaan we door met het verzamelen van casussen, zodat we van de praktijk blijven leren. Wij hopen hiermee wederom een bijdrage te hebben geleverd aan het vergroten van inzicht in het brandweervak.

Ik wil graag iedereen bedanken die heeft bijgedragen aan de totstandkoming van dit document, ofwel door mee te denken of door het aandragen van casussen. In het bijzonder de Regiegroep Innovatie Moed, die een deel van dit onderzoek financieel heeft gesteund.

Ricardo Weewer  
lector Brandweerkunde

# Inhoud

	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Deel 1: Handelingsperspectief voorkomen brandoverslag</b>	<b>7</b>
1.1	Inleiding	7
1.2	Op welke manieren kan brandoverslag plaatsvinden?	7
1.3	Hoe kan worden ingeschat of brandoverslag is te verwachten?	8
1.4	Hoe kan brandoverslag voorkomen worden?	9
<b>2</b>	<b>Deel 2: Literatuuronderzoek</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding	11
2.2	Onderzoeksmethode	11
2.3	Kwadrantenmodel	12
<b>3</b>	<b>Wijzen van brandoverslag</b>	<b>15</b>
3.1	Inleiding	15
3.2	Brandoverslag	15
3.3	Warmteoverdracht	17
3.4	Factoren van invloed op brandoverslag	34
<b>4</b>	<b>Technieken om brandoverslag te voorkomen</b>	<b>46</b>
4.1	Inleiding	46
4.2	Water	46
4.3	Waterscherm	49
4.4	Nathouden belendende wand	52
4.5	Schuim op blootgestelde gevelbelendende wand	53
4.6	Aanbrengen van gel	55
4.7	Toevoegen van additieven aan het water	55
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>57</b>
5.1	Wijzen van brandoverslag	57
5.2	Technieken om brandoverslag te voorkomen	59
5.3	Conclusie	60
	<b>Literatuur</b>	<b>62</b>
	<b>Bijlage 1 Stralingsintensiteit en brandoverslag</b>	<b>65</b>
	<b>Bijlage 2 Zichtfactor</b>	<b>68</b>

# Inleiding

De defensieve buiteninzet is erop gericht om brandoverslag, het verspreiden van de brand via de buitenlucht, tussen gebouwen met behulp van repressief brandweeroptreden te voorkomen. Bouwregelgeving gaat ervan uit dat brandoverslag naar een ander perceel voorkomen kan worden met preventieve maatregelen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat bij een afstand van 15 meter of meer er eigenlijk geen brandoverslag kan plaatsvinden. Het is onbekend waar dit uitgangspunt op gebaseerd is. Er zijn echter situaties denkbaar dat er over een afstand van 15 meter wel brandoverslag kan plaatsvinden.

De brandweer kan repressief optreden met het doel brandoverslag te voorkomen. Uit de toelichting op het Bouwbesluit blijkt dat de regelgever bepaalde aannames heeft gedaan ten aanzien van (de mogelijkheden van) het brandweeroptreden met betrekking tot het voorkomen van brandoverslag naar een ander pand of een ander pand op een ander perceel. In de praktijk probeert de brandweer op verschillende manieren, met verschillende technieken, brandoverslag via de buitenlucht te voorkomen. Deze technieken zijn echter niet *evidence based*. Het is vaak niet goed bekend welke natuurkundige principes aan bepaalde technieken ten grondslag liggen. Met behulp van literatuuronderzoek wordt kennis en ervaringen verzameld over het verschijnsel brandoverslag, de verschillende technieken en de werking en effectiviteit ervan in de praktijk. Op basis van dit literatuuronderzoek is er een eenvoudig leesbaar handelingsperspectief ontwikkeld.

Het doel van dit kennisdocument is meerledig.

1. Het geeft de brandweer een beter onderbouwd handelingsperspectief voor de defensieve buiteninzet.
2. Dit bevordert de effectiviteit, efficiëntie en de veiligheid van het brandweeroptreden.
3. Door meer doelgericht te werken is de brandweer beter in staat maatschappelijke kosten (zoals milieuschade) te beperken.
4. Door een beter onderbouwd handelingsperspectief kan de brandweer transparanter zijn in wat de maatschappij wel en niet kan verwachten van de brandweer.

## Leeswijzer

Dit kennisdocument bestaat uit twee delen. Het eerste deel bevat een handelingsperspectief voor het voorkomen van brandoverslag. Het handelingsperspectief is bedoeld voor de praktijk en is daarom geschreven voor repressieve brandweermensen, zoals manschappen, bevelvoerders en officieren van dienst. In het tweede deel wordt het bijbehorende literatuuronderzoek beschreven. Het literatuuronderzoek is geschreven voor eenieder die op zoek is naar verdiepende kennis over het fenomeen brandoverslag.

### Deel 1: handelingsperspectief

Het handelingsperspectief, in hoofdstuk 1, is gebaseerd op de resultaten uit het literatuuronderzoek en kennis van de Nederlandse brandweerpraktijk. De nadruk ligt hierbij op de manieren waarop brandoverslag kan optreden, hoe kan worden ingeschat of brandoverslag is te verwachten en hoe de brandweer kan handelen om brandoverslag te voorkomen.

## Deel 2: literatuuronderzoek

Hoofdstuk 2 start met een introductie op het literatuuronderzoek: welke onderzoeksvragen zijn er geformuleerd en hoe kan de gehanteerde onderzoeksmethode beschreven worden? Het hoofdstuk sluit af met achtergrondinformatie over het kwadrantenmodel, met speciale aandacht voor de defensieve buiteninzet. In hoofdstuk 3 wordt de eerste onderzoeksvraag beantwoord. Er wordt ingegaan op de term brandoverslag en de verschillende oorzaken die tot brandoverslag kunnen leiden. Vervolgens wordt het natuurkundige principe van warmteoverdracht besproken. Zo wordt informatie gegeven over conductie, convectie, straling en opwarming en ontbranding van de gevel van het bedreigde gebouw dat dichtbij de 'primaire' brand staat. Ook wordt in dit hoofdstuk besproken welke vorm van warmteoverdracht bij brandoverslag prevaleert. Tot slot wordt in hoofdstuk 3 stilgestaan bij andere factoren die van invloed zijn op brandoverslag. Zo wordt hier bijvoorbeeld iets gezegd over de invloed van temperatuur en brandverloop, maar ook over de afstand en materiaaleigenschappen. Hoofdstuk 4 behandelt de tweede onderzoeksvraag en gaat daarom in op de verschillende technieken die de brandweer kan gebruiken om brandoverslag te voorkomen. In het beginsel worden hier de eigenschappen van water wat betreft de absorptie en afscherming van stralingsenergie besproken. Het hoofdstuk gaat echter ook in op inzettechnieken zoals waterschermen, nathouden van blootgestelde gevel, schuim, gel en additieven. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 een algemene conclusie beschreven.

# 1 Deel 1: Handelingsperspectief voorkomen brandoverslag

## 1.1 Inleiding

De defensieve buiteninzet is erop gericht om brandoverslag tussen gebouwen met behulp van repressief brandweeroptreden te voorkomen. Onder brandoverslag wordt verstaan: het verspreiden van de brand via de buitenlucht. Op basis van literatuuronderzoek, beschreven in deel 2 van dit document, is een handzaam leesbaar handelingsperspectief ontwikkeld. In het handelingsperspectief ligt de nadruk op de manieren waarop brandoverslag kan optreden, hoe kan worden ingeschat of brandoverslag is te verwachten en hoe de brandweer kan handelen om brandoverslag te voorkomen.

## 1.2 Op welke manieren kan brandoverslag plaatsvinden?

Brandoverslag kan plaatsvinden als de stralingsintensiteit van de bron zo hoog is, dat het materiaal, dat de straling ontvangt, in brand kan raken. In de praktijk gaat het daarbij om het gebouw dat in brand staat als bron en het nabijgelegen pand of object als ontvanger. Het ontvangende materiaal kan door de straling zo warm worden dat er, door pyrolyse, gassen uit ontwijken. Die kunnen vervolgens door een vonkje (vlieg vuur), afkomstig vanuit het brandende gebouw, worden ontstoken: piloted ignition. Als er geen piloted ignition plaatsvindt kan het ontvangende materiaal nog warmer worden. Het kan boven zijn zelfontbrandingstemperatuur komen en ook zonder een externe bron (zoals een vonkje) ontsteken: auto ignition (zelfontbranding).

Of de blootgestelde gevel of delen ervan kunnen ontsteken hangt af van de volgende factoren.

- > De stralingsintensiteit op de gevel.
- > De blootstellingstijd.
- > Hoe door delen van de gevel energie kan worden opgenomen en ook weer kan worden afgeven.
- > Materiaaleigenschappen: temperatuur waarbij piloted ignition en zelfontbranding optreden.

De ontbranding<sup>1</sup> is van meerdere factoren afhankelijk, met ieder een bepaalde onzekerheid. Met het aangeven van één bepaalde grenswaarde voor de ontvangen straling wordt met al deze factoren geen rekening gehouden. Om in de praktijk van brandbestrijding toch een richtwaarde te hebben, kan het volgende worden aangehouden.

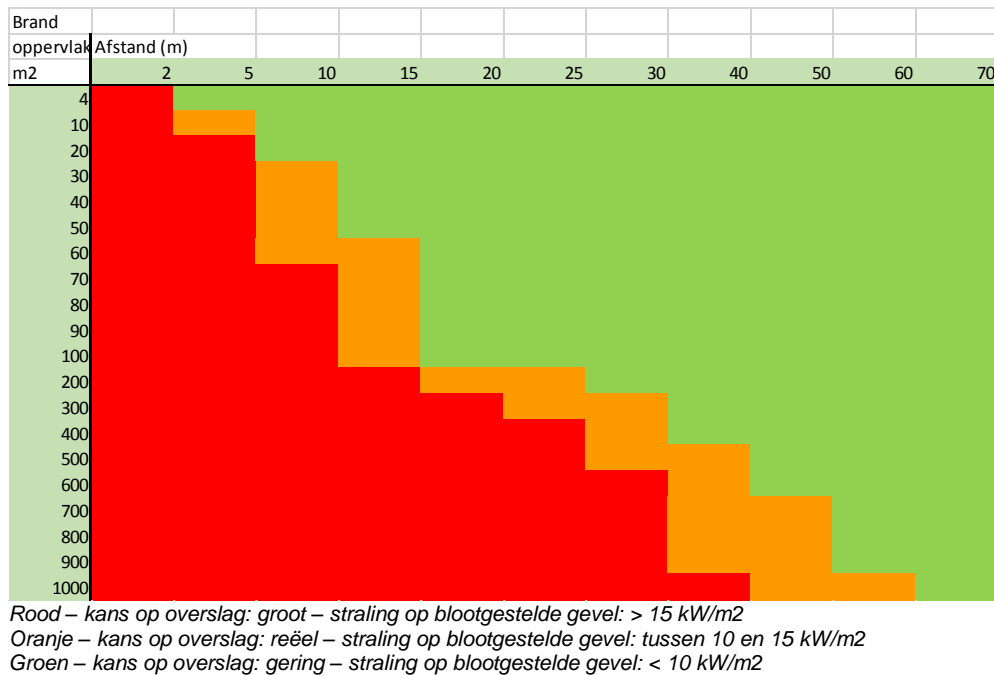
---

<sup>1</sup> In deel 2 van deze publicatie staat voor diverse materialen beschreven bij welke blootstellingstijd en ontvangen straling er ontbranding plaats kan vinden.

Bij een blootstelling van 30 minuten kan een straling van 10 kW/m<sup>2</sup> bij de blootgestelde gevel tot ontbranding leiden (10 kW/m<sup>2</sup> is de rechterkant van het oranje gebied in figuur 1.1). Dit is weliswaar conservatief, maar toch realistisch. In NEN 6079 wordt voor deze waarde aangehouden dat er een kans van 40 procent is op ontbranding, ongeacht de blootstellingsduur.

### 1.3 Hoe kan worden ingeschat of brandoverslag is te verwachten?

Hier volgt in twee stappen een praktische aanpak om de kans op brandoverslag in te schatten. Daarbij wordt gebruikgemaakt van figuur 1.1.



Figuur 1.1 Kans op brandoverslag als functie van brandoppervlak en afstand

#### Stap 1

Is de stralingsintensiteit op de blootgestelde gevel groot genoeg om brandoverslag te veroorzaken? De kans op overslag is:

- > Groot of reëel (rood of oranje) -> ga door naar stap 2.
- > Gering (groen) -> brandoverslag zal waarschijnlijk niet optreden.

#### Stap 2

Zijn er in de blootgestelde gevel delen die mogelijk kunnen ontbranden?

- > Ja, gevoelige geveldelen of daken zijn aanwezig in/op het blootgestelde gebouw -> er kan brandoverslag plaatsvinden.
- > Nee -> brandoverslag zal waarschijnlijk niet optreden.



## Stap 1

In figuur 1.1 is op gestileerde wijze weergegeven op welke afstand brandoverslag kan plaatsvinden: de afstand van de blootgestelde gevel tot aan het vlamfront.<sup>2</sup> In tabel 1.2 is gerekend met het punt op de blootgestelde gevel waar de maximale straling invalt: het punt midden tegenover het vlamfront.

Bepaal in figuur 1.1 of de combinatie van het oppervlak van het vlamfront en de afstand van de blootgestelde gevel tot het vlamfront, in het rode, oranje of groene gebied valt.

Om in te schatten of brand kan plaatsvinden kan ook, als vuistregel, de onderstaande rekenregel worden gebruikt. Bij een grotere afstand dan aangegeven door de rekenregel, is de kans op brandoverslag gering. Het resultaat van de rekenregel ligt in het groene gebied van figuur 1.1.

**Tabel 1.2 Vuistregel: de afstand waarbij de kans op overslag gering is**

Oppervlak vlamfront	Afstand	Voorbeeld
Tot 100 m <sup>2</sup>	Oppervlak/5 + 5 m	Vlamfront = 50 m <sup>2</sup> Afstand = 50/5 + 5 = 15 m
> 100 m <sup>2</sup>	Oppervlak/20 + 20 m	Vlamfront = 200 m <sup>2</sup> Afstand = 200/20 + 20 = 30 m

## Stap 2

Zijn er geveldelen die mogelijk kunnen ontbranden:

- > gevel of geveldelen van hout en/of kunststof
- > isolatiemateriaal achter een dunne (metalen) wand of in sandwichpanelen
- > gevoelige dakbedekking.

Als dit niet het geval is, zal brandoverslag waarschijnlijk niet optreden.

## 1.4 Hoe kan brandoverslag voorkomen worden?

Brandoverslag kan optreden doordat de blootgestelde gevel of delen ervan, opwarmen tot een hogere temperatuur dan die waarbij ontbranding plaatsvindt. Het opwarmen van de gevel kan worden beperkt door de gevel af te schermen en door de gevel te koelen. Hieronder wordt ingegaan op de meest gebruikte methoden.

### 1.4.1 Water: afschermen en koelen

Water is het middel dat in de praktijk het meeste wordt toegepast om brandoverslag te voorkomen.

#### **Waterscherm**

Met een waterscherm tussen het brandende en het blootgestelde gebouw kan de straling deels worden afgeschermd. De effectiviteit van een dergelijk scherm is beperkt. Een deel van de straling gaat tussen de druppels door en bereikt ongehinderd de gevel van het andere gebouw. Een deel van de straling gaat door de druppels. Door de kleine afstand die de straling in de druppel aflegt wordt maar een deel ervan geabsorbeerd, het ander deel

<sup>2</sup> Zie voor meer informatie over stralingsintensiteit en brandoverslag bijlage 1.

gaat er doorheen. De effectiviteit van een waterscherp kan circa 50 procent zijn. Maar veel factoren zijn bepalend, zoals de druppelgrootte en de druppeldichtheid, die op hun beurt weer worden bepaald door de vorm van het watergordijn, de straalpijp en de waterdruk. Hierdoor kan de effectiviteit in de praktijk sterk verschillend zijn.

### ***Nathouden van de gevel***

Nathouden van de gevel is heel effectief. Water op de gevel spuiten, dat er vervolgens (naar beneden) vanaf en overheen stroomt, is een goede methode om de gevel te koelen. De huidige vuistregel (10 l/min.m<sup>2</sup>) sluit aan bij de literatuur, maar daarbij zijn veel aannames gemaakt. Met aanvullende experimenten zou de werkelijke benodigde waterhoeveelheid kunnen worden bepaald.

Met deze vuistregel is met een lagedrukstraal, met een capaciteit van 450 lit/min, een gevel van 45 m<sup>2</sup> te koelen. In veel gevallen zal de beschikbare watercapaciteit niet de beperkende factor zijn, maar is het eerder de vraag of de gevel voldoende bereikbaar is om hem nat te houden en te koelen.

De waterfilm op de gevel houdt ook voor een deel de straling tegen. Het is zaak om de gevel en vooral de delen die het meest gevoeligst zijn voor brandoverslag, zoals houten of kunststof delen, voortdurend nat te houden. En die delen die het meest worden blootgesteld aan de straling, het deel van de gevel met de grootste zichthoek, 'recht tegenover' het vlamfront.

De combinatie van het nathouden van de gevel en een waterscherp dat gericht is op de blootgestelde gevel, is een effectieve manier voor het afscherp en koelen van de gevel.

### **1.4.2 Afdekken met schuim**

Schuim op de gevel spuiten is een goed middel om de gevel af te schermen voor de straling. In de praktijk is de uitvoerbaarheid heel verschillend. Te zwaar schuim kan van de gevel afglijden. Te licht schuim is gevoelig voor wind (ook de wind die door de brand wordt veroorzaakt) en zal van de gevel worden afgeblazen. Het schuim wordt zelf ook door de warmtestraling afgebroken. De schuimlaag moet dus voortdurend worden onderhouden door nieuwe schuim aan te brengen. Bij het gebruik van schuim moet de gevel en vooral de delen die het meest gevoeligst zijn voor brandoverslag, zoals houten of kunststof delen, voortdurend bedekt blijven.

Schuim kan goed werken voor het afscherping tegen de straling. In de praktijk kan het aanbrengen en onderhouden van de schuimlaag echter problematisch zijn.

### **1.4.3 Andere middelen**

#### ***Gel***

Aan het water kan een verdikkingsmiddel worden toegepast zodat er een gel ontstaat. Deze gel kan op de wand worden gespoten en zal er deels op blijven plakken. De gel koelt het oppervlak van de gevel en absorbeert een deel van de straling. In de uitgevoerde experimenten bleek de gel de opwarming van de gevel te vertragen, maar slechts in beperkte mate.

#### ***Additieven***

Aan het water kunnen stoffen worden toegevoegd die de absorptie van de straling vergroten. Experimenten zijn uitgevoerd waarbij bleek dat de absorptie-effectiviteit slechts in zeer beperkte mate toenam.

# 2 Deel 2: Literatuuronderzoek

## 2.1 Inleiding

Met dit hoofdstuk start het tweede deel van de publicatie, namelijk het literatuuronderzoek. Het literatuuronderzoek heeft tot doel om uit te werken wat er wetenschappelijk bekend is over het verschijnsel brandoverslag, welke natuurkundige principes hierbij een rol spelen en hoe brandoverslag te voorkomen is. Om die reden zijn de volgende twee onderzoeksvragen geformuleerd:

1. Op welke wijze vindt brandoverslag tussen gebouwen plaats? (hoofdstuk 3)
2. Wat zijn effectieve technieken waarmee de brandweer deze brandoverslag kan voorkomen? (hoofdstuk 4)

In hoofdstuk 5 worden de antwoorden op beide onderzoeksvragen kort samengevat.

Alvorens ingegaan kan worden op de resultaten van het literatuuronderzoek, wordt in dit hoofdstuk allereerst beschreven welke onderzoeksmethode gehanteerd is. Vervolgens sluit dit hoofdstuk af met achtergrondinformatie over het kwadrantenmodel, met speciale aandacht voor de defensieve buiteninzet.

## 2.2 Onderzoeksmethode

### 2.2.1 Dataverzameling: algemene opzet

Dit onderzoek heeft tot doel om inzicht te geven in bestaande kennis en informatie over brandoverslag en het voorkomen hiervan. Om dit doel te kunnen bereiken is gezocht naar literatuur over brandoverslag en technieken om brandoverslag te voorkomen. Daarbij is gezocht naar les- en leerstof, nationaal en internationaal onderzoek, rapporten en publicaties over brandoverslag in het algemeen, het natuurkundige principe van warmteoverdracht en naar verschillende technieken om brandoverslag te voorkomen.

Zo is in de huidige les- en leerstof van de brandweer onderzocht welke kennis met betrekking tot brandoverslag aan brandweerpersoneel wordt overgedragen en waar deze kennis op gebaseerd is. Om relevante literatuur en onderzoeken te vinden zijn er ook verschillende zoekopdrachten uitgevoerd. Allereerst is in de eigen bibliotheek van het IFV gezocht naar documenten met relevante informatie over brandoverslag, warmteoverdracht of brandweertechnieken om brandoverslag te voorkomen. Na een positieve eerste beoordeling over de toepasbaarheid van het betreffende document, is gekeken welke literatuurverwijzingen in het document zijn opgenomen. Mogelijk relevante verwijzingen zijn genoteerd en later opgezocht. Deze methode om mogelijk interessante literatuur inzichtelijk te maken wordt in de wetenschappelijke wereld ook wel omschreven als de sneeuwbalmethode.

Naast bestudering van fysiek aanwezige documenten is er via zoekmachines op internet gezocht naar andere (wetenschappelijke) literatuur. Daartoe zijn op de websites van [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) en [scholar.google.com](http://scholar.google.com) verschillende zoektermen ingevoerd. De

zoektermen waarop gezocht is zijn zowel Nederlandse woorden als hun Engelse vertaling. Voorbeelden hiervan zijn 'brandoverslag' ('fire spread'), 'warmteoverdracht' ('heat transfer'), 'scheidingsafstand', 'afstand tussen gebouwen' ('fire separation') en 'warmte absorptie' ('heat absorption'). Ook is er specifiek gezocht naar informatie over verschillende brandweer inzettechnieken in relatie tot het voorkomen van brandoverslag. Daarbij is bijvoorbeeld gezocht naar literatuur over de werking en effectiviteit van water en schuim, het inzetten van een watergordijn en toevoegen van additieven aan water om de werking te verbeteren.

Van mogelijk relevante literatuur is de samenvatting (abstract) gelezen en indien het document voldoende relevant leek, is geprobeerd het betreffende artikel of onderzoek in zijn geheel te downloaden.

Ook in dit geval is de sneeuwbalmethode toegepast door in de gevonden literatuur genoemde verwijzingen te onderzoeken en waar relevant ook deze artikelen en onderzoeken te raadplegen. Beperkende factor hierbij was dat behoorlijk veel wetenschappelijk literatuur niet vrij toegankelijk is en artikelen eerst opgevraagd moeten worden voor deze geheel kunnen worden ingezien. Daarom zijn de meeste artikelen op basis van hun samenvatting (abstract) beoordeeld als relevant of niet.

Er is niet alleen gezocht naar gepubliceerde artikelen in wetenschappelijke bladen en websites. Er is ook via de algemene zoekmachine van Google gezocht naar rapporten over brandoverslag en dan in het bijzonder over invloedsfactoren of inzettechnieken om dit te voorkomen. Hiertoe zijn ook websites van onder meer het brandweerkennisset, de NFPA – *News and Research*, Underwriters Laboratories en het National Institute of Standards and Technology (NIST) doorzocht. Relevante rapporten zijn vervolgens gedownload en doorgenomen.

### 2.2.2 Afbakening

In het literatuuronderzoek is gekeken naar het principe van brandoverslag en naar beschikbare inzettechnieken om brandoverslag te voorkomen. Hierbij wordt ingegaan op de natuurkundige principes die een rol spelen bij brandoverslag. Hoewel er op sommige punten diep wordt ingegaan op deze principes, is geprobeerd om het onderzoeksrapport overzichtelijk, begrijpelijk en relevant te houden. Een diepgaande natuurkundige beschrijving is daarom geen hoofddoel van dit rapport.

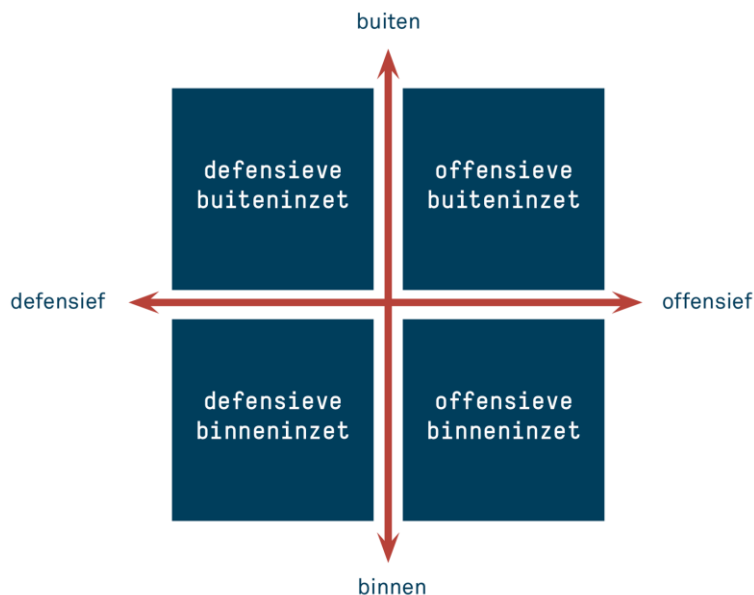
## 2.3 Kwadrantenmodel

De defensieve buiteninzet komt voort uit het kwadrantenmodel. Naast een defensieve buiteninzet worden binnen het kwadrantenmodel een offensieve buiteninzet, een defensieve binneninzet en een offensieve binneninzet onderscheiden.

### 2.3.1 Achtergrond

In het werkdocument *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding* (Brandweeracademie, 2014) wordt het kwadrantenmodel gepresenteerd. Daarin staat dat het kwadrantenmodel onderdeel is van het tactische deel van de brandweerdoctrine van de Nederlandse brandweer. Het is een hulpmiddel voor repressief leidinggevenden om keuzes te maken in de aanpak van (gebouw-)brandbestrijding. De aanleiding voor de ontwikkeling van het kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding was de tragische gebeurtenis bij de brand in De Punt. Daar kwamen in 2008 drie collega's om het leven bij een brand in een loods; zij werden slachtoffer van een onverwachte branduitbreiding. Uit de onderzoeken na afloop van

deze brand werd duidelijk dat deze tragische afloop eigenlijk alle collega's in het land had kunnen overkomen. De brandweer bleek te weinig kennis te hebben over het verloop van branden met moderne bouwmaterialen. Bovendien bleek de toen gangbare werkwijze van de binneninzet niet goed aan te sluiten bij de risico's van complexe gebouwen.



**Figuur 2.1 Schematische weergave kwadrantenmodel (Brandweeracademie, 2014)**

Het kwadrantenmodel is opgezet vanuit twee assen. Op de horizontale as staat een defensieve inzet tegenover een offensieve inzet. Op de verticale as staat een buiteninzet tegenover een binneninzet. Gecombineerd levert dit in totaal vier verschillende inzet tactieken op met elk hun eigen criteria, doelen en werkwijzen. Het kwadrantenmodel ondersteunt in de keuze van een repressief leidinggevende voor de tactiek en middelen bij de bestrijding van brand in een gebouw. Het is vooral een denkmodel, waarbij de lijnen tussen de kwadranten bij de brandbestrijding de noodzaak tot heroverweging van het inzet tactiek symboliseren (het 'schakelmoment'). Bij de keuze voor het juiste kwadrant zijn de brandkenmerken, gebouwkenmerken en mensenkenmerken (ook wel het kenmerkenschema genoemd) van groot belang voor de beeldvorming, oordeelsvorming en besluitvorming. Tijdens de bestrijding van een incident kan er geschakeld worden naar een ander kwadrant als de omstandigheden of aanwezig materiaal en middelen daar aanleiding toe geven. Het kan ook voorkomen dat bij dezelfde brand aan verschillende zijden verschillende tactieken worden toegepast. Bijvoorbeeld bij een grote brand in een groot bedrijfsgebouw. In de richting van de belendingen kan defensief buiten worden toegepast om overslag door straling naar aangrenzende gebouwen te voorkomen. Binnen in het gebouw kan defensief binnen worden toegepast om de brandcompartimentering te behouden en zodoende te voorkomen dat het hele gebouw afbrandt. Onderhavig onderzoek is gericht op het kwadrant van de defensieve buiteninzet. In de volgende paragraaf zal nader worden ingegaan op deze inzet tactiek.

### 2.3.2 Defensieve buiteninzet

Als de brand te ver ontwikkeld is om nog een veilige en effectieve binneninzet te plegen, zelfs niet met een voorafgaande offensieve buiteninzet, zal door de repressief leidinggevende gekozen worden voor een defensieve buiteninzet. Er wordt dan niet meer ingezet op het brandende gebouw zelf, maar op de belendingen, voor zover aanwezig. In het

werkdocument (Brandweeracademie, 2014) wordt het doel van de defensieve buiteninzet omschreven als schadebeperking door:

- > Het voorkomen van uitbreiding naar belendingen.
- > Het voorkomen van milieuschade.
- > Het beperken van de effecten van rook.

Een defensieve buiteninzet wordt gebruikt bij een gebouw in brand: de vuurhaard is niet of nauwelijks te lokaliseren of niet beheersbaar met de aanwezig middelen en mogelijkheden, er komt veel rook vrij en de constructie is zodanig dat het gebouw snel kan instorten. Het brandweerpersoneel wordt binnen dit kwadrant ingezet buiten het gebouw en buiten haar valschaduw.

# 3 Wijzen van brandoverslag

## 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de volgende onderzoeksvraag beantwoord: Op welke wijze vindt brandoverslag tussen gebouwen plaats? Om deze vraag te beantwoorden wordt allereerst ingegaan op de term brandoverslag en de verschillende oorzaken die tot brandoverslag kunnen leiden. Vervolgens wordt het natuurkundige principe van warmteoverdracht besproken. Zo wordt informatie gegeven over conductie, convectie, straling en opwarming en ontbranding van een voorwerp. Ook wordt in dit hoofdstuk besproken welke vorm van warmteoverdracht bij brandoverslag prevaleert. Tot slot wordt stilgestaan bij andere factoren die van invloed zijn op brandoverslag. Zo wordt hier bijvoorbeeld iets gezegd over de invloed van temperatuur en brandverloop, maar ook over de afstand en materiaaleigenschappen.

## 3.2 Brandoverslag

### 3.2.1 Soorten branduitbreiding

Een belangrijk inzetdoel van de defensieve buiteninzet is om uitbreiding naar belendingen te voorkomen. De volgende soorten branduitbreiding worden onderscheiden (Brandweeracademie, 2013a):

- > Branduitbreiding: uitbreiding van een brand binnen een ruimte.
- > Branddoorslag: uitbreiding van een brand via een scheidingsconstructie of een open verbinding naar een andere ruimte.
- > Brandoverslag: uitbreiding van een brand via de buitenlucht.

De branduitbreiding kan door verschillende oorzaken plaatsvinden. Zo kan de branduitbreiding plaatsvinden door (Brandweeracademie, 2013a):

- > Rechtstreeks contact met de vuurhaard.
- > Als gevolg van vliegvluur.
- > Door uitstromende brandende vloeistoffen.
- > Door warmteoverdracht.
- > Door het bij ontstekings temperatuur in contact komen met zuurstof.

In dit onderzoek ligt de focus op de defensieve buiteninzet. Met de defensieve buiteninzet gaat het vooral om het voorkomen van brandoverslag. In het Bouwbesluit staan eisen opgenomen aan het maximale uitbreidingsgebied van een brand. Om te voorkomen dat het uitbreidingsgebied van een brand te groot wordt, zijn er eisen gesteld aan de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (WBDBO) (Eilander, 2005). Om brandoverslag te voorkomen hoeven maatregelen niet altijd te resulteren in bouwkundige brandwerendheid, maar kan de weerstand tegen brandoverslag ook worden gerealiseerd in een veilige afstand tussen gebouwen. Om te beoordelen of het brandoverslagrisico voldoende laag is, dient de warmtestralingsflux op een niet brandwerend geveldeel overal onder de grenswaarde van 15 kW/m<sup>2</sup> te blijven (Eilander, 2005).

In de komende hoofdstukken zal nader worden ingegaan op de warmteoverdracht en welke factoren van invloed zijn op brandoverslag. In de volgende paragrafen zullen eerst kort enkele voorkomende oorzaken van brandoverslag worden besproken.

### **3.2.2 Soorten brandoverslag**

#### ***Vliegvuur***

Brandoverslag kan plaatsvinden doordat (constructie-)materialen in contact komen met vliegvuur afkomstig van een brandend object en als gevolg daarvan zelf tot ontbranding komen (Carlsson, 1999). Vliegvuur bestaat uit brandende deeltjes welke zich over een grote afstand via de lucht kunnen verspreiden. Gebouwen kunnen beschermd worden tegen vliegvuur door toepassing van brandwerende gevelbekleding. Op zichzelf vormt vliegvuur onder de meeste omstandigheden weinig gevaar om tot brandoverslag te leiden. Anders wordt dit in combinatie met een hoge warmtestraling op een naburig gebouw. In deze gevallen kan het vliegvuur de pyrolysegassen die zijn ontstaan als gevolg van de warmtestraling wel doen ontbranden (Carlsson, 1999).

#### ***Vlamcontact***

Bij een brandend object of brandend materiaal wat in de buurt van een gebouw staat kunnen vlammen in direct contact komen met de gevel van dit gebouw. Dit kan ook gebeuren doordat vlammen via openingen in een brandend gebouw naar buiten slaan: een uitslaande brand. Hierbij is het van belang hoe groot de projectieafstand (horizontale uitbreiding) en grootte (verticale uitbreiding) van de vlam zijn. Deze hangen af van veel verschillende factoren, waaronder de vorm en grootte van de opening alsook de windcondities en de verbrandingssnelheid (Barnett, 1989; Carlsson, 1999; Deleu, 2009).

#### ***Convectie***

Brandoverslag kan ook plaatsvinden door de hitte die middels convectie wordt overgedragen. Dit kan plaatsvinden doordat hete rookgassen tegen een naastgelegen gebouw aankomen. Deze rookgassen kunnen temperaturen hebben die oplopen tot enkele honderden graden Celsius (McGuire, 1965). Wel moet het naastgelegen gebouw of brandbare materialen dicht bij het brandende gebouw liggen voordat convectie een brandoverslag kan veroorzaken (Carlsson, 1999). In paragraaf 3.3.2 wordt meer uitleg gegeven over convectie.

#### ***Straling***

Carlsson (1999) geeft aan dat warmtestraling in de meeste situaties zorgt voor brandoverslag naar een naastgelegen gebouw. Bij warmteoverdracht door straling is geen tussenstof nodig. Straling kan dan ook over een veel grotere afstand brandoverslag veroorzaken dan direct vlamcontact en convectie (McGuire, 1965). De ontvangen stralingswarmte is afhankelijk van de intensiteit waarmee de straling bij de brand wordt uitgezonden. Daarnaast is het afhankelijk van een zichtfactor. Een dergelijke factor houdt rekening met de geometrie van de straler, de afstand en de richting van de straling tot het punt waar de straling ontvangen wordt (Deleu, 2009). In onder andere paragraaf 3.3.3 wordt nader ingegaan op het principe van straling.



## 3.3 Warmteoverdracht

Warmte verplaatst zich van een voorwerp of omgeving met hoge temperatuur naar een voorwerp of omgeving met lagere temperatuur. Bij dit proces wordt er warmte (zijnde thermische energie) overgedragen. Bij de uitwisseling van warmte koelt het warme voorwerp door de afgifte van thermische energie af en zal het voorwerp met de lagere temperatuur door de opname van deze energie in warmte toenemen. De overdracht van warmte vindt in en tussen alle aggregatiestoestanden plaats. De warmteoverdracht gaat in principe door totdat de temperaturen van beide voorwerpen gelijk zijn (Tromp & Van Mierlo, 2013). Branduitbreiding door warmteoverdracht kan plaatsvinden doordat er bij iedere brand warmte vrijkomt. De totale warmte die door de brandende stof kan worden afgegeven is de verbrandingswarmte. Deze vorm van energie wordt weergegeven in de eenheid Joules per kilogram (J/kg). Zo ligt de verbrandingswarmte van hout tussen 17 en 20 MJ/kg en van stookolie tussen de 40 en 50 MJ/kg (Brandweeracademie, 2013b). Er zijn drie basisprincipes van warmteoverdracht: conductie, convectie en straling (Drysdale, 1985). Op deze drie vormen van warmteoverdracht zal hieronder nader worden ingegaan. Voor een meer diepgaande en natuurkundige uitwerking van de drie principes wordt verwezen naar bestudeerde bronnen zoals Drysdale (1985) en DiNunno en Forszell (2002).

### 3.3.1 Conductie

Eén van de basisprincipes binnen warmteoverdracht is conductie oftewel geleiding. Bij conductie wordt warmte binnen of door voorwerpen overgedragen zonder dat de materie zich verplaatst. Warmteoverdracht middels conductie vindt dan ook plaats binnen vaste stoffen (Tromp & Van Mierlo, 2013; Drysdale, 1985). Warmteoverdracht middels conductie vindt plaats wanneer een warm object in fysiek contact wordt gebracht met een kouder object: het warme object koelt vervolgens af en het koudere object warmt daardoor op (Rockett & Milke, 2002).

Het principe van conductie speelt vooral een rol in relatie tot het ontbranden van (vaste) stoffen en de voortplanting van vlammen over (brandbare) vaste stoffen. Daarnaast is het van belang wanneer wordt gekeken naar de brandwerendheid van compartimentsgrenzen en van de constructie van een gebouw (Drysdale, 1985).

Om te bepalen hoeveel warmte er bij conductie wordt overgedragen, spelen de temperatuurgradiënt, het contactoppervlak en de geleidbaarheid van de betrokken stoffen een rol. Daarbij is de temperatuurgradiënt het temperatuurverschil gedeeld door de afstand waarover dit temperatuurverschil aanwezig is. In een formule kan de warmtestroom veroorzaakt door conductie als volgt worden weergegeven (Tromp & Van Mierlo, 2013).

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Q = warmtestroom (W) (J/s)

$\lambda$  = warmtegeleidingscoëfficiënt (W/(m·K))

A = oppervlakte (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Verschil in temperatuur (K)

$\Delta x$  = Afstand (m)

#### Vergelijking 3.1 Warmtestroom

In sommige formules staat er een minteken voor het begin van de formule, omdat daar de warmte als afgestaan wordt beschouwd. De warmtegeleidingscoëfficiënt ( $\lambda$ ) verschilt per materiaal. Wanneer de overige omstandigheden gelijk zijn, zorgt een andere waarde voor de

warmtegeleidingscoëfficiënt voor een betere of slechtere geleiding van de warmte. Daarbij geldt dat hoe lager deze waarde is, hoe slechter het materiaal de warmte geleidt en dus hoe beter het materiaal isoleert. Zo is koper een goede geleider met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 387 W/(m·K) en toont de warmtegeleidingscoëfficiënt van polyurethaanschuim (PUR) met 0.034 W/(m·K) aan dat dit een goede isolator is tegen warmteoverdracht middels conductie (Drysdale, 1985).

### 3.3.2 Convection

Een tweede basisprincipe van warmteoverdracht is convection. Bij convection wordt warmte (thermische energie) overgedragen middels warmtestroming door verplaatsing van een vloeistof of een gas over een oppervlakte. De warmte stroomt als het ware mee met de bewegende vloeistof of het bewegende gas. In tegenstelling tot conductie is bij convection de tussenstof dus wel in beweging (Tromp & Van Mierlo, 2013). Bij brand speelt convection een rol van betekenis. Door convection wordt middels de beweging van hete rookgassen een grote hoeveelheid (chemische) energie die vrijkomt bij een brand, overgebracht naar de nabije omgeving (Atreya, 2002). Ook vlammen kunnen worden gezien als een vorm van convection. Echter, bij vlammen speelt warmteoverdracht door straling een grotere rol. Daarom wordt de warmteoverdracht door vlammen in het hoofdstuk over straling behandeld. Er worden twee typen convection onderscheiden. Allereerst is er de vrije convection. Hierbij vindt stroming plaats door een verschil in dichtheid veroorzaakt door opwarming, zoals dit bij opstijgende lucht boven een hete verwarming gebeurt. Daarnaast bestaat er gedwongen convection, waarbij de stroming wordt veroorzaakt door een opgewekt extern drukverschil. Een voorbeeld hiervan is de stroming van lucht opgewekt door een ventilator of door de aanwezige wind. Vanzelfsprekend kunnen beide typen van convection gelijktijdig optreden, wat resulteert in een gemengde vorm van hitteoverdracht door convection (Atreya, 2002; Tromp & Van Mierlo, 2013).

Zoals aangegeven kan het oppervlak van een (vast) voorwerp via convection afkoelen of opwarmen door langsstromend gas of langsstromende vloeistof. Bij het bepalen van de warmtestroom veroorzaakt door convection spelen het contactoppervlak en het temperatuurverschil een rol. Daarnaast is de warmteoverdrachtscoëfficiënt, die ook bekend staat als de convectioncoëfficiënt, ook van invloed op de warmtestroom. In formulevorm ziet dat er als volgt uit (Tromp & Van Mierlo, 2013):

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$$

Q = warmtestroom (W (J/s))

$\alpha$  = warmteoverdrachtscoëfficiënt (W/(m<sup>2</sup>·K))

A = oppervlakte (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = verschil in temperatuur tussen langsstromend gas/vloeistof en het oppervlak van het voorwerp (K)

#### Vergelijking 3.2 Convection coëfficiënt

De warmteoverdrachtscoëfficiënt (convectioncoëfficiënt) is in deze geen materiaalconstante. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de warmtegeleidingscoëfficiënt die een rol speelt in de conductie van warmte. De warmteoverdrachtscoëfficiënt is onder andere afhankelijk van de geometrie (vorm) van het vaste voorwerp en eigenschappen van het stromende medium. Ook wordt het beïnvloed door het verschil in temperatuur, de  $\Delta T$  (Drysdale, 1985). Zo heeft de warmteoverdrachtscoëfficiënt van lucht binnenshuis, waar weinig beweging is, een waarde van circa 3 W/(m<sup>2</sup>·K). Bij harde wind buitenshuis is dat, afhankelijk van de windsnelheid, 40 tot 100 W/(m<sup>2</sup>·K). Bij een brand in een besloten ruimte zorgt de brand voor de luchtbeving; hier wordt voor de coëfficiënt meestal een waarde van circa 25 W/(m<sup>2</sup>·K)

gebruikt (Tromp & Van Mierlo, 2013). Dus hoe sterker de stroming is, des te hoger zal de warmteoverdrachtscoëfficiënt zijn.

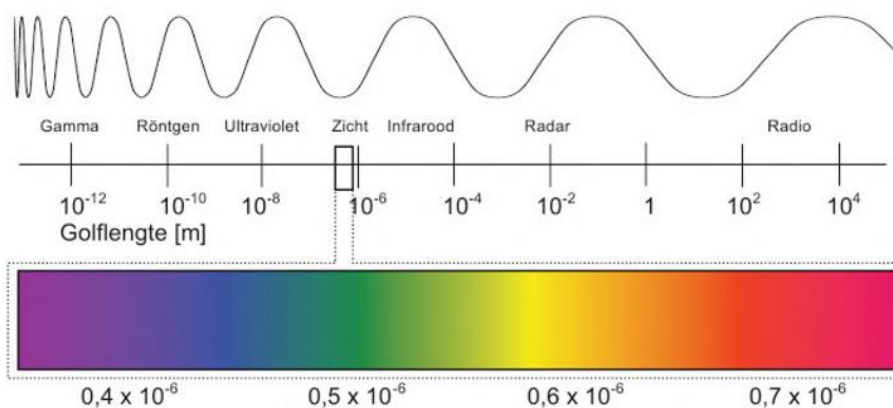
In de lesstof voor bevelvoerders wordt aangegeven dat bij een brand per definitie convectie plaatsvindt. Deze vorm van convectie staat ook wel bekend als thermiek. De lucht in een ruimte wordt immers opgewarmd door de brandhaard waardoor deze lucht gaat uitzetten en door het verschil in dichtheid in beweging komt. De verspreiding van warmte in een brandend gebouw is dan ook voor een deel toe te schrijven aan convectiestromen. Dit is tevens de oorzaak dat de brand binnen een gebouw zich vaak in verticale richting uitbreidt (Brandweeracademie, 2013a).

### 3.3.3 Straling

Een derde belangrijk basisprincipe van warmteoverdracht dat wordt onderscheiden is straling. Bij straling gaat het om energie (warmte) die wordt overgedragen tussen oppervlaktes (bijvoorbeeld muren, plafonds, vloeren, meubels, et cetera), maar ook om het uitstralen en absorberen van energie door (rook)gassen en koolstofdeeltjes. Kenmerkend voor warmteoverdracht door straling is dat de warmte zich kan voortplanten zonder tussenkomst van materie; het kan in verschillende energiegolven worden uitgezonden. Zo kan de energie uitgewisseld worden op een golflengte van bijvoorbeeld zichtbaar licht, infrarood of röntgen (Tromp & Van Mierlo, 2013).

#### **Relatie temperatuur en straling**

Alle materie met een temperatuur boven 0 Kelvin ( $\triangleq -273^{\circ}\text{C}$ ) zendt warmtestraling uit. In het algemeen geldt dat hoe warmer de materie is, hoe meer straling er wordt uitgezonden. Of deze straling voor het menselijk oog zichtbaar is, hangt af van de golflengte waarmee de straling wordt uitgezonden. Straling met een golflengte tussen ongeveer  $0,4 \times 10^{-6}$  m en  $0,7 \times 10^{-6}$  m zijn voor het menselijk oog zichtbaar (zie figuur 3.3) (Drysdale, 1985; Tromp & Van Mierlo, 2013).



**Figuur 3.3 Spectrum van straling met golflengtes en een uitvergroting van het voor ons oog zichtbare deel tussen ca. 0,4 en 0,7 micrometer (gekleurde balk) (Tromp & Van Mierlo, 2013)**

In het boek van Tromp en Van Mierlo (2013) is te lezen dat er een relatie bestaat tussen de temperatuur van een voorwerp en de golflengte waarin de straling wordt uitgezonden. Als een voorwerp namelijk heet genoeg is, straalt het voldoende licht uit in golflengten die met het menselijk oog zijn waar te nemen (zie figuur 3.3). Hierbij wordt aangegeven dat bij een voorwerp onder circa  $550^{\circ}\text{C}$  de warmtestraling niet zichtbaar is. Wanneer de temperatuur echter boven de circa  $550^{\circ}\text{C}$  komt, wordt straling zichtbaar als een diep rode kleur

(roodgloeiend). Bij een verder stijgende temperatuur loopt deze kleur over naar oranje, geel en wit (Tromp & Van Mierlo, 2013). De meeste vlammen bevinden zich, vanwege de temperatuur, in het zichtbare gedeelte van het spectrum. In het boek van Drysdale (1985) is onderstaande tabel te vinden waarin de relatie tussen temperatuur en kleur van hete objecten wordt weergegeven.

**Tabel 3.4 Zichtbare kleur van hete objecten (Drysdale, 1985)**

Temperatuur (°C)	Verschijsing
550	Eerst zichtbare rode gloed
700	Doffe rode kleur
900	Kersenrood
1000	Oranje
1400	Wit

Temperatuur heeft dus invloed op de straling van een voorwerp. Dit blijkt ook uit een basisvergelijking om stralingsintensiteit te berekenen die bekend staat als de wet van Stefan-Boltzmann. Met deze vergelijking wordt weergegeven hoe de uitgezonden stralingsintensiteit van een zwarte straler<sup>3</sup> (black body) is opgebouwd (Merci & Beji, 2016):

$$E = \sigma \cdot T^4$$

Met daarin;

$$E = \text{Stralingsintensiteit (W/m}^2\text{)}$$

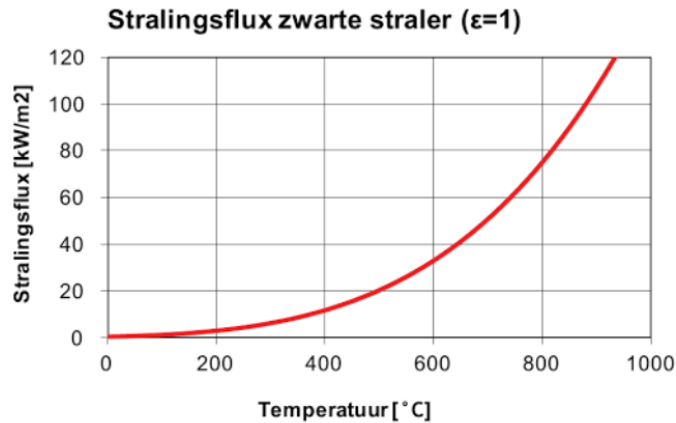
$$\sigma = \text{Stefan – Boltzmann constante} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$T = \text{absolute temperatuur (K)}$$

### Vergelijking 3.5 Wet van Stefan-Boltzmann

Uit de vergelijking voor de zwarte straler blijkt dat uitgezonden straling zeer sterk toeneemt bij een toename van de temperatuur. Straling is namelijk evenredig met de temperatuur tot de vierde macht. Dus wanneer de temperatuur twee keer zo hoog wordt, wordt de uitgezonden straling zestien maal zo hoog (Tromp & Van Mierlo, 2013). In figuur 3.6 is te zien dat uitgezonden straling sterk toeneemt bij een stijging in temperatuur. Het feit dat de  $\sigma$  (Stefan-Boltzmann constante) zo klein is, impliceert dat bij lage temperaturen de stralingsintensiteit relatief onbelangrijk is in de overdracht van warmte (Merci & Beji, 2016).

<sup>3</sup> Een zwarte straler is de (geïdealiseerde) perfecte straler, die onder de meest ideale omstandigheden de maximale stralingsintensiteit weergeeft. Bij een zwarte straler wordt aangenomen dat deze alle elektromagnetische straling die erop valt absorbeert en dus niet reflecteert. Hierdoor stijgt de temperatuur van de zwarte straler. De straler geeft de temperatuur aan de omgeving af in de vorm van elektromagnetische straling. In theorie zal een zwarte straler altijd op alle golflengten uitzenden. Een zwarte straler is een 'ideale uitzender' en zendt, gegeven de temperatuur, de maximaal mogelijke hoeveelheid energie per oppervlakte-eenheid uit op elke golflengte.



**Figuur 3.6** Uitgezonden straling door een zwarte straler ( $\epsilon = 1$ ) als functie van de temperatuur in °C (Tromp & Van Mierlo, 2013)

### **Invloed materiaal op uitgezonden straling**

Zoals aangegeven, geeft de wet van Stefan-Boltzmann de theoretisch maximale stralingsintensiteit (per vierkante meter) weer van een voorwerp met een bepaalde temperatuur. In de praktijk zal een voorwerp minder vermogen uitzenden, waardoor er een correctie op de vergelijking nodig is. Hiertoe wordt de emissiecoëfficiënt  $\epsilon$  in de formule geïntroduceerd:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Met daarin:

$\epsilon =$  emissiecoëfficiënt van materiaal (dimensieloos)

### **Vergelijking 3.7 Emissiecoëfficiënt**

Deze emissiecoëfficiënt kent geen dimensie en heeft een waarde die ligt tussen 0 en 1 ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ). De emissiecoëfficiënt kan afhankelijk zijn van de richting en golflengte waarin de straling wordt uitgezonden. Vooral bij het uitzenden van straling door gassen kan dit van belang zijn. In de meeste gevallen volstaat het echter om te rekenen met het principe van een 'grijze straler' waarbij de afhankelijkheid van de golflengtes en richtingen wordt genegeerd (Merci & Beji, 2016). De emissiecoëfficiënt  $\epsilon$  is afhankelijk van het materiaal van het voorwerp. In de praktijk blijkt de emissiecoëfficiënt van vaste stoffen vaak niet nauwkeurig bekend te zijn. Voor de meeste bouwmaterialen wordt  $\epsilon = 1$  dan ook als acceptabele veilige aanname gebruikt, omdat dit immers het grootste getal zal geven. Ook vlammen kunnen worden gezien als een voorwerp dat straling uitzendt, al kennen vlammen enige doorzichtigheid. Als de vlammen dik genoeg zijn wordt voor  $\epsilon$  een waarde van 1 als reële aanname gebruikt (Tromp & Van Mierlo, 2013).

In Tromp en Van Mierlo (2013) is onderstaande tabel 3.8 opgenomen met de emissiecoëfficiënten van enkele veel toegepaste constructiematerialen.

Tabel 3.8 Emissiecoëfficiënt van verschillende materialen (Trom & Van Mierlo, 2013)

Materiaal	$\epsilon$ (richtwaarde)
Beton (bij brand)	0,7
Staal (bij brand)	0,7
Hout (bij brand)	0,8
Gips (bij brand)	0,8
Aluminiumplaat	0,09
Rode baksteen	0,93
Glas	0,85 – 0,95
Verf (niet-metallic)	0,8 – 1,0
Verf (zwart, mat)	0,97

Bij deze tabel wordt door de auteurs aangegeven dat in de praktijk de emissiecoëfficiënt van vaste stoffen vaak niet nauwkeurig bekend is. Daarom wordt voor de meeste bouwmaterialen een emissiecoëfficiënt met waarde 1 als acceptabele veilige aanname gebruikt (Tromp & Van Mierlo, 2013). De waarden uit tabel 3.8 geven weer dat bouwmaterialen zoals beton, staal en glas relatief gemakkelijk warmte uitstralen en dus relatief gemakkelijk hun warmte verliezen als gevolg van de straling. Aluminiumplaten hebben daarentegen een lage emissiecoëfficiënt en zijn dus een voorbeeld van een bouw materiaal waarmee de warmte-emissie sterk wordt beperkt.

### **Stralingspectra**

De wet van Stefan-Boltzmann is samen met enkele andere wetmatigheden (zoals de wet van Wien) gecombineerd tot de stralingswet van Planck. Met deze stralingswet kunnen stralingsintensiteiten worden bepaald als functie van de verschillende golflengten. De straling die door temperatuur van een voorwerp ontstaat vertoont namelijk een continu spectrum. Dat wil zeggen dat straling van alle golflengtes erin voorkomt, maar de intensiteit hiervan kan verschillen. Al eerder is aangegeven dat zwarte stralers de werkelijkheid goed benaderen. De natuurkundige Planck heeft aan de hand van deze zwarte stralers de intensiteit van straling weergegeven als functie van de temperatuur en golflengte waarin de straling wordt uitgezonden. Met andere woorden, middels de wet van Planck kan weergegeven worden hoeveel licht van welke golflengte er wordt uitgezonden bij een bepaalde temperatuur. De formule die Planck hiervoor heeft opgesteld luidt:

$$I_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Met daarin:

$I(\lambda,T)$  = stralingsintensiteit bij gegeven golflengte en temperatuur ( $W/m^2$ )

$h$  = constante van Planck ( $J/s$ )

$c$  = lichtsnelheid (in het beschouwd medium) ( $m/s$ )

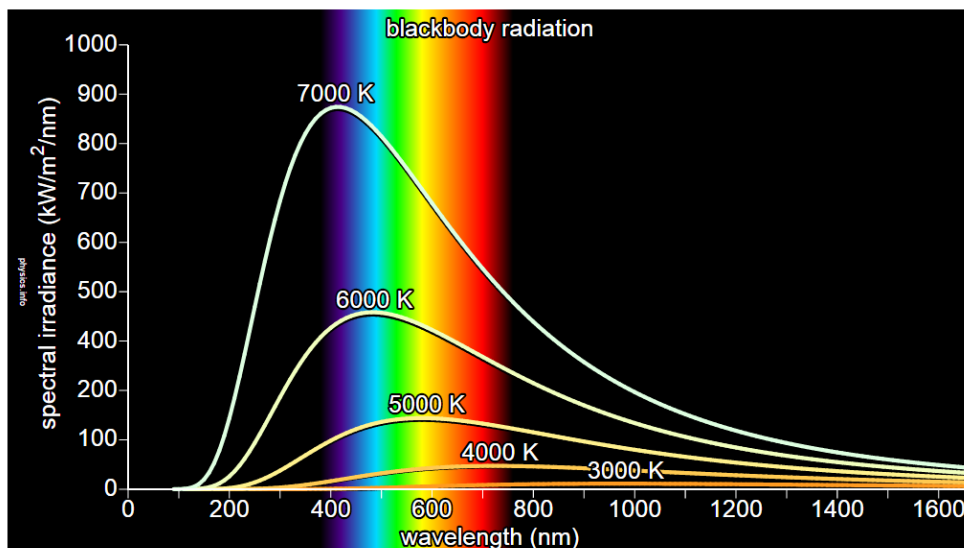
$\lambda$  = golflengte ( $m$ )

$k_B$  = constante van Stefan Boltzmann ( $J/K$ )

$T$  = temperatuur ( $K$ )

### Vergelijking 3.9 Stralingsintensiteit afhankelijk van golflengte en temperatuur

Aan de hand van deze formule kan voor een ideale zwarte straler zogenaamde Planckkrommes worden bepaald. Deze grafieken geven de intensiteit van straling voor de verschillende golflengtes bij een bepaalde temperatuur weer. In onderstaande figuur zijn de Planckkrommes weergegeven voor zwarte stralers met een temperatuur van 7000K, 6000K, 5000K, 4000K en 3000K.

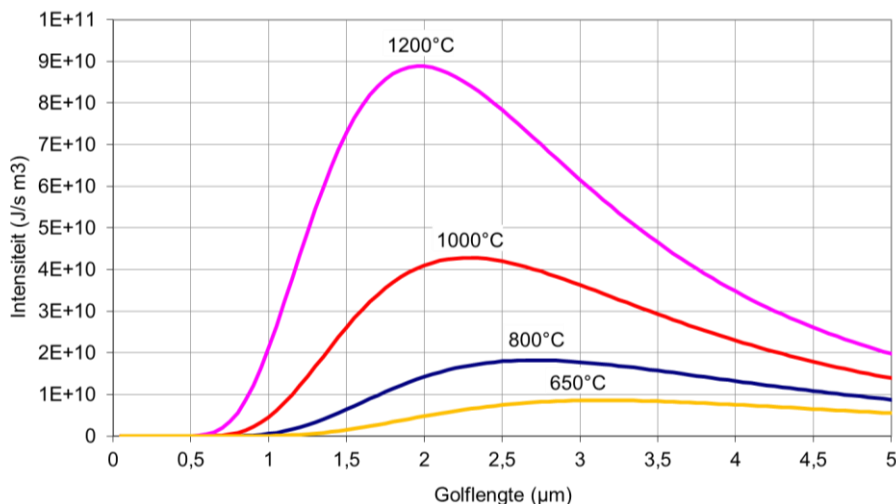


**Figuur 3.10 Planckkrommes voor zwarte stralers met verschillende temperaturen (Physics.info, n.d.)**

De Planckkrommes laten zien dat bij verschillende temperaturen de piek in stralingsintensiteit bij verschillende golflengtes wordt bereikt. Ook laat het zien dat hoe hoger de temperatuur van de zwarte straler is, hoe kleiner de golflengte waarop de meeste intensiteit wordt gegenereerd. De totale stralingsintensiteit van de zwarte straler bij een bepaalde temperatuur kan bepaald worden door het oppervlakte te berekenen die onder de bijhorende grafiek ligt.

In het rapport van de Brandweeracademie (2015) is met behulp van de wet van Planck gekeken naar het stralingsspectrum van een zwarte straler in het temperatuurbereik van vlammen. Daarbij is aangenomen dat de hitte van vlammen bij een brand meestal variëren tussen 650 en 1200 °C. In figuur 3.11 is goed te zien dat de stralingsintensiteit sterk afhankelijk is van de temperatuur. Daarbij valt op dat de pieken in stralingsintensiteit vooral bereikt worden

bij golflengtes tussen 1,75 en 3  $\mu\text{m}$ . Dit is van belang bij de absorptie van stralingsenergie door water, waar in paragraaf 4.3 op wordt teruggekomen.



**Figuur 3.11 Stralingsspectrum van een zwarte straler**  
(Brandweeracademie, 2015)

### **Straling door vlammen**

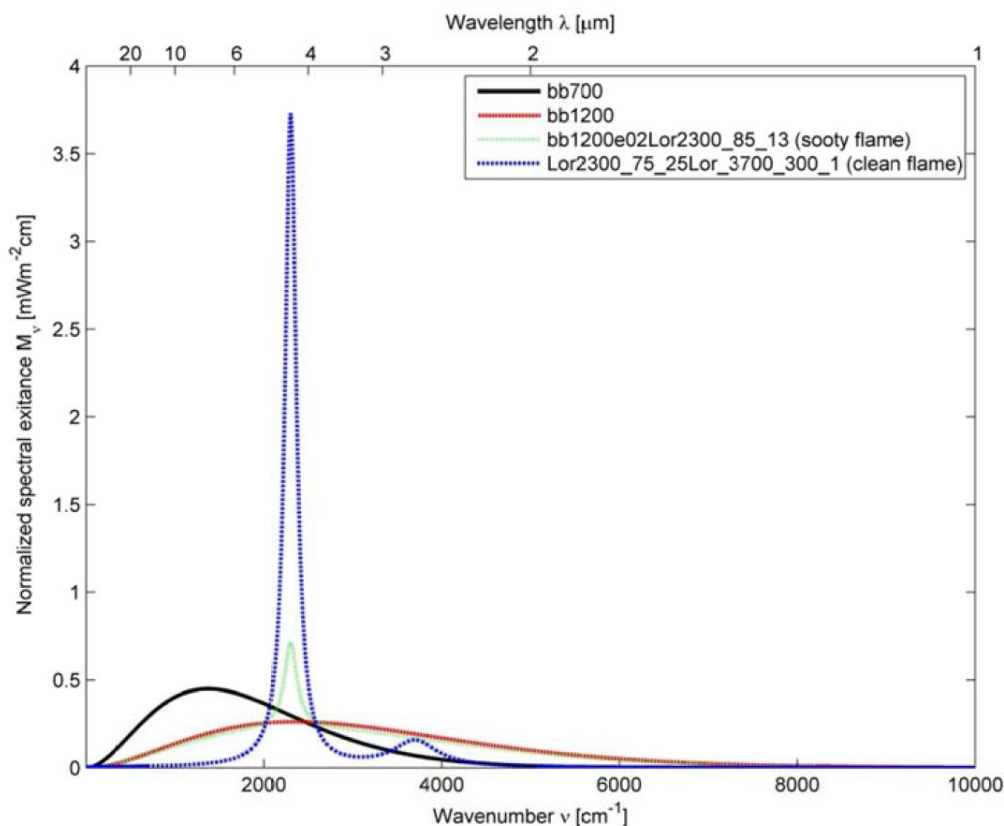
Bij een brand wordt door vlammen straling naar de omgeving uitgezonden. In een vlam reageert zuurstof met de ontledingsgassen van de aanwezige brandstof. Daarbij zijn vlammen het zichtbare deel van het reactiegebied: gassen en vaste deeltjes zenden daar zichtbare straling (licht) uit. De uitgezonden straling bestaat uit warmtestraling van hete deeltjes in de vlammen en uit straling die wordt uitgezonden bij het veranderen van de energietoestand van de elektronen in de atomen. Bij natuurlijke branden wordt de meeste zichtbare straling veroorzaakt door het gloeien van hete vaste (koolstof)deeltjes in de vlammen (Tromp & Van Mierlo, 2013).

Vlammen kunnen worden onderscheiden in twee verschillende typen: de diffusievlam en de voorgemengde (zuivere) vlam. Bij een diffusievlam vermengt de zuurstof zich vanaf de buitenzijde in de opstijgende brandbare gassen. Bij een voorgemengde vlam wordt de zuurstof al voor ontsteking gemengd met de brandbare gassen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij een gasfornuis (Tromp & Van Mierlo, 2013). Een diffusievlam kan laminair of turbulent zijn. Laminaire vlammen zijn stabiel in hun voorkomen, zoals de vlam van een brandende kaars. De hoogste temperaturen bevinden zich bij deze vlammen aan de rand van de vlam. Bij turbulente vlammen verandert het stromingspatroon juist continu, waardoor de verbranding in een dergelijke vlam instabiel is. De temperatuur neemt afwisselend af om vervolgens bij toevoer van meer zuurstof weer in temperatuur toe te nemen. Bij praktisch alle branden waar de brandweer voor wordt ingezet en sprake is van grotere vlammen, zal sprake zijn van turbulente diffusievlammen (Tromp & Van Mierlo, 2013).

Zoals aangegeven veroorzaken aanwezige koolstofdeeltjes bij diffusievlammen het grootste gedeelte van de warmtestraling. Het gloeien van deze koolstofdeeltjes (zoals roet) geeft de vlam zijn gele kleur en zijn helderheid. Enerzijds zijn het de aanwezige koolstofdeeltjes die straling veroorzaken, anderzijds zorgen ook in een vlam aanwezige moleculen voor straling. Elke moleculaire verbinding zendt daarbij straling uit in een relatief beperkt golflengtegebied. Met een vlam wordt de meeste straling uitgezonden door  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  moleculen (Tien, Lee, & Stretton, 2002; Drysdale, 1985). In een weergave van het stralingsspectrum van een vlam zullen dan ook op de golflengtes waarin  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  hun straling uitzenden, pieken zijn te zien. Aanwezige zuivere moleculen zoals zuurstof ( $\text{O}_2$ ) en stikstof ( $\text{N}_2$ ) hebben geen



significante invloed op de uitgezonden straling van een vlam. Bij een voorgemengde (zuivere) vlam domineert de straling die wordt uitgezonden door moleculaire verbindingen en is de straling afkomstig van koolstofdeeltjes verwaarloosbaar klein (Försth & Möller, 2013).



**Figuur 3.12** Grafiek met vier stralingsspectra van zwarte straler (700K en 1200K), koolstofvlam en zuivere vlam (Försth & Möller, 2013)

Om de stralingsintensiteit van een vlam te berekenen kan gebruik worden gemaakt van de eerdergenoemde stralingsformule  $E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ . Ook hier komt de emissiviteitscoëfficiënt  $\varepsilon$  terug. De emissiviteit wordt daarbij vooral bepaald door de concentratie van aanwezige koolstofdeeltjes, eigenschappen van deze koolstofdeeltjes en de dikte van de vlam (Försth & Möller, 2013). Omdat bij voorgemengde vlammen weinig koolstofdeeltjes aanwezig zijn, hebben deze vlammen een lage emissiefactor (Drysdale, 1985). Bij vlammen zoals vrijkomend bij een brand in een gebouw spreken we dan ook alleen van diffusievlammen. Bij het berekenen van de straling door diffusievlammen wordt aangenomen dat deze zich als een grijze straler gedragen en daarbij de emissiecoëfficiënt onafhankelijk is van de golflengte waarin de straling wordt uitgezonden. Voor gewone vlammen varieert de emissiviteit daarbij van 0.3 tot 0.8 (Deleu, 2009). Voor vlammen vanaf een bepaalde grootte wordt zelfs aangenomen dat deze zich gedragen als een zwarte straler en deze een emissiecoëfficiënt hebben van  $\varepsilon = 1$ . Er zijn verschillende waarden gevonden vanaf welke vlamdikte de emissiecoëfficiënt een waarde heeft van 1. Zo staat in Drysdale (1985) te lezen dat bij koolwaterstofbranden de vlammen een dikte moeten hebben van meer dan 1 meter terwijl Tromp en Van Mierlo (2013) het hebben over een dikte van meer dan 10 meter. In Merci en Beji (2016) wordt aan de hand van een vergelijking weergegeven dat vlammen met een grootte van 2 meter zwarte stralers benaderen. Drysdale (1985) geeft de volgende

formule om de emissiviteit van vlammen te bepalen aan de hand van een brandstofafhankelijke absorptiecoëfficiënt en de vlamdikte:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-\alpha \cdot d_f}$$

Waarbij:

$\varepsilon_f$ : de emissiviteit van de vlam

$\alpha$ : absorptiecoëfficiënt

$d_f$ : de dikte van de vlam (m)

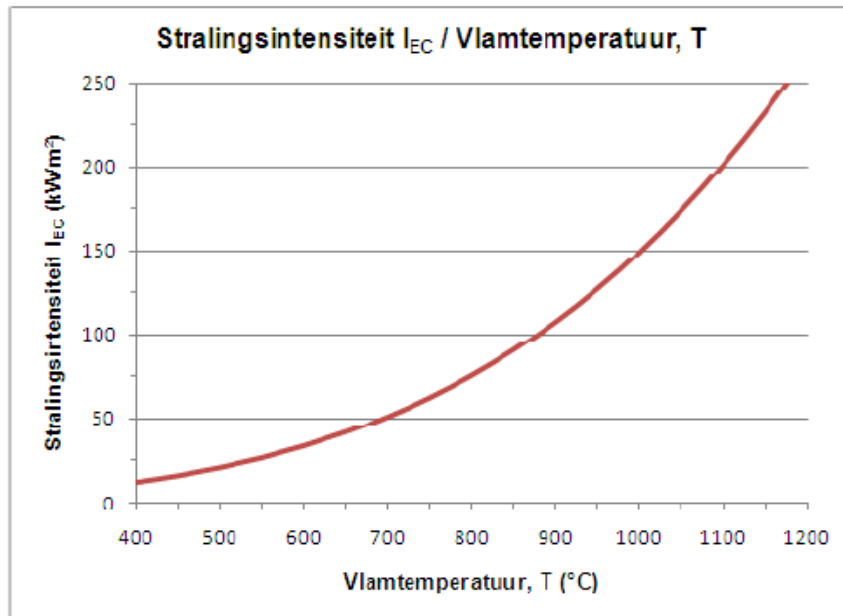
### Vergelijking 3.13 Emissiviteit en vlamdikte

Voor enkele materialen staat de absorptiecoëfficiënt in onderstaande tabel.

**Tabel 3.14 Absorptiecoëfficiënt voor bepalen emissiviteit van vlam (Drysdale, 1985)**

Materiaal	Absorptiecoëfficiënt
Dieselolie	0.43
PPMA	0.50
Polystyreen	1.20
Hout	0.50 – 0.80
Meubels	1.13

De emissiviteit van vlammen afkomstig van kunststoffen is over het algemeen hoger dan die van hout. Voor vlammen met een dikte  $d_f$  van meer dan 1 meter wordt de emissiviteit vaak gelijkgesteld aan 1, waardoor een conservatieve, veilige benadering wordt gekozen (Deleu, 2009). In regelgeving kunnen andere voorwaarden of getalwaarden zijn opgenomen. Zo staat in de NEN6068 weliswaar een vergelijkbare vergelijking voor vlammen uit gevelopeningen, maar wordt aangegeven dat de emissiecoëfficiënt voor vlammen uit dakopeningen een waarde  $\varepsilon_f$  hebben van 0,7 (NEN6068, 2016). Wanneer er wordt gewerkt met een emissiecoëfficiënt voor vlammen van  $\varepsilon_f = 1$  kan onderstaande grafiek worden weergegeven, waarvan de stralingsintensiteit van een vlam afhankelijk is van de temperatuur.



**Figuur 3.15** Uitgezonden stralingsintensiteit afhankelijk van de vlamtemperatuur met  $\epsilon=1$  (Deleu, 2009)

In de hoogte van de stralingsintensiteit veroorzaakt door uitslaande vlammen speelt temperatuur een belangrijke rol. Bij een full-scale experiment van Ondrus (1985) werd 184 kilogram aan houten kisten in brand gestoken in een gebouw met drie verdiepingen. Daarbij werden net buiten het raam vlamtemperaturen gemeten van 900 tot 950 °C. De temperatuur van de vlam neemt vervolgens af voor punten die op grotere horizontale of verticale afstand van het raam bevinden. Ook in Drysdale (1985) worden enkele experimenten behandeld waarin is gekeken naar maximale vlamtemperaturen. Daarbij zijn temperaturen gevonden die in dezelfde orde van grootte liggen als gevonden door Ondrus (1985).

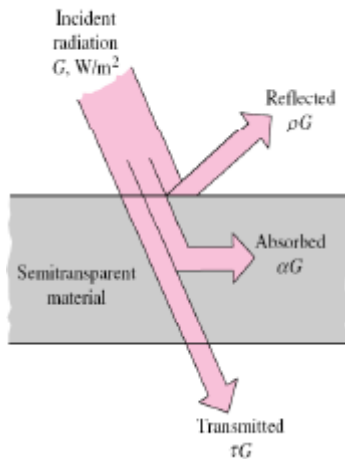
Ook de vorm en hoogte van vlammen die vrijkomen bij branden in industriële panden zijn belangrijk in het overslaan van een brand naar een naburig gebouw. Ingason en Lönnermark (2011) geven aan dat hierover erg weinig gevalideerde informatie beschikbaar is. Dit komt vooral doordat dit soort informatie in de praktijk niet geregistreerd wordt, terwijl het van groot belang is om het risico op brandoverslag tussen gebouwen te berekenen (Ingason & Lönnermark, 2011).

In de praktijk speelt rookvorming een rol in de uitgezonden straling door vlammen. De rook kan een gedeelte van de aanwezige gloed afdekken, waardoor een percentage van de straling wordt afgevangen. Ook is er vaak geen sprake van een constante vlam (zie opmerking over turbulente vlammen op pagina 24) waardoor de uitgezonden straling verschilt. De in deze paragraaf gepresenteerde formule om de straling van een vlam te berekenen geldt dus alleen voor een ideale vlam in een onbelemmerde situatie, waarin het bijvoorbeeld niet wordt afgeschermd door aanwezige rook.

#### **Ontvangen van thermische straling**

Een voorwerp zendt niet alleen thermische straling uit, maar ontvangt ook thermische straling van andere voorwerpen. Niet alle ontvangen straling wordt door een voorwerp daadwerkelijk geabsorbeerd. De invallende thermische straling kan worden getransmitteerd ( $\tau$ ), geabsorbeerd ( $\alpha$ ) of gereflecteerd ( $\rho$ ). In totaal moet dus gelden dat  $\tau + \alpha + \rho = 1$ .

Bij transmittieren wordt de straling die een oppervlakte ontvangt direct door het materiaal heengezonden. Meestal is er sprake van een ondoorzichtig oppervlakte waardoor straling niet getransmitteerd kan worden en  $\tau$  een waarde heeft van 0. Bij zwarte stralers wordt ervan uitgegaan dat deze geen straling reflecteren. In deze gevallen is naast  $\tau$  ook  $\rho$  gelijk aan 0 en wordt voor deze stralers aangenomen dat alle straling wordt geabsorbeerd (Merci & Beji, 2016). In onderstaande figuur zijn de verschillende manieren weergegeven waarop een oppervlakte de straling kan ontvangen.

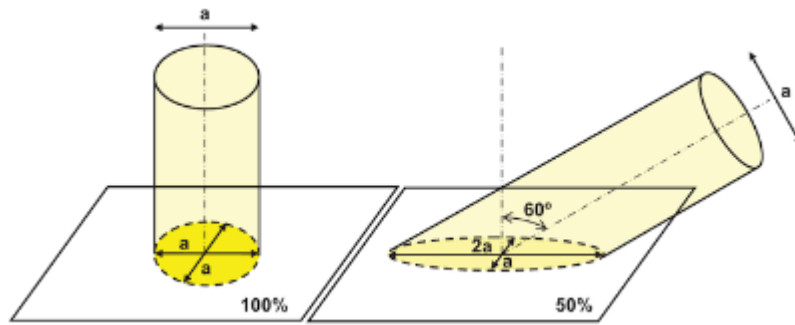


**Figuur 3.16 Manieren waarop straling kan worden ontvangen (Universiteit Twente, 2014)**

### **Zichtfactor**

Voor een ontvanger van straling speelt het een rol vanuit welke richting deze straling wordt ontvangen (Tromp & Van Mierlo, 2013). Zo kan de straling vanuit (bijna) één richting komen in gevallen waarin de stralingsbron, gezien vanuit de ontvanger, erg klein is. Een voorbeeld hiervan is de zon gezien vanaf de aarde.

Bij straling die wordt ontvangen vanuit één richting, is de straling die loodrecht op de ontvanger valt maximaal. Wanneer deze hoek verandert, wordt de bundel met straling over een groter oppervlak verspreid en ontvangt de ontvanger per oppervlakte-eenheid minder straling (Tromp & Van Mierlo, 2013). In figuur 3.17 is dit principe weergegeven. Daarbij geldt dat de ontvangen straling evenredig is met de cosinus van de hoek tussen de invallende straling en de loodlijn op het ontvangende oppervlak. In figuur 3.17 is dat een hoek van  $60^\circ$ . Omdat de cosinus van  $60^\circ$  een half is, is de ontvangen stralingsintensiteit per oppervlakte-eenheid in de rechter situatie de helft van de linker situatie.



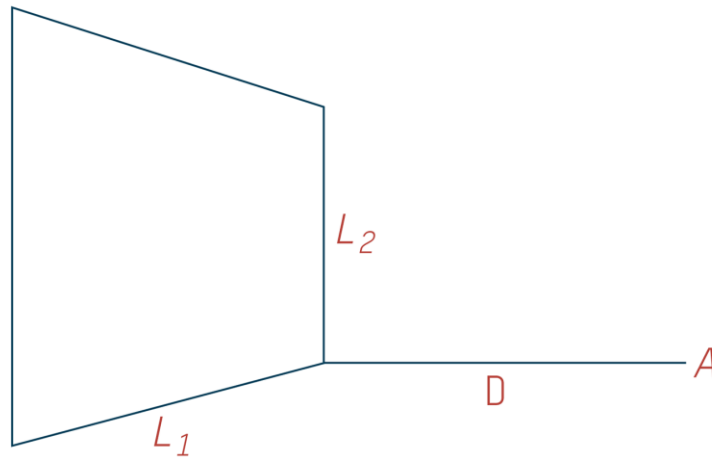
**Figuur 3.17** Invloed van de hoek van de invallende straling op de intensiteit van de ontvangen straling (Tromp & Van Mierlo, 2013)

Wanneer de ontvanger dichtbij een stralingsbron staat, ontvangt deze de straling vanuit meerdere richtingen. Dit speelt bijvoorbeeld een rol bij een groot brandend gebouw dichtbij de ontvanger. Daarbij is de straling die een voorwerp ontvangt afhankelijk van de richtingen waarin de ontvanger de zender 'ziet'. In die gevallen waarin de ontvanger straling ontvangt vanuit meerdere richtingen gaat de zichtfactor (viewfactor) een rol spelen (Tromp & Van Mierlo, 2013) (zie voor meer informatie over de zichtfactor ook bijlage 2).

De zichtfactor wordt ook wel de geometrische factor of de configuratiefactor genoemd. Met de zichtfactor wordt bepaald welke fractie van stralingsenergie die een stralend oppervlak uitzendt bij het blootgestelde oppervlak aankomt. Daarbij hangt een zichtfactor af van het oppervlakte van het zendende voorwerp en de afstand tussen de zender en ontvanger. In feite is de zichtfactor een vermenigvuldigingsfactor om vanuit de uitgezonden straling van een vlak de ontvangen straling op een ander vlak te berekenen. De zichtfactor heeft een waarde die ligt tussen 0 en 1 (Tromp & Van Mierlo, 2013). Waarden van zichtfactoren voor verschillende geometrieën, verschillende hoogtes, breedtes en afstanden kunnen exact berekend worden, maar in veel gevallen ook afgeleid worden van formules en tabellen uit de literatuur (Deleu, 2009).

### ***Straling vanaf gebouwgevel***

Bij brandoverslag tussen twee gebouwen speelt de straling van een gebouwgevel een belangrijke rol. In Deleu (2009) wordt aan de hand van een voorbeeld weergegeven hoe de zichtfactor bepalend is voor de stralingsenergie die op de blootgestelde gevel valt. Dit voorbeeld wordt hieronder weergegeven. Het oppervlakte element A bevindt zich loodrecht boven het hoekpunt van de stralingsbron, het vlak L1-L2. Het vlak waarin A zich bevindt (wordt hier niet getoond) is evenwijdig met het vlak L1-L2.



**Figuur 3.18** Het oppervlakte element A bevindt zich loodrecht boven de hoek van de stralingsbron (vlak L1-L2).

De zichtfactor kan in dit geval berekend worden met de volgende formule (Deleu, 2009).

$$\phi_A = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \left( \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

**Vergelijking 3.19** Zichtfactor in geval de stralingsbron zich loodrecht bevindt boven de hoek van het blootgesteld oppervlak

Waarbij:

$\phi_A$  = zicht factor

$$X = \frac{L_2}{D}$$

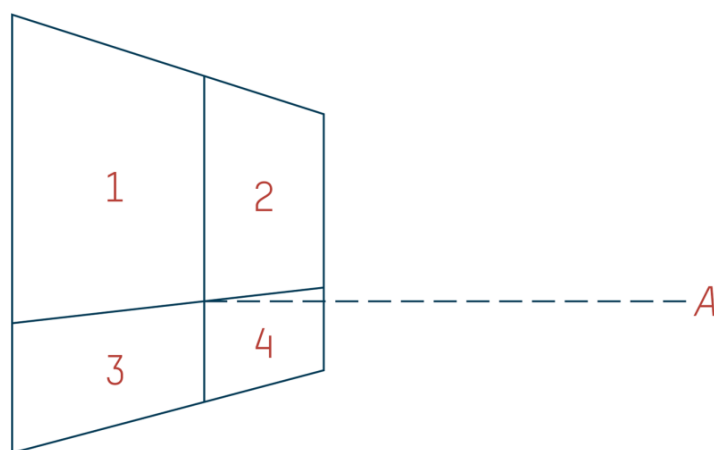
$$Y = \frac{L_1}{D}$$

D = Afstand van punt A tot aan de straler (m)

L<sub>2</sub> = Hoogte van de rechthoek (m)

L<sub>1</sub> = Breedte van de rechthoek (m)

Bij een punt op een afstand van een stralende gevel kan de gevel worden opgedeeld in vier kwadranten. Een voorbeeld hiervan is in onderstaande figuur weergegeven.



**Figuur 3.20** Zichtfactor voor een combinatie van blootgestelde oppervlakken

Punt A bevindt zich voor elk van de vier kwadranten loodrecht boven een hoekpunt. Door voor elk van de vier kwadranten vervolgens afzonderlijk met bovenstaande vergelijking de zichtfactor op punt A te bepalen, kan een totale zichtfactor  $\varnothing_{\text{tot}}$  worden berekend. De totale zichtfactor voor punt A is:

$$\varnothing_{\text{tot}} = \varnothing_1 + \varnothing_2 + \varnothing_3 + \varnothing_4$$

#### **Vergelijking 3.21** Totale zichtfactor

De straling die punt A daarbij ontvangt kan vervolgens worden berekend volgens de vergelijking:

$$E = \varnothing_{\text{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

#### **Vergelijking 3.22** Ontvangen stralingsflux

### **3.3.4** Dominante mechanismen bij brandoverslag

Bij de opwarming van een voorwerp spelen zowel conductie, convectie als straling een rol. De mate waarin conductie, convectie of straling een rol speelt bij de opwarming en de uiteindelijke ontsteking van een voorwerp hangt onder andere af van:

- > de temperatuur en het materiaal
- > de oriëntatie van het materiaal
- > eventuele luchtstromingen als wind of ventilatie (Tromp & Van Mierlo, 2013).

Een bepaalde vorm van warmteoverdracht is dominant in een bepaald brandstadium of op een bepaalde locatie. Zo bepaalt vooral conductie de snelheid van warmteoverdracht in en door vaste stoffen. Conductie is bijvoorbeeld belangrijk wanneer het gaat over de ontbranding en verspreiding van vlammen over brandbare voorwerpen en over de weerstand tegen brand van constructieonderdelen. Het speelt bijvoorbeeld een rol in het transport van warmte bij brand in een gebouw naar de buitenzijde van de gevel. Warmteoverdracht door convectie komt in alle brandstadia voor en is vooral belangrijk tijdens de eerste stadia van de brand waar temperaturen en stralingsniveaus nog relatief laag zijn. Bij deze stadia speelt straling nog een relatief beperkte rol. Echter, bij een grotere brand en oplopende temperaturen wordt de straling al snel dominant (Merci & Beji, 2016). Dit komt doordat de uitgezonden straling evenredig is met de temperatuur tot de vierde macht. Zo geeft Drysdale (1985) aan dat straling de dominante vorm van warmteoverdracht wordt bij branden die

groter zijn dan 0,3 meter. Ook bij vlammen speelt straling al snel een grotere rol dan convectie in het proces van warmteoverdracht. Zo geeft Tien et al. (2002) aan dat straling de dominante modus van warmteoverdracht is voor vlammen die een lengte hebben van meer dan 0,20 meter. Voor vlammen die kleiner zijn dan 0,20 meter wordt de meeste warmte nog wel via convectie naar de omgeving overgedragen (Tien et al., 2002). Ook in het rapport van Carlsson (1999) is te lezen dat ontbranding als gevolg van straling de meest gebruikelijke vorm van brandoverslag tussen twee gebouwen is en dit bovendien over veel grotere afstand plaats kan vinden dan bijvoorbeeld brandoverslag door direct vlamcontact.

Wanneer wordt gekeken naar het vrijkomende vermogen bij een brand komt ongeveer 70 procent vrij als convectief vermogen, dus als opwarming van gassen die vervolgens opstijgen. De overige 30 procent komt vrij als straling die de hele omgeving opwarmt die vanuit de brand (in alle richtingen) zichtbaar is. Vanwege de verhouding 70 tot 30 procent lijkt het dat straling minder belangrijk is dan convectie. Hierbij moet echter het belang van de oriëntatie worden meegenomen. De warmte die door convectie wordt getransporteerd stijgt namelijk vooral op terwijl straling in alle richtingen wordt uitgezonden. Door straling kunnen dus voorwerpen op enige afstand van zowel de brand als de hete rook tot boven hun ontbrandingstemperatuur worden verhit: een mechanisme dat vooral bij brandoverslag van belang is. Daarom en door de evenredigheid van temperatuur tot de vierde macht is straling zeer belangrijk als vorm van warmteoverdracht bij brand (Tromp & Van Mierlo, 2013).

In een onderzoek van Oleszkiewicz (1989) is gekeken naar de bijdrage van convectie en van radiatie in de warmteoverdracht bij brand vanuit de opening in een gebouw naar de bovenliggende gevel. In zijn experimenten bleek dat ongeveer 60 procent van de opgenomen warmte werd overgedragen door straling en daarmee meer bijdraagt aan de opwarming van de gevel (Oleszkiewicz, 1989).

Alle drie de vormen van warmteoverdracht hebben dus hun eigen invloed op het veroorzaken van brandoverslag. Wanneer wordt gekeken naar de grootste invloed, dan worden er verschillende getallen genoemd. Voor branden van enige omvang is in de literatuur wel consensus dat straling de grootste invloed heeft op warmteoverdracht in de directe omgeving. Het is dan ook de warmtestraling die als maatgevende vorm van warmteoverdracht wordt gehanteerd om brandoverslagrisico's tussen gebouwen te berekenen en in kaart te brengen. Bij brandoverslag gaat het echter niet alleen om warmteoverdracht vanuit de bron, maar speelt ook de opwarming en uiteindelijke ontbranding van het ontvangende object een rol. Hierop wordt in de volgende paragraaf ingegaan.

### 3.3.5 Opwarming en ontbranding van een voorwerp

#### **Opwarming van een voorwerp**

Zoals hierboven is aangegeven kan een voorwerp warmte uitwisselen met zijn omgeving via conductie, convectie en straling. Daarbij wordt er energie van een warm voorwerp overgebracht naar een kouder voorwerp. Deze temperatuurstijging van een voorwerp is gelijk aan (Tromp & Van Mierlo, 2013):

$$\Delta T = \frac{E}{c \cdot m}$$

$\Delta T$  = temperatuurstijging (K);  $E$  = toegevoegde energie (J)  
 $c$  = soortelijke warmtecapaciteit ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ );  $m$  = massa (kg)

#### Vergelijking 3.23 Temperatuurstijging van voorwerp



Bij de opwarming van een voorwerp komt het bijna niet voor dat deze overal in dezelfde mate wordt verwarmd. Hierdoor is de temperatuur van het voorwerp niet overal gelijk. Doordat het voorwerp aan één zijde wordt verwarmd, heeft het een inwendig verlopende temperatuur (gradiënt). De opwarming van de zijde die rechtstreeks wordt verwarmd hangt ook af van de snelheid waarmee de warmte naar de koude zijde wordt afgevoerd. Daarbij spelen de volgende eigenschappen van een voorwerp een rol (Tromp & Van Mierlo, 2013):

- > De soortelijke warmtecapaciteit (c): hoge capaciteit → langzame opwarming
- > De dichtheid (ρ): hoge dichtheid → langzame opwarming
- > De geleidbaarheid (λ): hoge geleidbaarheid → langzame opwarming.

Het product van deze drie eigenschappen wordt thermische traagheid genoemd, waarmee een maat wordt gegeven voor de snelheid waarmee de temperatuur in een voorwerp opneemt. In formulevorm wordt de thermische traagheid weergegeven als  $\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$ . Een hoge waarde voor de thermische traagheid geeft aan dat de temperatuur van het betreffende voorwerp maar langzaam toeneemt bij verwarming. Een lage waarde voor de thermische traagheid betekent dat verwarming van dit voorwerp juist snel tot temperatuurverhoging leidt. Dit betekent niet dat voorwerpen met een lage waarde voor de thermische traagheid altijd sneller ontsteken dan stoffen met een hoge thermische traagheid. Dit komt doordat de ontbranding plaatsvindt bij het bereiken van een bepaalde ontstekings temperatuur die bij verschillende stoffen sterk kan verschillen (Tromp & Van Mierlo, 2013).

### ***Ontbranding van een voorwerp***

Zoals hierboven is toegelicht stijgt een voorwerp in temperatuur wanneer energie wordt toegevoerd. Wanneer een voorwerp wordt verwarmd, wordt als eerste een temperatuur bereikt waarbij de stof begint te ontleden en ontledingssgasen vrijkomen. Wanneer het vlampunt van de stof wordt bereikt, kunnen deze ontledingssgasen bij voldoende zuurstof en een externe ontstekingsbron tot ontbranding komen. Wordt de temperatuur verder verhoogd dan kunnen stoffen hun zelfontbrandingstemperatuur bereiken. Bij het bereiken van deze temperatuur komen de ontledingssgasen van een stof tot ontbranding zonder dat er een externe ontstekingsbron voor nodig is. Deze temperaturen zijn voor verschillende materialen sterk verschillend. Tromp en Van Mierlo (2013) geven aan dat voor de meeste materialen in gebouwen deze temperatuur tussen 220 °C en 550 °C ligt. Soms wordt er ook nog onderscheid gemaakt naar het brandpunt van een stof. Dit is de temperatuur waarbij een stof tot ontbranding kan komen na contact met een ontstekingsbron en de verbranding vervolgens zelf kan onderhouden (Tromp & Van Mierlo, 2013).

Op pagina 21 wordt ingegaan op de invloed van materiaal op brandoverslag. Hierin zijn ook voor enkele materialen ontstekings- en zelfontbrandingstemperaturen terug te vinden.

### ***Minimale en kritische stralingsintensiteit voor ontsteking***

In paragraaf 3.3.3 werd uitgelegd dat straling een belangrijke factor is in de kans op brandoverslag. Bij brandoverslag naar een naastgelegen gebouw spelen het ontstekingsgedrag en de eigenschappen van de toegepaste materialen een rol die aan straling worden blootgesteld. In paragraaf 3.3.5 wordt nader ingegaan op de absorptie van energie en invloed van specifieke materialen op brandoverslag.

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de natuurkundige invloed van stralingsintensiteiten op een ontvanger. Zo zijn voor zelfontbranding van een materiaal veel hogere stralingsintensiteiten nodig dan in aanwezigheid van een ontstekingsbron (Carlsson, 1999; Deleu, 2009). Daarom wordt in de bepaling van brandoverslagrisico's vooral gerekend met stralingswaarden waarbij het materiaal met een (externe) ontstekingsbron tot ontbranding kan komen.

Om te bepalen bij welke stralingsintensiteit een materiaal tot ontbranding kan komen worden zowel minimale stralingsintensiteiten als kritische stralingsintensiteiten toegepast. De minimale stralingsintensiteit geeft de minimale waarde weer, waarbij een materiaal tot ontbranding komt nadat een monster van dit materiaal voor een bepaalde vaste tijdsperiode (meestal tussen de 15 en 20 minuten) aan deze stralingswaarde wordt blootgesteld (SFPE, 2002). Wanneer het materiaal aan een lagere stralingsintensiteit wordt blootgesteld dan de minimale stralingsintensiteit kan het nog steeds tot ontbranding komen, maar dan moet het materiaal wel langer dan 15 tot 20 minuten aan deze waarde worden blootgesteld. Minimale stralingswaarden worden proefondervindelijk vastgesteld, waarbij de proefmethode invloed kan hebben op de gevonden waarden.

Naast de minimale stralingsintensiteit wordt ook de kritische stralingsintensiteit toegepast. De kritische stralingsintensiteit wordt bepaald voor een oneindige tijdsduur. Om deze waarde te berekenen wordt experimentele data geëxtrapoléerd om over een oneindige tijd een minimale waarde te schatten waarbij het materiaal tot ontbranding kan komen (SFPE, 2002). De laagste stralingsintensiteit waarbij vervolgens ontsteking zal optreden staat bekend als de kritische stralingsintensiteit. Deze waarde is materiaalafhankelijk. In Nederlandse bouwvoorschriften zoals de NEN6068 wordt voor de kritische ontstekingsflux een waarde van 15 kW/m<sup>2</sup> gehanteerd, terwijl sommige bouwvoorschriften in andere landen, zoals de Amerikaanse norm NFPA 80A en het Engelse voorschrift BRE 187, een kritische ontstekingsflux van 12,5 kW/m<sup>2</sup> hanteren (Deleu, 2009). Deze waarden komen overeen met de kritische ontstekingsflux om hout te laten ontsteken. Wanneer een materiaal wordt blootgesteld aan straling die boven haar kritische stralingsintensiteit ligt, zal deze niet direct tot ontbranding komen. De tijd tot ontsteking van het materiaal is afhankelijk van verschillende factoren, zoals het vochtgehalte van het materiaal, de dichtheid, soortelijke warmtecapaciteit en de geleidbaarheidscoëfficiënt (Carlsson, 1999; Deleu, 2009).

De termen minimale stralingsintensiteit en kritische stralingsintensiteit voor ontsteking worden in de literatuur vaak door elkaar heen gebruikt. Vermelde kritische stralingsintensiteiten zijn vaak minimale stralingsintensiteiten.

### 3.4 Factoren van invloed op brandoverslag

In voorgaande paragraaf is ingegaan op de verschillende manieren waarop warmte tijdens een brand wordt overgedragen. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar meerdere factoren die een rol spelen in de overslag van brand naar een naastliggend bouwwerk.

Barnett (1989) gaat in zijn paper in op verschillende onderwerpen die van belang zijn in het voorkomen van brandoverslag tussen twee gebouwen. Zo beschrijft hij vijf verschillende factoren die van invloed zijn op de kans tot brandoverslag tussen twee gebouwen:

1. **Bezwijken van een buitenmuur**  
Wanneer een buitenmuur deels of geheel bezwijkt kunnen vlammen groter en (meer) uitslaand worden waardoor de uitgezonden straling zal toenemen.
2. **Vliegvuur**  
Vliegvuur geeft vooral kans op brandoverslag wanneer een gebouw reeds flink wordt aangestraald en (brandbare) materialen nog slechts een externe hittebron nodig hebben om tot ontbranding te komen. Ook kan vliegvuur voor branduitbreiding zorgen doordat het via openingen in een naburig gebouw (bijvoorbeeld een gesprongen raam) in contact komt met brandbare materialen of goederen (zoals gordijnen, meubels en opgeslagen goederen).

3. Vlamcontact  
Direct vlamcontact met een gebouw zorgt voor een (snelle) opwarming en uiteindelijk ontbranding van het materiaal waarmee het in contact komt. Bij brandoverslag kunnen uitslaande vlammen voor het directe vlamcontact met een naastgelegen gebouw zorgen.
4. Uitgezonden warmtestraling  
Ook zonder direct vlamcontact kan een brand over een bepaalde afstand overslaan tussen twee gebouwen. Dit komt door de warmtestraling die wordt veroorzaakt door het brandende gebouw. Hoe groter de omvang van de brand en hoger de temperatuur, hoe meer stralingsenergie er door het brandende gebouw wordt uitgezonden en hoe groter de kans op brandoverslag zal zijn. In eerdere hoofdstukken is hier reeds op ingegaan.
5. Geabsorbeerde warmtestraling  
Niet alleen de uitgezonden warmtestraling door het brandende gebouw is van belang, maar ook de hoeveelheid stralingsenergie die door het ontvangende gebouw of materieel wordt geabsorbeerd speelt een rol.

Wanneer het gaat om brandoverslag zijn er globaal drie manieren waarop naastgelegen constructiemateriaal in brand kan raken. Hierbij maakt Barnett (1989) onderscheid tussen:

- > spontane zelfontbranding (spontaneous ignition),
- > ontsteking van brandbare gassen door een externe hittebron na het bereiken van de ontbrandingsgrens temperatuur (piloted ignition) en
- > door direct vlamcontact met het materiaal (Barnett, 1989).

Bij de eerste twee vormen speelt vooral opwarming als gevolg van warmtestraling een rol. Bij ontbranding van een materiaal als gevolg van zelfontbranding zal meer stralingsenergie nodig zijn dan bij ontbranding als gevolg van opwarming door warmtestraling én contact met een externe hittebron. Zo is bij hout voor zelfontbranding een invallende stralingsintensiteit van  $33,5 \text{ kW/m}^2$  benodigd, terwijl een stralingsintensiteit van  $12,5 \text{ kW/m}^2$  voldoende kan zijn om het hout te laten ontbranden wanneer dit bijvoorbeeld in contact komt met vliegvuur (Barnett, 1989).

### 3.4.1 Brandstof

Eén van de factoren die de temperatuur van een brand beïnvloed is het type brandstof. Daarbij speelt het brandvermogen van de brandstof een belangrijke rol. Het brandvermogen geeft aan hoe snel de warmte vrijkomt en wordt internationaal vaak in de Engels term Heat Release Rate (HRR) uitgedrukt (Tromp & Van Mierlo, 2013). Naast het uitdrukken van het brandvermogen in de HRR kan voor een brandstof ook de energie worden bepaald die in het materiaal zit. Hierbij gaat het niet om de snelheid waarmee het vrijkomt, maar wordt een waarde gegeven van de totale hoeveelheid energie per massagetal. Dit wordt dan uitgedrukt in de calorische waarde van een materiaal en is een maat voor de energie die bij de verbranding van het product vrijkomt. Kunststoffen en synthetische materialen hebben over het algemeen een hogere calorische waarde en HRR dan bijvoorbeeld hout. Bij het vrijkomende brandvermogen speelt niet alleen de aard van de brandstof een rol, maar ook de manier waarop de brandstof is verspreid. Wanneer de brandstof namelijk voldoende luchttoevoer heeft en een groot contactoppervlakte zal de verbranding veel sneller zijn (Deleu, 2009). Een voorbeeld hiervan zijn de gestapelde pallets die een veel hogere HRR zullen geven dan een massief houten blok met eenzelfde gewicht. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat de brand van de pallets korter zal zijn dan die van het houten blok en dus ook de blootstellingsduur minder lang is. Ook dit kan een rol spelen in de kans op brandoverslag.

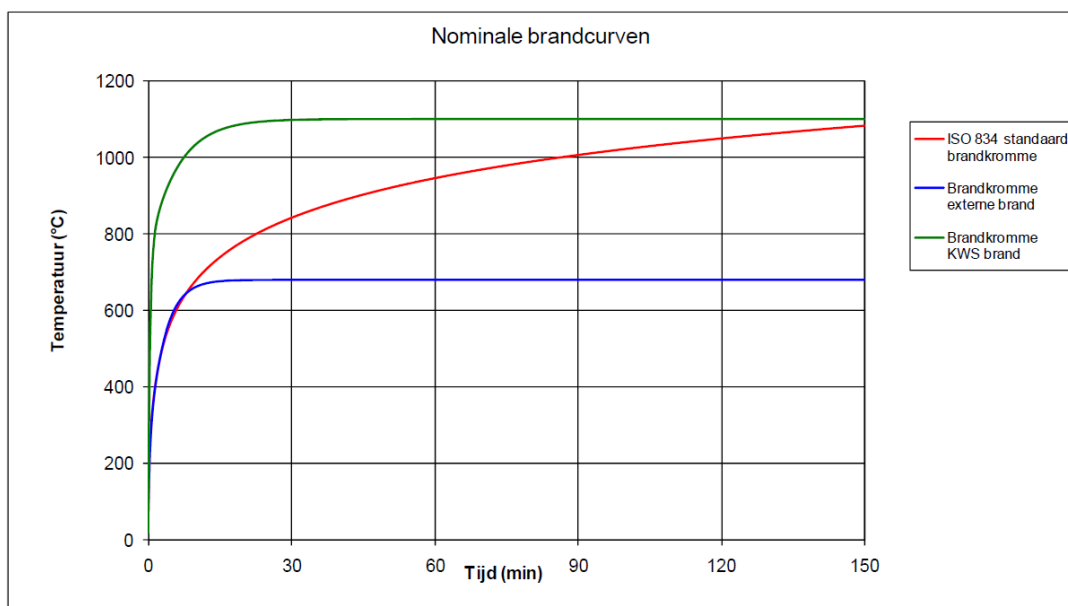
Tabel 3.24 Enkele voorbeelden van de calorische waarde en HRR voor verschillende materialen (Buchanan, 1994)

Materiaal	Netto Calorische Waarde (MJ/kg)	Heat release rate (MW/m <sup>2</sup> )
<b>Vloeistoffen</b>		
Benzine	43.5	3.27
Dunne olie	41.9	1.75
<b>Hout</b>		
Houten plank	16.7	0.10
1 m houten blok	16.7	0.61
Meubels	16.7	6.63
<b>Plastics</b>		
PMMA	24.9	1.34
Polyethyleen	43.8	1.36
Polystyreen	39.9	1.40

Voor de ontwikkeling van het vermogen in de tijd kan met verschillende parameters worden gewerkt. Zo kan dit direct gebeuren door het aanwezige vermogen in Watt op te geven. Ook kan het indirect worden bepaald door bijvoorbeeld gebruik te maken van de vermogensdichtheid en de brandomvang. De vermogensdichtheid is het vermogen per oppervlakte eenheid. In Tromp en Van Mierlo (2013) wordt aangegeven dat waarden voor verschillende gebruiksfuncties van gebouwen in de literatuur variëren van circa 0,25 MW/m<sup>2</sup> tot 2,5 MW/m<sup>2</sup>. Een andere indirecte manier om de ontwikkeling in brandvermogen te berekenen is door dit te relateren aan de hoeveelheid beschikbare zuurstof. Dit speelt vooral een rol voor ventilatie-beheerste branden (Tromp & Van Mierlo, 2013).

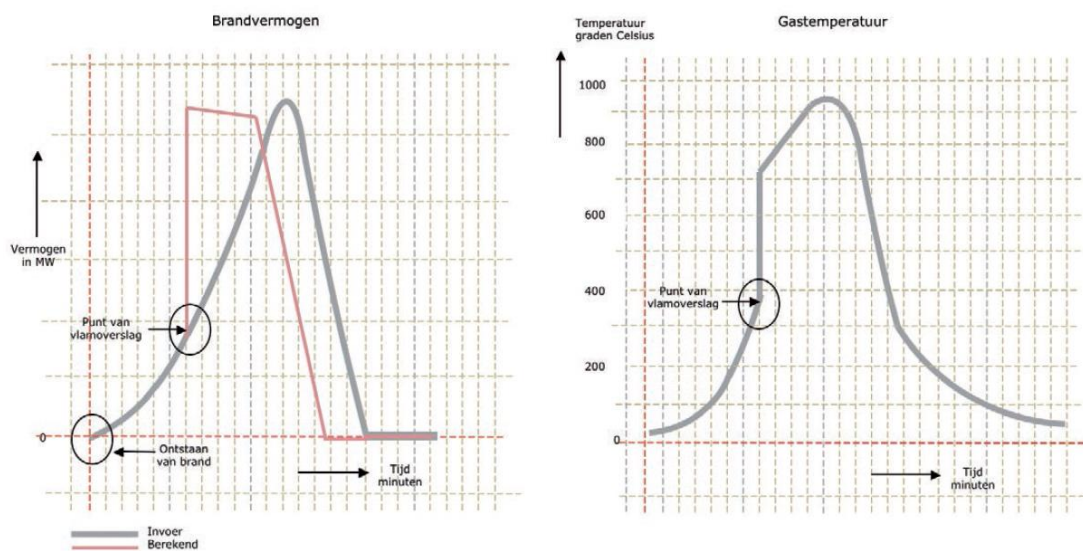
### 3.4.2 Temperatuur en brandverloop

Zoals in paragraaf 3.3 is aangegeven, speelt straling de grootste rol in de brandoverslag van brand naar omliggende gebouwen. Hoe groot de uitgezonden straling is, is sterk afhankelijk van de temperatuur die de brand heeft. Er bestaan verschillende manieren om het brandverloop en daarbij behorende temperatuur van brand in een compartiment weer te geven. Zo zijn er voor branden in een compartiment, voor branden in de openlucht en voor koolwaterstofbranden nominale brandcurven waarin een vastgelegd temperatuur- en tijdsverloop wordt weergegeven. De standaardbrandkromme is genormaliseerd en vastgelegd in NEN 6069 en is een grafische weergave van een temperatuurverloop van een ontwikkelde brand in de tijd. Deze brandkromme beschrijft de fase van de flashover en de periode daarna. Het model gaat uit van een exponentiële toename van de temperatuur tot een bepaald maximum. Vervolgens gaat het model ervan uit dat de temperatuur gedurende een bepaalde tijd, bijvoorbeeld 60 minuten, onveranderd op die maximale waarde blijft steken (Brandweeracademie, 2013b). In figuur 3.25 zijn de standaardbrandkromme, externe brandkromme en koolwaterstofbrandkromme weergegeven.



**Figuur 3.25** Nominale brandkrommen (Deleu, 2009)

Een meer realistische benadering van brandverloop wordt behaald door gebruik te maken van zogenaamde natuurlijke branden en brandmodellen. Dit zijn innovatieve brandmodellen waarin een onderscheid wordt gemaakt tussen de groeifase en de dooffase van een brand (Brandweeracademie, 2013a). In figuur 3.26 is een natuurlijk brandverloop weergegeven, dat is gebaseerd op het vermogen van een bepaalde brand. Links wordt het vermogen als functie van de tijd weergegeven en rechts de gastemperatuur als functie van de tijd.



**Figuur 3.26** Brandvermogen (MW) en gastemperatuur (°C) afgezet tegen de tijd in minuten (Brandweeracademie, 2013b)

Voor het brandverloop is het ook van belang om onderscheid te maken tussen brandstofgecontroleerde branden en ventilatiegecontroleerde branden (Law, 1963 in Carlsson, 1999). Bij een brandstofgecontroleerde brand is de hoeveelheid brandstof de

beperkende factor voor de ontwikkeling van de brand. Bij een ventilatiegecontroleerde brand is het de aanvoer van zuurstof wat de (snelheid van) brandontwikkeling en het brandvermogen bepaalt (Brandweeracademie, 2016). Bij ventilatiegecontroleerde branden heeft Law (1963) uitgevonden dat de HRR en temperatuur van de brand afhankelijk zijn van de grootte van de opening waar zuurstof door wordt aangevoerd. Deze afhankelijkheid heeft Law (1963) weergegeven in een ventilatiefactor waarin de oppervlakte van de opening wordt vermenigvuldigd met de vierkantswortel van de openingshoogte:

$$\text{ventilatiefactor} = A \cdot \sqrt{h}.$$

A = oppervlakte (m<sup>2</sup>)

h = hoogte (in m)

### Vergelijking 3.27 Ventilatiefactor

In de experimenten die Law (1963) heeft bestudeerd werd een maximale temperatuur gevonden van 1100 °C, wat overeenkomt met een maximale stralingswaarde van 168 kW/m<sup>2</sup>. In experimenten waar de ventilatiefactor een niet beperkende rol speelde werden vergelijkbare waarden gevonden voor de HRR en de bijhorende temperatuur. Bij branden met een relatief beperkt brandvermogen (minder dan 25 kg vurenhout/m<sup>2</sup>) werden temperaturen gevonden van ongeveer 800 °C, wat overeenkomt met een stralingswaarde van 84 kW/m<sup>2</sup> (Law, 1963). Volgens Carlsson (1999) worden deze waarden nog steeds gebruikt in verscheidene bouwregelgeving als de maximale waarden voor de te verwachten straling bij brand in een gebouw.

### 3.4.3 Afstand

Al sinds lange tijd wordt onderkend dat het risico van brandoverslag tussen twee naastgelegen gebouwen kan worden verminderd door de onderlinge afstand te vergroten. Wanneer gebouwen dicht op elkaar staan kan, bij een uitlaande brand, door direct vlamcontact, convectie en door straling een brand makkelijk overslaan. Wanneer de afstand tussen panden groter wordt gaat vooral warmteoverdracht als gevolg van warmtestraling een bepalende rol spelen in de kans op brandoverslag. Om de benodigde minimale veilige afstand tussen twee gebouwen te bepalen bestaan er verschillende rekenmethodes. In het artikel van Barnett (1989) wordt naar verschillende methoden verwezen. Het gaat voor dit literatuuronderzoek te ver om deze rekenmethodes in detail toe te lichten, maar enkele basisprincipes worden wel aangehaald. Zo is de ontvangen stralingsenergie op een niet brandend gebouw afhankelijk van de uitgezonden stralingsenergie als gevolg van de brand en hoe deze uit het brandende gebouw vrij kan komen. Daarbij bestaat er vooral verschil tussen wanneer het brandende compartiment gesloten blijft of dat de straling van de brand vrij door openingen kan worden uitgezonden (bijvoorbeeld bij een uitlaande brand door het dak, ingestorte wand of door gesprongen ramen). Zo wordt door brand in een gebouw opgewekte warmtestraling door (gesloten blijvende) ramen van 47 tot 7 procent gereduceerd (Barnett, 1989). Daarom wordt bij toepassing van brandwerend glas gerekend met een emissiecoëfficiënt voor uitgezonden straling van 0,5 (Barnett, 1989).

Naast dat de uitgezonden straling en kenmerken van het brandende gebouw van invloed zijn op de onderlinge afstand waar brandoverslag plaats kan vinden, spelen ook eigenschappen van het niet brandende gebouw een rol. Dit gebouw neemt immers (stralings-)energie op ten gevolge van de brand. Hierbij is het niet alleen een risico dat gevelmateriaal als gevolg van de stralingsenergie tot ontbranding komt, maar kunnen ook materialen die zich in een gebouw bevinden door de stralingsenergie worden opgewarmd en tot ontbranding komen. Opnieuw spelen openingen en ramen hierbij een belangrijke rol. Zo zullen niet brandwerende ramen sneller springen waardoor vliegvuur, hete rookgassen of zelfs

vlammen in direct contact kunnen komen met materialen in het niet brandende gebouw. Op dat moment zullen materialen al bij een lagere stralingsenergie tot ontbranding kunnen komen. Wanneer wel brandwerende ramen worden toegepast welke niet springen en openingen gesloten blijven, kunnen materialen binnen het niet brandende gebouw alleen door zelfontbranding in brand vliegen. In die gevallen is er meer stralingsenergie nodig om tot brandoverslag te komen. Wanneer bij panden niet brandbaar gevelmateriaal en brandwerende beglazing wordt gebruikt, kunnen deze dichter bij elkaar staan voor overslag plaatsvindt (Barnett, 1989). De minimale afstand hangt daarbij af van verschillende aannames, zoals het te verwachte brandvermogen en brandontwikkeling. In geldende regelgeving en normeringen staan hierover voorschriften opgenomen om te hanteren bij het uitvoeren van afstandsberoeeningen. Zo staat in de NEN6068 dat de kleinste waarde van de horizontale afstand tussen een gevelopening van de brandruimte en een daarop loodrecht gemeten afstand tot een andere gevel minstens drie maal de vlamdikte moet zijn, met een minimale afstand van vijf meter. Bij de bepaling van deze afstand speelt daarbij de modellering van vlammen buiten een ruimte afkomstig uit gevel- en dakopeningen een rol. Voorwaarden voor deze berekeningen zijn terug te vinden in de betreffende norm (NEN6068, 2016).

Eén van de manieren om de minimale afstand tussen twee gebouwen te bepalen is door gebruik te maken van de toegelaten zichtfactor. In de zichtfactor zit immers de afstand verwerkt tussen een stralingsbron en een stralingsontvanger. Daarbij dient de ontvangen stralingsintensiteit op een gebouw lager te zijn dan de kritische ontstekingsflux<sup>4</sup> van de blootgestelde materialen. De ontvangen stralingsintensiteit is gelijk aan de uitgezonden stralingsintensiteit van een bron welke vermenigvuldigd is met de zichtfactor (zie vergelijking 3.28). Dit leidt ertoe dat de zichtfactor kleiner moet zijn dan de verhouding tussen de kritische ontstekingsflux van de blootgestelde materialen en de intensiteit van de uitgezonden straling (Deleu, 2009). In formulevorm ziet dat er als volgt uit:

$$E_{\text{krit}} < \emptyset \cdot E_{\text{bron}}$$

Dit kan worden herschreven naar:

$$\emptyset < \frac{E_{\text{krit}}}{E_{\text{bron}}}$$

Waarbij:

$\emptyset$  Zichtfactor

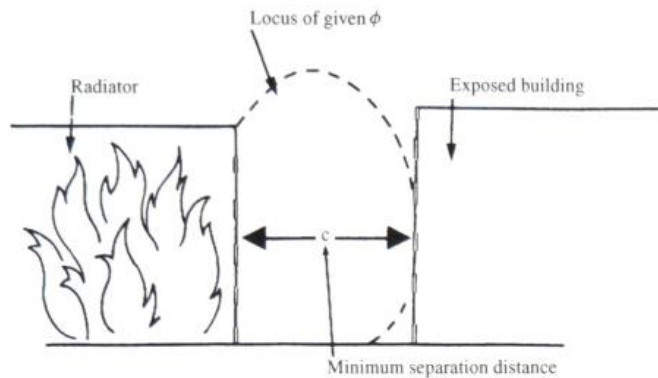
$E_{\text{krit}}$  Kritische ontstekingsflux van blootgestelde materialen (kW/m<sup>2</sup>)

$E_{\text{bron}}$  Uitgezonden stralingsintensiteit (kW/m<sup>2</sup>)

### Vergelijking 3.28 Kritische ontstekingsflux

De minimale afstand tussen twee gebouwen wordt vervolgens gevonden door de waarden bij de zichtfactor te berekenen geldend voor het centrale punt van een gevel. Hier is immers de afstand tussen een (rechthoekige) stralende gevel en ontvanger maximaal. De berekening van de afstand volgt daarbij uit de vergelijking zoals weergegeven in vergelijking 3.28. In onderstaand figuur is op deze manier met een stippellijn weergegeven waar zich de punten bevinden waarop de kritische ontstekingsflux  $E_{\text{krit}}$  kleiner is dan de op dat punt ontvangen straling (Deleu, 2009; Drysdale, 1985). In veel methoden (zoals NEN 6079, 6068, 6060) wordt als bron niet de stralende gevel genomen, maar de te verwachten vlamhoogte in combinatie met de gevellengte.

<sup>4</sup> Flux is de stralingsintensiteit per oppervlakte eenheid, bijvoorbeeld uitgedrukt in kW/m<sup>2</sup>.



**Figuur 3.29 Verticale doorsnede met minimale afstand tussen twee gebouwgevels bepaald middels de zichtfactor**

De grootte van de minimale afstand tussen twee gebouwen om brandoverslag te voorkomen is erg afhankelijk van de toegepaste of in regelgeving vereiste methode om deze afstand te berekenen (Deleu, 2009). Los van de gehanteerde rekenmethode hebben altijd de volgende parameters een belangrijke invloed op de benodigde minimale afstand om brandoverslag te voorkomen:

- > Uitgezonden stralingsintensiteit
- > Omvang van het stralend oppervlak
- > Kritische ontstekingsflux van blootgestelde materialen.

#### 3.4.4 Invloed van wind

In de overdracht van warmte van een brandend gebouw naar naastgelegen gebouwen kan ook de aanwezige wind een factor van belang zijn. In een onderzoek van Thauvoye et al. (2010) werden aanzienlijk hogere stralingswaarden gemeten aan de benedenwindse zijde van een gebouw in vergelijking met de bovenwindse zijde. De verklaring hiervoor werd gezocht in de uitslaande vlammen die als gevolg van de wind afgebogen werden in de windrichting die op het gebouw stond (Thauvoye et al., 2010). Ook Ingason en Lönnermark (Ingason & Lönnermark, 2011) geven in hun rapportage aan dat bij winderige condities het risico op brandoverslag wordt vergroot wanneer vlammen daardoor meer gericht worden op naburige gebouwen. Niet alleen worden vlammen afgebogen door de wind, maar onder invloed van wind kunnen vlammen ook een grotere lengte bereiken. Zo is in Heskestad (2002) te lezen dat vlammen onder windige condities ongeveer 30 procent langer kunnen worden dan onder rustige condities.

#### 3.4.5 Invloed van eigenschappen compartiment

Bij brand in een gebouw wordt de warmteoverdracht ook beïnvloed door de thermische eigenschappen van de wanden, plafond en vloer. Daarbij gaat het om materiaaleigenschappen zoals de dichtheid, specifieke warmte en warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze hebben invloed op de mate waarin warmte het pand kan verlaten en bepalen op die manier mede de temperatuur van de brand (Deleu, 2009). Zoals in paragraaf 3.4.1 reeds werd vermeld hebben ook het aantal en de grootte van aanwezige openingen een belangrijke invloed op de temperatuur van de brand, omdat deze de luchttoevoer en daarmee de verbrandingssnelheid beïnvloeden. Eerder is gesproken over een ventilatiefactor, maar voor hele compartimenten wordt er ook wel gerekend met een openingsfactor. In Drysdale (1989) en Deleu (2009) wordt de volgende vergelijking voor de openingsfactor van een compartiment gedefinieerd.



$$O = \frac{A_{\text{vert}} \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}}}{A_{\text{tot}}}$$

Met daarin:

O = Openingsfactor

$A_{\text{vert}}$  = Totale oppervlakte van alle verticale openingen in alle wanden (m<sup>2</sup>)

$h_{\text{eq}}$  = Gewogen gemiddelde van de hoogte van alle ramen in alle wanden (m)

$A_{\text{tot}}$  = Totale oppervlakte van het compartiment zijnde wanden, plafonds en vloeren met openingen inbegrepen (m<sup>2</sup>)

### Vergelijking 3.30 Openingsfactor van gevel

Daarbij merkt Deleu (2009) op dat de openingsfactor in belangrijke mate bepaalt of er voldoende zuurstof bij de brand komt en op deze manier de verbrandingsefficiëntie bepaald. Grote openingen zorgen voor een grote (overmaat aan) luchttoevoer bij de verbranding, waardoor de temperatuur van de brand in het compartiment zal verlagen. Ook zijn de afmetingen van aanwezige ramen van belang omdat deze de temperatuur beïnvloeden alsook de afmetingen van uitslaande vlammen die in sommige gevallen voor verhoogde uitgezonden straling kunnen zorgen (Deleu, 2009).

### 3.4.6 Materiaaleigenschappen

Zoals aangegeven speelt straling bij brandoverslag een grote rol. Hoe snel er brandoverslag naar een gebouw of voorwerp plaats kan vinden is niet alleen afhankelijk van de uitgezonden straling, maar ook van de eigenschappen van de ontvanger van de straling. Daarbij gaat het onder andere om specifieke materiaaleigenschappen van het bouw materiaal. In deze paragraaf worden de hoofdlijnen besproken.

#### **Schade en kritische stralingsintensiteit**

Door het ontvangen van straling kan er schade aan het materiaal ontstaan. Bij het berekenen van schade als gevolg van de straling kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee niveaus (VROM, 2003):

- > Schadeniveau 1: het daadwerkelijk in brand raken van aan warmtestraling blootgestelde oppervlakten of het breken dan wel bezwijken van constructieonderdelen.
- > Schadeniveau 2: Het optreden van schade, zoals ernstige verkleuring van het materiaaloppervlakte, afbladderen van verf en/of het vervormen van constructieonderdelen.

Om voor een bepaald materiaal te bepalen bij welke stralingswaarden er op de twee niveaus schade optreedt wordt er gekeken naar de kritische stralingsintensiteit. Deze kritische stralingsintensiteit zijn de stralingswaarden waar bij langdurige blootstelling (in de regel meer dan 30 minuten) schade aan het materiaal op de twee niveaus wordt veroorzaakt. De kritische stralingsintensiteit wordt in paragraaf 3.4.6 nader toegelicht.

In het document van het toenmalig ministerie VROM (2003) worden voor verschillende bouwmaterialen bijhorende kritische stralingswaarden weergegeven. Daarbij kijkt het toenmalig ministerie naar hout, kunststoffen, glas en (onbekleed) staal. Hout en kunststoffen zijn brandbaar en kunnen als zodanig aanleiding geven tot secundaire branden. Glas is onbrandbaar, maar kan als gevolg van opwarming en temperatuurverschillen wel breken. Hierdoor kan schade ontstaan en wordt er een open verbinding gecreëerd naar (brandbare) materialen en voorwerpen binnen het gebouw. Ook staal is in principe onbrandbaar materiaal. Echter, door een toename in temperatuur neemt de sterkte en stijfheid van staal af waardoor een constructie kan bezwijken. Naast deze vier materiaalsoorten zijn er meer

onbrandbare en hittebestendige materialen die veelvuldig in gebouwgevels toegepast worden. Voorbeelden hiervan zijn metselwerk, (gewapend) beton en bekleed staal. Voor deze bouwmaterialen geldt dat warmtestraling alleen in extreme situaties gevaar oplevert, bijvoorbeeld wanneer het object zich in of direct naast een brand bevindt. De mate waarin vervolgens schade optreedt is dan bijvoorbeeld afhankelijk van de toegepaste betondekking of de dikte en eigenschappen van het materiaal waarmee het staal is bekleed. Wel kan er, bijvoorbeeld in beton, door de hitte scheurvorming optreden, waardoor de wapening direct wordt blootgesteld. Dit kan bij direct vlamcontact als gevolg van een brandend naastgelegen gebouw gevaar opleveren (VROM, 2003). Dit rapport gaat echter niet in op deze specifieke materialen en richt zich op de vier materialen die het meest gevoelig zijn voor warmtestraling, zonder dat direct vlamcontact aanwezig is.

In het document van het VROM (2003) wordt de kritische stralingsintensiteit en kritische temperatuur voor deze vier materiaalsoorten weergegeven. Deze waarden zijn overgenomen in onderstaande tabel, waarbij onderscheid is gemaakt naar de twee schadeniveaus.

**Tabel 3.31 Globale waarden voor de kritische stralingsintensiteit en kritische temperatuur van enkele materialen (VROM, 2003)**

Materiaal	Kritische stralingsintensiteit (kW/m <sup>2</sup> )		Kritische temperatuur (°C)	
	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2
Hout	15 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>	410 °C	100 °C
Kunststoffen	15 kW/m <sup>2</sup>	2 kW/m <sup>2</sup>	-	100 °C
Glas	4 kW/m <sup>2</sup>	-	120 °C	-
Staal	100 kW/m <sup>2</sup>	25 kW/m <sup>2</sup>	500 °C	200 °C

Uit de door het VROM (2003) gepresenteerde waarden blijkt dat glas het meest kwetsbaar is voor het ontvangen van straling en bij een kritische stralingsintensiteit van 4 kW/m<sup>2</sup> kan breken. De kritische waarde voor hout en kunststoffen liggen aanzienlijk hoger. Staal zal pas bij een kritische stralingsintensiteit van 100 kW/m<sup>2</sup> schadeniveau 1 bereiken en vervolgens bezwijken.

Wanneer wordt gekeken naar schadeniveau 2 is te zien dat zowel hout als kunststoffen al bij een relatief lage stralingsintensiteit van 2 kW/m<sup>2</sup> schade oplopen. Ook nu ligt deze waarde voor staal met 25 kW/m<sup>2</sup> aanzienlijk hoger. Bij deze stralingsintensiteit kan het staal gaan vervormen of te maken krijgen met ernstige verkleuring van het oppervlakte.

Zoals bovenstaande tabel weergeeft verschillen de kritische stralingsintensiteiten waarbij verschillende materialen schade op gaan lopen. Het daadwerkelijk tot ontbranding komen van een voorwerp is niet alleen afhankelijk van de specifieke materiaaleigenschappen, maar ook of er contact met een ontstekingsbron (zoals een vlam of vliegvlam) mogelijk is. Zo ontbrandt hout uit zichzelf bij een ontvangen stralingsintensiteit van 33.5 kW/m<sup>2</sup> en kan het door contact met een ontstekingsbron al ontbranden bij ontvangen stralingswaarden van 12.5 kW/m<sup>2</sup> (Barnett, 1989). Uit het document van het VROM (2003) zijn enkele kritische stralingswaarden overgenomen waarbij verschillende materialen tot ontbranding kunnen komen. Daarbij moet worden opgemerkt dat deze slechts een globale betekenis hebben

doordat een aantal factoren die de kritische stralingsintensiteit beïnvloeden in de berekening niet zijn meegenomen. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om de dikte en oppervlaktegesteldheid van het materiaal en om de mogelijkheden voor convectieve warmteoverdracht (wind, positie materiaaloppervlak) (VROM, 2003).

**Tabel 3.32 Enkele kritische stralingsintensiteiten voor verschillende brandbare materialen (VROM, 2003)**

Materiaal	Kritische stralingsintensiteit (kW/m <sup>2</sup> )		
	Met aansteekvlam: wel contact met oppervlakte	Met aansteekvlam: zonder contact oppervlakte	Zonder aansteekvlam (zelfontbranding)
Hout	5 kW/m <sup>2</sup>	15 kW/m <sup>2</sup>	35 kW/m <sup>2</sup>
Hennep, jute, vlas			40 kW/m <sup>2</sup>
Dakmateriaal gedrenkt in asfaltbitumen	3 kW/m <sup>2</sup>		
Dakmateriaal afgedekt door aluminiumplaat	75 kW/m <sup>2</sup>		
Textiel			35 kW/m <sup>2</sup>
Zachtboard		6 kW/m <sup>2</sup>	25 kW/m <sup>2</sup>
Hardboard	5 kW/m <sup>2</sup>	10 kW/m <sup>2</sup>	30 kW/m <sup>2</sup>
Kurk		3 kW/m <sup>2</sup>	23 kW/m <sup>2</sup>

Uit de gepresenteerde waarden blijkt dat dakmateriaal wat gedrenkt is in asfaltbitumen in de aanwezigheid van een ontstekingsbron (zoals vonken of vlieg vuur) al bij relatief lage stralingsintensiteit tot ontbranding kan komen. Bij brandveiligheidsbeschouwingen worden echter veelal de waarden genomen zoals gepresenteerd in de middelste kolom (VROM, 2003).

In een engineering guideline van SFPE (SFPE, 2002) is voor een groot aantal materialen de relatie tussen blootstellingstijd (tijd tot ontbranden) en de ontvangen straling weergegeven. In onderstaande tabel is voor een kleine selectie van materialen weergegeven bij welke invallende stralingsenergie na 30 en 60 minuten er ontbranding kan plaatsvinden. De tabel geeft waarden voor de stralingsenergie voor een thermisch dik en dun materiaal. Een thermisch dik materiaal heeft capaciteit om warmte op te nemen en te bufferen. In de relevante tijd (bijvoorbeeld 30 minuten nodig voordat er water op de wand kan worden gebracht) wordt er (nagenoeg) geen warmte (energie) doorgegeven aan de achterliggende gevel of ruimte. Een thermisch dun materiaal heeft die capaciteit niet. Is dit materiaal verder niet geïsoleerd naar de achterliggende gevel of ruimte, dan wordt de warmte (energie) daar snel aan doorgegeven. Dit heeft tot gevolg dat het thermisch dikke materiaal aan het blootgestelde oppervlak een hogere temperatuur krijgt dan het thermisch dunne materiaal, bij gelijke blootstelling aan stralingsenergie. En het is de temperatuur van het materiaal die bepalend is voor het al dan niet ontsteken.

Tabel 3.33 Ontbrandingstijd bij 30 en 60 minuten blootstelling (SFPE, 2002)

	Ontsteking na 30 min	Ontsteking na 30 min	Ontsteking na 60 min	Ontsteking na 60 min
	Dik	Dun	Dik	Dun
	Straling (kW/m <sup>2</sup> )	Straling (kW/m <sup>2</sup> )	Straling (kW/m <sup>2</sup> )	Straling (kW/m <sup>2</sup> )
Vurenhout	16.1	30.2	15.2	27.6
Eiken	15.3	28.7	14.4	25.9
Multiplex	4.2	33.2	2.5	27.7
PVC extruded	14.8	38.6	13.4	33.0
Perspex	9.4	42.4	7.6	33.5

### Ontstekingstemperatuur

Samenhangend met de kritische stralingsintensiteit waarbij een voorwerp tot ontbranding kan komen is de factor temperatuur. Temperatuur is immers een variabele in de berekening van straling. Net zoals kritische stralingsintensiteiten voor materialen sterk verschillen geldt dat ook voor de temperatuur waarbij materialen tot ontbranding kunnen komen. Ter illustratie zijn enkele waarden overgenomen zoals weergegeven worden in het boek van Tromp en Van Mierlo (2013).

Tabel 3.34 Ontstekingstemperaturen van verschillende stoffen (Tromp & Van Mierlo, 2013)

Stof	Ontstekingstemperatuur met ontstekingsbron (°C)	Zelfontbrandingstemperatuur (°C)
Katoen	230 – 270 °C	250 – 254 °C
<b>Kunststoffen</b>		
Polycarbonaat	440 – 522 °C	516 – 580 °C
Polyethyleen	270 – 443 °C	350 – 457 °C
PUR Zachtschuim (inventaris)	335 – 363 °C	335 – 378 °C
PUR Hardschuim (bouw materiaal)	378 °C	502 – 550 °C
<b>Hout</b>		
MDF	330 °C	-
Hout: Douglas spar	350 °C	-
OSB plaat	364 °C	-

### **Invloed verf**

In het rapport van Carlsson (1999) wordt een Zweeds en Fins onderzoek aangehaald waar is onderzocht wat het effect van verf is op de ontbrandbaarheid van een houten wand. Uit deze experimenten (zowel full-scale als laboratorium experimenten) bleek dat de houten wand waarop een verflaag was aangebracht pas bij ongeveer 50 procent hogere stralingswaarden tot ontbranding kwam. Het is niet bekend om welk soort verf of hout het hierbij gaat.

**Tabel 3.35 Verschil tussen ontbranding van geverfd en ongeverfd hout (Carlsson, 1999)**

<b>Stralingswaarden die leiden tot brandoverslag (piloted ignition)</b>	<b>Ongeverfde houten wand</b>	<b>Geverfde houten wand</b>
Full scale test	18-19 kW/m <sup>2</sup>	26-30 kW/m <sup>2</sup>
Laboratorium test	10 kW/m <sup>2</sup>	15 kW/m <sup>2</sup>

Het zijn de pigmentkorrels in verf die bijna alle infrarode straling absorberen, onafhankelijk van de kleur van de verflaag, en daarmee meer bescherming biedt. Ook in het werk van Law (1963) werd al aangegeven dat door het verven van een (houten) gevel de bescherming tegen straling wordt verhoogd. Toch wordt daarbij aangegeven dat het effect van verf eigenlijk nooit werd meegenomen doordat hout vaak scheuren en gaten heeft waardoor de bescherming van verf teniet wordt gedaan. Bij het voorkomen van brandoverslag kan het dus nuttig zijn om eerst te richten op bescherming van eventueel ongeverfde of onbehandelde geveldelen.

# 4 Technieken om brandoverslag te voorkomen

## 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de volgende onderzoeksvraag beantwoord: Wat zijn effectieve technieken waarmee de brandweer deze brandoverslag kan voorkomen? Er zijn verschillende technieken om brandoverslag te voorkomen, namelijk een waterscherm (paragraaf 4.3), nathouden blootgestelde gevel (paragraaf 4.4), schuim op belendende wand (paragraaf 4.5), aanbrengen van gel (paragraaf 4.6) en het toevoegen van additieven aan het water (paragraaf 4.7). In dit hoofdstuk wordt echter allereerst meer informatie gegeven over water en haar effectiviteit (paragraaf 4.2).

## 4.2 Water

Zoals in het vorige hoofdstuk is aangegeven heeft in de meeste gevallen de warmtestraling de grootste invloed op de overslag van een brand naar een naburig pand. Om een brand te blussen of overslag van brand te voorkomen, wordt door de brandweer praktisch altijd gebruikgemaakt van water die in enige vorm wordt opgebracht. Water kan daarbij de branduitbreiding tegengaan door de warmtestraling op een naastgelegen pand te verminderen (Hostikka & McGrattan, 2006). De waterdruppels verminderen de straling door absorptie en verstrooiing van de straling in verschillende richtingen. Daarbij spelen druppelgrootte, golflengte van de uitgezonden straling, vorm en dichtheid van het opgebrachte water een rol (Hostikka & McGrattan, 2006; Lechene, Blanchard, Parent, Acem, & Boulet, 2009). In deze paragraaf wordt meer informatie gegeven over water en haar effectiviteit.

### 4.2.1 Opwarming van water

De absorptie van straling door water heeft niet alleen een blokkerend effect maar zorgt ook voor de opwarming en verdamping van de waterdruppels. Deze vorming van waterdamp in gasvorm onttrekt veel energie en vergroot het volume van het ingebrachte water met een factor 1700. Vooral binnen een gebouw is dit effect interessant, omdat op deze manier een verdunning van het zuurstofgehalte in de ruimte plaatsvindt en door deze verstoring het verbrandingsproces wordt verminderd (Försth & Möller, 2011).

Door het opnemen van energie door water wordt vloeibaar water omgezet naar gasvorm. De energie die voor een bepaald volume  $V$  water nodig is kan bepaald worden aan de hand van de volgende formule (Försth & Möller, 2011):

$$Q_{\text{opwarming}} = c_p \cdot V \cdot \rho \cdot \Delta T$$

Waarbij:

$c_p$  = soortelijke warmte (voor water is dat  $4186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ )

$V$  = volume op te warmen stof ( $\text{m}^3$ )

$\rho$  = dichtheid op te warmen stof (voor water is dat  $998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

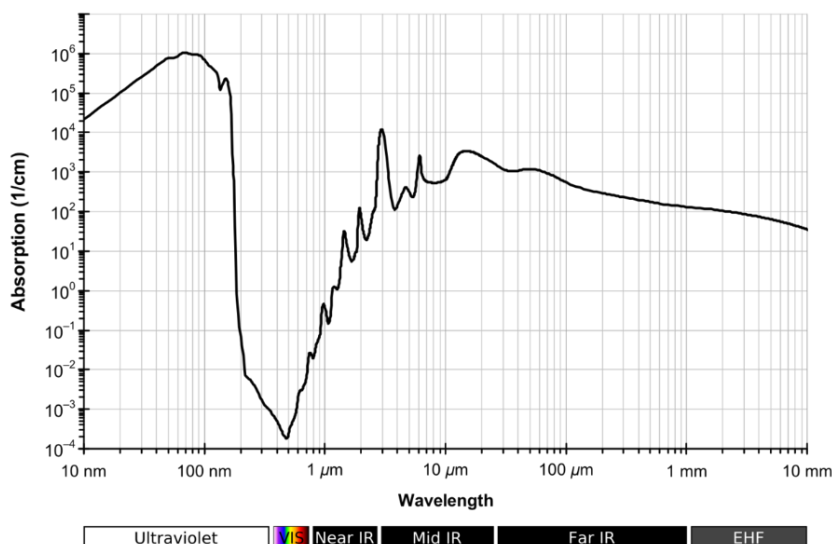
$\Delta T$  = temperatuurverschil (K)

### Vergelijking 4.1 Opwarmingsenergie

Daarmee kan worden berekend dat 1 kilogram water met een temperatuur van  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  tijdens het opwarmen naar  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  in totaal 336 kJ aan warmte absorbeert. Naast het opwarmen van water richting de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  kost ook het proces waarbij vloeibare water om wordt gezet in gasvorm energie. Voor het verdampen bij een temperatuur van  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  absorbeert het water ongeveer 2260 kJ/kg. Dit is dus ongeveer zeven keer zo veel als bij de opwarming van water naar  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . De stoom die daarbij ontstaat zal nog verder in temperatuur stijgen en absorbeert daarbij opnieuw een hoeveelheid energie. De bijhorende soortelijke warmte is temperatuur afhankelijk en met minimaal  $1890 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  nog steeds significant in de absorptie van energie (Merci & Beji, 2016).

### 4.2.2 Absorptie van straling door waterdruppel

Helder water laat vrij goed licht door (denk bijvoorbeeld aan een aquarium of een zwembad waar je de bodem van kunt zien). Er is dus nauwelijks sprake van absorptie van het zichtbare licht (vrijwel al het zichtbare licht wordt doorgelaten). De warmtestraling afkomstig van vlammen bevindt zich vooral in het infrarode spectrum en wordt voornamelijk uitgezonden in golflengtes rond de 2 tot  $3 \text{ } \mu\text{m}$ . Het absorptievermogen van water is juist in deze gebieden hoog (zie figuur 4.2) en absorbeert daarom relatief veel stralingsenergie bij een brand. Daartegenover staat wel dat de afstand die de straling door een afzonderlijke waterdruppel af moet leggen relatief klein is, wat het absorptie effect negatief beïnvloedt (Brandweeracademie, 2015; Försth & Möller, 2011).



Figuur 4.2 Absorptievermogen van water (Brandweeracademie, 2015)

Bij vermindering van warmtestraling door waterdruppels gaat het om absorptie van energie in de druppel, maar ook om de verstrooiing van deze straling door de waterdruppel (zie

paragraaf 4.2.1). Het berekenen van de totale geabsorbeerde hoeveelheid straling door een waterdruppel is daarom behoorlijk complex. Veel variabelen spelen daarbij een rol, zoals de hoek tussen de invallende straling en het oppervlak van de waterdruppel en in welke golflengte de straling wordt uitgezonden (Försth & Möller, 2011).

Bij het berekenen van de absorptie van straling kan gebruik worden gemaakt van de wet van Lambert-Beer. Deze formule luidt (Drysdale, 1985):

$$I_{\lambda 1} = I_{\lambda 0} \cdot e^{(-\kappa_{\lambda} \cdot C \cdot L)}$$

$I_{\lambda 1}$  = Stralingsintensiteit met golflengte  $\lambda$  na afleggen van afstand L

$I_{\lambda 0}$  = Stralingsintensiteit met golflengte  $\lambda$  bij binnentreding van de waterdruppel

$\kappa_{\lambda}$  = Absorptiecoëfficiënt van het absorberende materiaal voor golflengte  $\lambda$

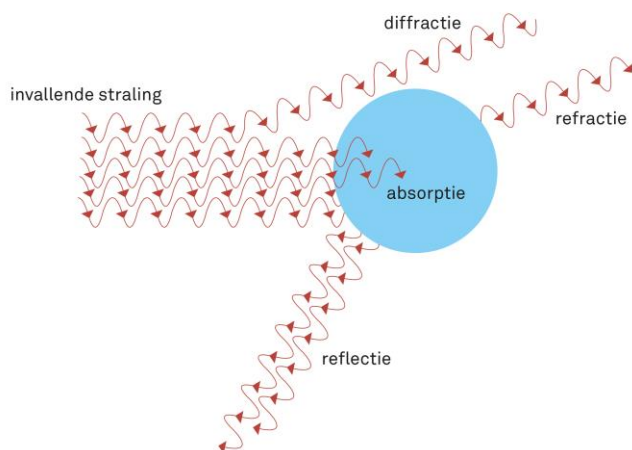
C = Concentratie van absorberende elementen in het materiaal

L = Afgelegde weg van de stralingsbundel door het materiaal

### Vergelijking 4.3 Wet van Lambert-Beer

Hoe dikker dus het materiaal is, hoe meer straling er geabsorbeerd wordt. Aan de hand van bovenstaande formule is onder andere te berekenen hoe dik een laag water zou moeten zijn om 100 procent van de invallende straling van een bepaalde golflengte te kunnen absorberen.

Zoals aangegeven speelt naast absorptie ook de verstrooiing van straling een rol. Om te bepalen hoeveel van de straling verstrooid wordt kan gebruik worden gemaakt van de complexe Mie-theorie. Voor meer informatie over deze theorie wordt verwezen naar het rapport van Försth en Möller (2011) en het boek van Merci en Beji (2016). De verstrooiing van straling is onder ander afhankelijk van de golflengte van de invallende straling en de grootte van de waterdruppel. Bij brand zal de meeste straling worden gereflecteerd en spelen afbuiging (diffraction) en breking (refraction) van de inkomende stralingsgolven een beperkte rol (Merci & Beji, 2016). Een neveneffect van de verstrooiing kan zijn dat teruggekaatste straling een object sneller opwarmt en daarmee juist de pyrolyse van dit object versneld (Försth & Möller, 2011).



**Figuur 4.4 Schematische weergave van absorptie en verstrooiing van straling door een waterdruppel (Merci & Beji, 2016)**



Uit onderzoek van Viskanta en Tseng (2007) blijkt dat waterdruppels vooral invallende straling in het zichtbare en nabij-infrarode spectrum ( $\lambda < 2\mu\text{m}$ ) verstrooien. Straling met golflengtes groter dan  $2\mu\text{m}$  worden vooral door waterdruppels geabsorbeerd. In het kort komt het erop neer dat het effect van verstrooiing domineert voor kleine druppels en voor kleine golflengtes van straling en dat absorptie domineert bij grote druppels en langere golflengtes van straling (Försth & Möller, 2011; Merci & Beji, 2016; Viskanta & Tseng, 2007).

### 4.2.3 Druppelgrootte

Förster en Möller (2011) hebben uitgebreid onderzoek gedaan naar de meest optimale druppelgrootte bij het absorberen van warmtestraling. Daarbij hebben zij gevonden dat verkleinde druppels met een diametergrootte van 1 tot  $10\mu\text{m}$  het meest efficiënt zijn. Kleinere diameters leiden niet tot een verbetering (Försth & Möller, 2011).

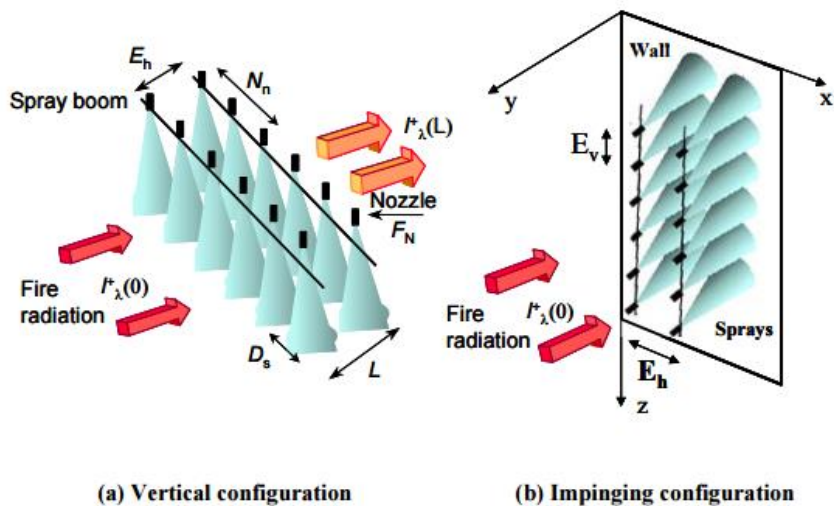
## 4.3 Waterscherm

Een in de praktijk toegepaste methode om brandoverslag te voorkomen is het plaatsen van een waterscherm tussen de brand en een naastgelegen gebouw. Hierbij kan het waterscherm verschillende vormen aannemen. Zo bestaan er zogenaamde waterschermen (hydroshields) waarbij het water in een halve boog wordt opgebracht. Ook bestaan er systemen waarmee als het ware een gordijn van water wordt opgetrokken. In deze paragraaf worden enkele onderzoeken toegelicht die hebben gekeken naar de effectiviteit van waterschermen, al dan niet in de vorm van watermist of sprinklersystemen, in relatie tot het voorkomen van brandoverslag.

### 4.3.1 Algemeen

Wanneer het gaat om warmtestraling werkt een waterscherm of watermist eigenlijk als semi-transparant medium bestaand uit ingebrachte waterdruppels in de lucht. Daarbij zijn typische druppelgroottes van de verfijnde systemen in de orde tot enkele millimeters groot. Hierdoor verspreidt zich een soort mengsel van natte lucht wat een complexe wisselwerking met de straling aangaat (Lechene et al., 2009). Belangrijke parameters die de mate van stralingsopname bepalen door een waterscherm zijn druppelgrootte, totale volumeconcentratie van de waterdruppels en de verblijfstijd van de waterdruppels in een bepaald volume (Husted, Ho, & Martin, 2016). Lechene et al. (2009) geven aan dat het bij een waterscherm of watermist om een complexe interactie gaat. Zo spelen dracht en zwaartekracht effecten een rol op de baan van de druppels maar zijn ook verdamping, convectie en warmteoverdracht, met in het bijzonder straling, van invloed op het effect van ingebrachte waterdruppels.

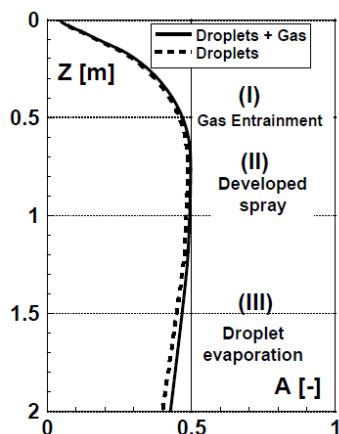
Buchlin (2005) geeft twee toepassingen weer voor inzet van een waterscherm bij het beschermen van een tank tegen warmtestraling. Zo kan het waterscherm voor het te beschermen oppervlak staan waarbij deze verticaal naar beneden is gericht (figuur 4.5a) maar kan het ook direct op het te beschermen oppervlak worden gericht om een continue nevel op de tank te vormen (figuur 4.5b). De waterdruppels absorberen en verstrooien vervolgens de straling afkomstig van het vuur. Dit leidt tot een vermindering in de straling die door het scherm heengaat en zorgt ervoor dat de vloeibare waterdruppels omgezet worden naar waterdamp.



**Figuur 4.5a/b Bescherming tegen hitte door watergordijn om tanks te beschermen (Buchlin, 2005)**

Buchlin (2005) heeft het effect van een horizontaal waterscherm zowel in laboratoriumopstelling als bij praktijkexperimenten onderzocht. Daaruit bleek dat de waterdamp die ontstaat bij de verdamping van de waterdruppels voor een beperkte opname van straling zorgt. Veruit het grootste gedeelte wordt door de waterdruppels (met een gemiddelde diameter van  $165\mu\text{m}$ ) tegengehouden. Ook blijkt dat de absorptie door het watergordijn verschilt met haar hoogte. Vlak na het vrijkomen van het water moet het gordijn zich nog ontwikkelen, waarna een vermindering in snelheid voor een toename in de concentratie van druppels en daarmee voor een optimale absorptie van stralingsenergie zorgt. Vervolgens gaat door de opname van de energie de verdamping van de druppels een rol spelen en wordt het afschermende effect van het gordijn vermindert. In figuur 4.6 is dit effect weergegeven. Daarbij is het watergordijn van boven naar beneden gericht.

Ook blijkt uit onderzoek van Buchlin (2005) dat bij een horizontaal waterscherm een verhoogde druk een positief effect heeft op het absorberende vermogen van het watergordijn. Dit komt doordat de verhoogde druk zorgt voor kleinere druppelgroottes en daarmee de verhoogde druppelconcentratie een betere afscherming biedt. Een verhoogde druk is meer effectief dan het vergroten van het aantal spuitstukken over eenzelfde lengte. Ook het achter elkaar inzetten van meerdere lijnen met spuitkoppen vergroot de efficiëntie van een waterscherm. Daarbij moet wel een onderlinge afstand worden aangehouden van minimaal de helft van de spray hoogte, omdat er anders een negatief effect ontstaat. Bij de praktijkexperimenten van Buchlin werd de straling met maar liefst 50 tot 75 procent vermindert. Het richten van het watergordijn op een wand vergroot de afschermende prestatie van een watergordijn verder. Dit komt doordat er een film van water over de wand valt die continu wordt verversd waardoor absorptiewaarden tot wel 90 procent mogelijk zijn (Buchlin, 2005)



**Figuur 4.6** Verticale verdeling van de totale adsorptie van straling door een watergordijn (Buchanan, 1994)

Uit een simulatieonderzoek van Boulet, Collin en Parent (2006) bleek dat watergordijnen de warmtestraling van een bron door het watergordijn verminderd wordt door convectie en verdamping van het water. Hierdoor blijft de temperatuur binnen het medium (het watergordijn) wel bijna net zo hoog als aan de rand van het watergordijn. Ook blijkt uit de simulatie dat meer druppels per volume-eenheid de doorgelaten straling verminderen (Boulet et al., 2006). In een ander onderzoek van Parent et al. (2016) werden experimenten op grote schaal uitgevoerd. Bij het inzetten van een zwarte straler was ingebrachte hogedruk watermist (werkdruk van 85 bar) in staat om de straling met 89 procent te verminderen. De sprinkler werkend op hogere druk (1,3 bar op de spuitstuk) was voor 62 procent effectief waar de sprinkler op lage druk de straling (0,3 bar op het spuitstuk) met ongeveer 20 procent verminderde. Door de hogere druk werden meer verfijnde druppels gegenereerd die in een hogere druppelconcentratie een scherm vormde. Uit dit onderzoek blijkt het belang van de druppelgrootte en druppelconcentratie om straling te verminderen (Parent et al., 2016).

In een artikel van Murrel et al. (1995) staat dat voor het opnemen van warmtestraling het meest optimale resultaat wordt behaald wanneer een (sprinkler)nozzle een hoge wateropbrengst heeft, kleine druppels laat ontstaan en deze druppels een niet te grote snelheid hebben (Murrel, Crowhurst & Rock, 1995).

In hun onderzoek hebben Lechene et al. (2009) gekeken hoe de richting waarin het waterscherm wordt ingesteld van invloed is. Vanuit de gedachte van een sprinklersysteem hebben zij onderzoek gedaan naar het verschil in effect tussen een waterscherm die druppels van onder naar boven spuit en een waterscherm waarin de druppels van boven naar beneden worden gespoten. Op basis van berekeningen en hun lab-experimenten geven de onderzoekers aan dat bij het inbrengen van waterdruppels in een opwaartse richting (van beneden naar boven) een verbetering in effectiviteit van ongeveer factor 3 mogelijk is. De verklaring hiervoor is dat de druppels langer in het 'stralingsveld' aanwezig zijn en daarmee meer straling kunnen tegenhouden.

### 4.3.2 Waterschermen bij de brandweer

Binnen de brandweer worden op verschillende manieren waterschermen ingezet. Vrij standaard en redelijk grove methoden zijn het inzetten van een straatwaterkanon of handstralen om een waterscherm tussen gebouwen op te trekken. Afhankelijk van het product, toepassing en omstandigheden kan met een straatwaterkanon of handstralen een waterscherm worden opgetrokken. Daarbij zullen verschillen zijn in bijvoorbeeld koelend vermogen, druppelgroottes en -concentraties en afstand waarover het scherm effect heeft.

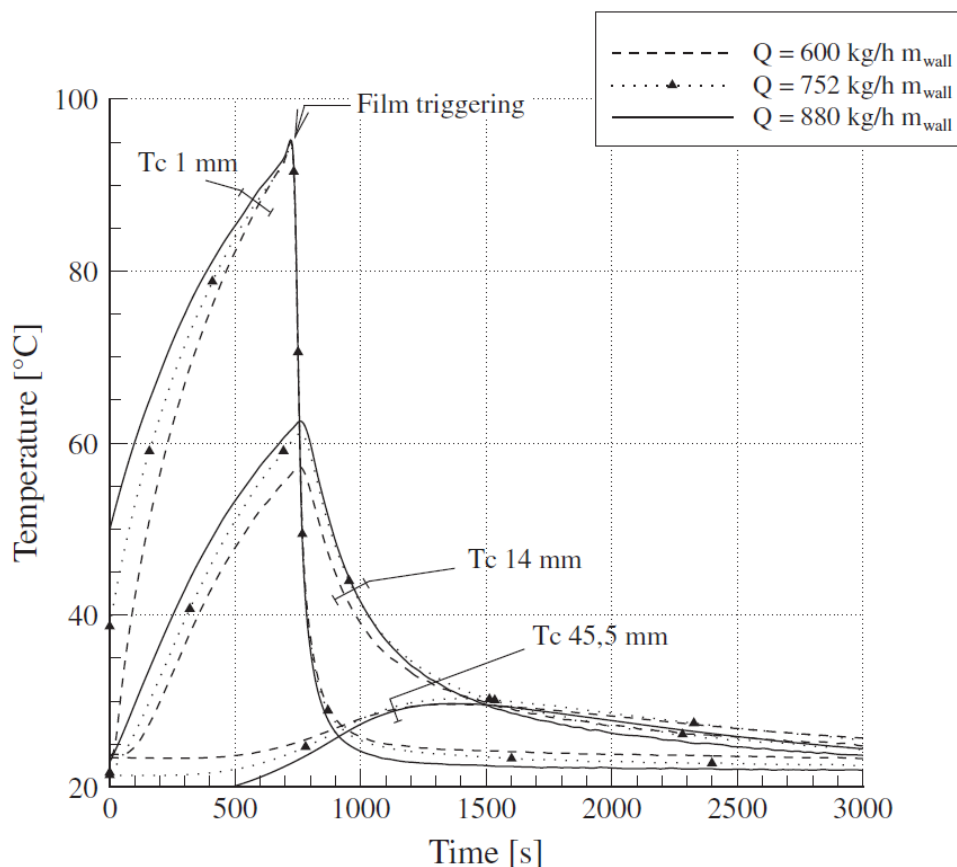
Naast deze 'traditionele methoden' bestaan er ook specifieke watervoerende armaturen die specifiek tot doel hebben om een waterscherm op te trekken. Zo hebben sommige korpsen beschikking over een zogenaamd hydroschild. Het principe van een hydroschild is eenvoudig. Vanuit een lage drukslang wordt water tegen een haaks hierop gemonteerd plaatje gespoten. Hierdoor ontstaat een waaivormig vlak water (het waterscherm). Dit hydroschild kan tussen twee gebouwen geplaatst worden om zodoende een waterscherm te vormen tussen het stralende en ontvangende gebouw. Afhankelijk van onder andere de uitvoering van het systeem, waterdruk en -levering en positionering kunnen druppelgroottes, koelend vermogen en grootte van het scherm verschillen. Een ander systeem dat bij sommige brandweerkorpsen in gebruik is, is het firedefender systeem. De firedefender is een buis met kleine gaatjes (nozzles) waar onder druk water doorheen wordt gepompt. Uit de nozzles ontstaat vervolgens een waterscherm die gebruikt kan worden ter afscherming. Buizen zijn onderling te koppelen waardoor over een grote lengte een waterscherm opgezet kan worden. Volgens de productinformatie van de fabrikant kan het firedefender systeem ook gekanteld worden. Op deze manier is het mogelijk om het systeem zo in te zetten dat het de gevel van een gebouw besprenkeld en hier als het ware een waterlaag overheen kan laten lopen. Op de effectiviteit van het nathouden van een blootgestelde gevel wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan.

#### 4.4 Nathouden belendende wand

De bescherming door een laagje water dat over een wand loopt kan zowel bestaan uit het absorberen van uitgestraalde thermische energie alsook het middels convectie koelen van de wand waar het water overheen stroomt.

In een boek van Cote (2003) valt te lezen dat Underwriters Laboratories (UL) experimenten heeft uitgevoerd waarbij een metalen plaat werd beschermd tegen een benzinebrand middels het opbrengen van een dun laagje water over de plaat. Uit de experimenten zou blijken dat de temperatuur van de metalen plaat binnen de grenzen bleef en deze door de waterlaag beschermd werd tegen significante beschadiging. Dit bleek niet zo te zijn wanneer het water de plaat niet raakte en als een watergordijn tussen de vlammen en plaat in werd gezet. In dit laatste geval bleek de temperatuur van het metaal drie tot vier keer zo groot te zijn in vergelijking met de situatie waarin een laagje water direct over de plaat liep. Volgens hen laat dit zien dat de door de geringe absorptie van water de doorgang van de straling niet goed wordt tegengehouden. Het effect van water is groter wanneer het direct op het blootgestelde gebouw wordt aangebracht en dit object koelt als gevolg van de verdamping van deze waterlaag (Cote, 2003).

In een onderzoek van Aubert, Candelier en Sollicc (2013) zijn experimenten uitgevoerd naar de overdracht van warmtestraling op een laagje water lopend over een wand. Uit de resultaten bleek de temperatuur van de met een waterlaag gekoelde wand laag te blijven (30 °C) wanneer deze bloot werd gesteld aan een straling van 5 kW/m<sup>2</sup>. Bij hogere stralingswaarden moet er een hoger debiet worden toegepast. Als verklaring hiervoor wordt gegeven dat meer water meer energie op kan nemen maar ook de dikkere waterlaag de wand beter beschermt tegen doorgelaten straling. Het is daarbij belangrijk om voldoende water te laten stromen om zo de waterfilm over het hele oppervlak intact te houden. Verder werd in het onderzoek aangetoond dat bij een opgewarmde wand van 100 °C snel een temperatuurdaling werd bereikt wanneer de waterlaag begon te stromen (zie volgende figuur) (Aubert et al., 2013).



Er werd gestart na het bereiken van een temperatuur van 100 °C voor het oppervlakte van de wand. De temperatuur is op verschillende diepten in de wand gemeten.

**Figuur 4.7 Temperatuurverloop op het midden van een wand na starten van waterfilm met verschillende debieten (Aubert et al., 2013)**

Aangegeven wordt (Aubert et al., 2013) dat 3.8 l/min.m (liter per minuut per strekkende meter gevel, bij een gevelhoogte van 2.5 m) voldoende is om de temperatuur van het geveleppervlak in circa 5 minuten terug te brengen van 100 °C naar minder dan 30 °C. Veilig naar boven 'afgerond' is dan 5 l/min.m<sup>2</sup> het benodigde koelend vermogen. Niet al het water uit de straalpijp komt op de gevel en een deel spat er ook weer van af. Rekening houdend met een effectiviteit van 50 % leidt dit dan tot 10 l/min.m<sup>2</sup>, nodig voor het koelen van een gevel. Dit sluit aan bij de huidige vuistregel, maar in de inschatting van de benodigde hoeveelheid water zitten nu nog veel aannamen.

## 4.5 Schuim op blootgestelde gevelbelendende wand

Een blusmiddel waar de brandweer over beschikt is schuim. In de meeste gevallen wordt het schuim gebruikt om vloeistofbranden mee te blussen of brandgevaarlijke vloeistofplassen af te kunnen dekken. Er bestaan echter ook toepassingen waarin het schuim gebruikt wordt als blusmiddel bij binnenbrandbestrijding en om materialen af te dekken om zo te voorkomen dat deze tot ontbranding komen. In deze paragraaf worden enkele onderzoeken behandeld die het effect van schuim hebben onderzocht om brandoverslag te voorkomen.

Het schuim heeft zowel een absorberende werking als ook een reflecterende en verstrooiende werking (Tafreshi & Di Marzo, 1998). De warmtestraling wordt vooral wat

dieper in de schuimlaag tegen gehouden. Bij de experimenten (Tafreshi & Di Marzo, 1999) wordt begonnen met een schuimlaagdikte van 10 cm. De verdamping van het water heeft daarbij het grootste effect op vermindering van de doordringende stralingsenergie (Tafreshi & Di Marzo, 1999).

Voor het juist toepassen van schuim is het belangrijk om de mate van verschuiming goed af te stellen. Zwaar schuim zal namelijk te veel vloeibare eigenschappen hebben en daardoor sneller van een gebouw glijden. Te licht schuim zal daarentegen naar grote waarschijnlijkheid te snel weg worden geblazen door de wind die als gevolg van de brand ontstaat. Voor een juiste werking van het schuim is het van belang dat het zo lang mogelijk op het te beschermen gebouw blijft zitten. Hiertoe is het belangrijk om mengratio's aan te houden zoals door de fabrikant worden aanbevolen (Tafreshi & Di Marzo, 1998). Een voordeel van schuim is dat het makkelijk ruimtes en oppervlakken op kan vullen door zijn hoge expansie ratio (Tafreshi & Di Marzo, 1999).

Madrzykowski (1988) heeft onderzoek gedaan naar het gebruik van schuim om brandoverslag naar gebouwen te voorkomen. Daarbij werd opgebracht schuim blootgesteld aan warmtestraling van 15 tot 60 kW/m<sup>2</sup> en onderzocht in hoeverre de ontbrandingstijd van een stuk multiplex werd vertraagd. Uit zijn onderzoek blijkt met het opbrengen van schuim de efficiëntie wordt verbeterd en de ontstekingstijd van het materiaal twee keer zo groot te zijn dan bij het toepassen van eenzelfde massahoeveelheid aan water. Een ander rapport van Madrzykowski (1998) geeft daarbij wel aan dat wanneer schuim na het opbrengen direct aan warmtestraling wordt blootgesteld, het effect minder groot zal zijn. Dit komt doordat het schuim dan geen tijd heeft gehad om voldoende in het te beschermen materiaal door te dringen (Madrzykowski, 1998).

In een onderzoek van Tafreshi & Di Marzo (1999) bleek het schuim een sterk isolerende werking te hebben, waardoor het langer duurde voordat warmtestraling het oppervlakte van het houten monster wist te bereiken. Daarbij speelt de afbraak van de schuimlaag wel een rol. Hoe sneller deze afbraak is, hoe sneller de warmte zich richting het te beschermen oppervlakte weet te verplaatsen.

Bij een test van Boyd en Di Marzo (1998) werd bij 26 experimenten schuim blootgesteld aan stralingswaarden tussen 10 en 18 kW/m<sup>2</sup>. Bij acht tests viel teveel schuim van de verticale wand om mee te worden genomen in de resultaten. Bij de 15 overgebleven resultaten kwam naar voren dat wanneer het schuim wordt blootgesteld aan straling het uitzet, waardoor de structuur van het schuim breekt en lucht en waterdamp vrijkomen. Door dit principe wordt de stralingsenergie opgenomen maar breekt tegelijkertijd de schuimlaag af evenredig met de warmtestroom waar het aan blootgesteld wordt (Boyd & Di Marzo, 1998).

Bij een onderzoek van Tafreshi en Di Marzo (1998) werden vijf verschillende schuimsoorten onder laboratoriumcondities getest. De absorptiecoëfficiënten voor de vijf verschillende schuimsoorten lagen tussen 0.51 tot 0.81cm<sup>-1</sup>. Deze absorptiecoëfficiënt geeft weer hoever de straling in het schuim weet te dringen voordat het geabsorbeerd is. Het proteïne schuim scoorde bij dit onderzoek beter dan de synthetische schuimsoorten. Het reflecterende en verstrooiende effect werd bij dit onderzoek niet gemeten (Tafreshi & Di Marzo, 1998).

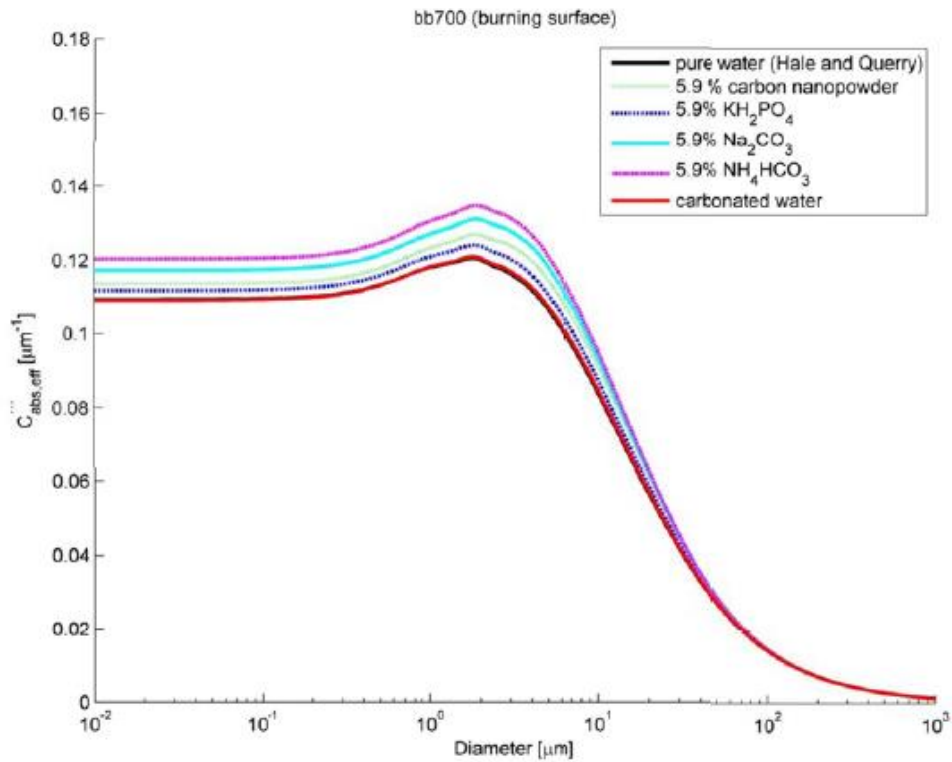
## 4.6 Aanbrengen van gel

Een andere toepassing die gebruikt wordt om water meer effectief te maken als blusmiddel is het toevoegen van middelen om het water een meer gelachtige structuur te geven. De gel wordt daarbij verkregen door een geleermiddel (verdikkingsmiddel) aan water toe te voegen waardoor het water een gelachtige vorm krijgt. De specifieke karakteristieken van deze gel zijn afhankelijk van de karakteristieken van het geleermiddel. De werking van de gel berust vooral in het beter opnemen van thermische energie en heeft daarmee vooral invloed op de conductie van warmte naar het opgebrachte oppervlakte (Tafreshi & Di Marzo, 1999).

In het onderzoek van Tafreshi en Di Marzo (1999) werd gel aangebracht op houten en aluminium monsters met een concentratie van 6 procent geleermiddel en een dikte van 5 millimeter. Deze laag werd blootgesteld aan een warmtestraling van 18 kW/m<sup>2</sup>. De vertraging in warmtestroom naar het oppervlak van het monster bleek beperkt te zijn. Hoewel de resultaten met gel een stuk beter waren dan resultaten waar geen bescherming werd toegepast, blijkt een goed aangebrachte schuimlaag het blootgestelde materiaal langer en beter te beschermen dan de gel. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt doordat het schuim een betere bescherming biedt tegen stralingshitte. Gel biedt wel goede mogelijkheden bij verticale oppervlakten doordat het hier vaak beter blijft zitten dan opgebracht (lichter) schuim (Tafreshi & Di Marzo, 1999).

## 4.7 Toevoegen van additieven aan het water

Först en Möller (2011) hebben in hun onderzoek ook gekeken of het toevoegen van additieven aan water de capaciteit van een waterdruppel om warmtestraling te absorberen verder vergroot. Daarbij blijkt het lastig te zijn om geschikte additieven te vinden welke niet brandbaar en niet giftig zijn, maar toch in staat zijn om de capaciteit van het water te vergroten. De additieven vergroten de absorptiecapaciteit van het water wel, maar dit gebeurde slechts in zeer beperkte mate. De maximale toename van de absorptiecapaciteit, die Först en Möller in hun onderzoek hebben gevonden, was 4 procent. Meer onderzoek naar het effect van andere soorten additieven is volgens hun nodig om betere resultaten te halen. Een interessant alternatief dat de onderzoekers aandragen is het toevoegen van niet brandbare en onoplosbare nanodeeltjes in waterdruppels om de straling meer te verstrooien en deze daardoor te kunnen verminderen. Veelbelovend lijkt daarbij het toevoegen van nano-deeltjes die een grote hoeveelheid aan CO<sub>2</sub> bevatten (Först & Möller, 2011).



Op de verticale as staat een afgeleide van de absorptie coëfficiënt gecorrigeerd voor het volume aan druppels.

**Figuur 4.8** Het effect van verschillende addities op de absorptie van straling vergeleken met water (Försth & Möller, 2011)



# 5 Conclusie

In de praktijk probeert de brandweer op verschillende manieren, met verschillende technieken, brandoverslag via de buitenlucht te voorkomen. Deze technieken zijn echter niet *evidence based*. Vaak is niet goed bekend welke natuurkundige principes aan bepaalde technieken ten grondslag liggen. In dit onderzoek wilden we meer te weten komen over het verschijnsel brandoverslag, de verschillende technieken en de werking en effectiviteit ervan in praktijk. In dit laatste hoofdstuk wordt een antwoord gegeven op de twee onderzoeksvragen.

## 5.1 Wijzen van brandoverslag

De eerste onderzoeksvraag had tot doel om vanuit een natuurkundig perspectief in kaart te brengen wanneer een brand kan overslaan. Daartoe is de volgende onderzoeksvraag gesteld: Op welke wijze vindt brandoverslag tussen gebouwen plaats?

In dit onderzoek is brandoverslag conform de les- en leerstof gedefinieerd als uitbreiding van een brand via de buitenlucht. Een belangrijke vorm van brandoverslag is de branduitbreiding die kan plaatsvinden tussen twee gebouwen. Brandoverslag kan op verschillende manieren plaatsvinden. In dit rapport zijn de volgende oorzaken van brandoverslag onderscheiden, namelijk brandoverslag:

- > door direct vlamcontact
- > als gevolg van convectie (anders dan vlamcontact)
- > als gevolg van warmtestraling
- > door vliegvlam.

Vooraf bij de eerste drie oorzaken speelt het principe van warmteoverdracht een belangrijke rol in het begrijpen van brandoverslag. Bij warmteoverdracht gaat het om de overdracht van thermische energie (warmte) van het brandende object of voorwerp naar het naastgelegen object of voorwerp. De warmteoverdracht tussen voorwerpen komt in drie verschillende vormen voor: conductie, convectie en straling.

### Conductie

Bij conductie vindt de overdracht van warmte plaats binnen vaste stoffen of van de ene naar de andere vaste stof en dus niet via de buitenlucht. Conductie speelt dus geen directe rol bij brandoverslag. Wel kan de energie die door straling op het belendende gevel valt, door conductie worden doorgeleid naar achterliggend materiaal. Denk bijvoorbeeld aan gevelpanelen met een metalen buitenlaag, waarbij de warmte door conductie naar het isolatiemateriaal wordt geleid.

### Convectie

Bij convectie vindt de overdracht van warmte plaats via de lucht, maar ook via vuur of rook. Convectie speelt daarom een rol bij brandoverslag op een afstand waarbij direct vlamcontact met de bedreigde gevel kan optreden. Er wordt daarbij in het algemeen van uitgegaan dat dit kan plaatsvinden tot een afstand van 5 meter.

Convectie komt in alle brandstadia voor, maar heeft relatief gezien de grootste invloed tijdens de beginstadia van een brand, wanneer temperaturen en stralingsniveaus nog relatief laag zijn. Bij convectie stijgt de warmte voornamelijk op. Daarbij wordt opgemerkt dat rook en vlammen (als verschijningsvorm van convectie) bij direct contact met een naastgelegen object ook in latere brandstadia nog een grote invloed kunnen hebben op het veroorzaken van brandoverslag.

## Straling

Warmtestraling is de energie die ieder voorwerp uitzendt. De stralingsenergie is evenredig met de vierde macht van de absolute temperatuur (in Kelvin,  $\sim T^4$ ). Als de temperatuur met een factor 2 toeneemt neemt de energie toe met een factor 16. Bij brand kan de warmtestraling van de vlammen en de rook (met temperaturen van circa 950 °C) voldoende energie leveren om voorwerpen op een bepaalde afstand te ontsteken. Warmtestraling is, net als licht, een elektromagnetische straling en heeft geen medium nodig om zich voort te planten.

Warmtestraling, zo blijkt uit de literatuur, is de belangrijkste vorm van warmteoverdracht waarmee brandoverslag kan plaatsvinden. De hoeveelheid warmtestraling neemt erg snel toe bij oplopende temperaturen en kan zich over relatief grote afstand in alle richtingen verplaatsen.

## Brandoverslag

Bij brandoverslag moet een naastgelegen object of gedeelte van een gebouw voldoende opgewarmd worden om tot ontbranding te kunnen komen. Hoewel alle vormen van warmteoverdracht hierop van invloed zijn, spelen voornamelijk convectie en straling een rol in de branduitbreiding via brandoverslag.

Brandoverslag kan ook plaatsvinden doordat vonken of vliegvuur op brandbare materialen terechtkomen. Als deze een lage ontbrandingstemperatuur hebben, kunnen ze worden ontstoken. Vliegvuur en vonken gaan vooral een rol van betekenis spelen wanneer een naastgelegen object reeds door ontvangen straling dermate is opgewarmd dat alleen een ontstekingsbron nog ontbreekt om het materiaal te doen ontbranden. Dus ook op deze vorm van brandoverslag heeft de uitgezonden en ontvangen warmtestraling invloed.

## Factoren van invloed op brandoverslag

Naast de verschillende vormen van brandoverslag en hun natuurkundige principes is ook onderzoek gedaan naar factoren die van invloed zijn op brandoverslag.

De kans dat een brand in een object (gebouw) overslaat door straling naar een ander object wordt bepaald door:

- > de intensiteit van de straling van de brand (stralingsniveau van de bron)
- > de intensiteit van de straling die door het blootgestelde object wordt ontvangen (stralingsniveau op het ontvangende object)
- > de hoeveelheid energie die nodig is om materialen van het blootgestelde object te laten ontbranden (kritische ontstekingsflux)
- > thermische traagheid.

Het stralingsniveau van de bron is evenredig met de temperatuur van de brand ( $E \sim T^4$ ). De temperatuur wordt op zijn beurt bepaald door de calorische waarde van materialen die branden en de mate waarin zuurstof het brandende materiaal kan bereiken. De toevoer van lucht (zuurstof) hangt af van de brandende voorwerpen. Massieve voorwerpen branden minder snel dan 'open' voorwerpen (een massief houten balk versus een stapel pallets). Ook

wordt de toevoer bepaald door de mate van ventilatie van de ruimte. Tezamen bepaalt dit het brandvermogen (heat release rate) en daarmee de temperatuur.

Het stralingsniveau dat door het blootgestelde object wordt ontvangen wordt bepaald door het niveau van de bron en de zichtfactor. Dit niveau wordt weer bepaald door het zichtbare oppervlak van de brand, gezien vanuit het blootgestelde object en de afstand tussen bron en ontvanger.

De kritische stralingsflux is een materiaaleigenschap die aangeeft met welke stralingsintensiteit gedurende een (oneindige) lange blootstellingsduur het materiaal ontbrand.

De thermische traagheid is een deels intrinsieke materiaaleigenschap, want afhankelijk van de specifieke warmtegeleiding. Verder speelt ook een rol hoe het materiaal de invallende stralingsenergie kan doorgeleiden, naar bijvoorbeeld de achterliggende gevel. Dit is afhankelijk van de specifieke constructie. Al deze factoren bepalen de temperatuur van het blootgestelde materiaal. Deze temperatuur is bepalend of dit materiaal zal ontbranden. Dit kan zelfontbranding zijn, of ontbranding door externe hitte bron (bijvoorbeeld een vonk, piloted ignition).

Twee andere factoren die invloed kunnen hebben op de kans op brandoverslag zijn:

- > Direct vlamcontact  
Dit speelt een rol als het brandende en het blootgestelde object dichtbij elkaar staan. Waarbij een afstand van 5 meter als minimale afstand wordt beschouwd om direct vlamcontact te voorkomen.
- > Wind  
Door de wind kunnen de vlammen in de richting van het blootgestelde object worden gebogen. Ook kunnen de vlammen langer worden dan bij windstil weer. Beide effecten vergroten de straling op het blootgestelde gebouw.

## 5.2 Technieken om brandoverslag te voorkomen

De tweede onderzoeksvraag spitst zich toe op voor de brandweer beschikbare inzettechnieken om brandoverslag te voorkomen. De bijhorende vraag luidt als volgt: Wat zijn effectieve technieken waarmee de brandweer deze brandoverslag kan voorkomen?

De technieken die de brandweer ter beschikking heeft, hebben allemaal als doel het blootgestelde object af te schermen voor straling en eventueel ook te koelen. Daarvoor zijn de middelen water, schuim, gel en additieven beschikbaar.

### Water

Veelal wordt water, als meest beschikbare blusmiddel, ingezet om overslag te voorkomen. Water absorbeert een deel van de warmtestraling en koelt het object dat nat wordt gehouden. Water wordt op twee manieren toegepast:

- > Afschermen  
Tussen de brand en het blootgestelde gebouw wordt een waterscherm gemaakt, bijvoorbeeld met een straatwaterkanon. De afschermende werking hangt sterk af van de specifieke omstandigheden en kan in de praktijk gering zijn.

> Koelen

De blootgestelde gevel wordt nat. Dit is erg effectief. Bij een gevel, die al enige tijd is blootgesteld en opgewarmd tot circa 100 °C, kan de temperatuur binnen enkele minuten worden teruggebracht naar minder dan 30 °C. Behalve het koelende effect van het water wordt ook een deel van de straling direct door het waterlaagje geabsorbeerd. Het is van belang om de gevel constant nat te houden, met name die delen die het meest kwetsbaar zijn (zoals houten en kunststof elementen op delen van de gevel met de hoogste straling).

### Schuim

Door het aanbrengen van een schuimlaag op bijvoorbeeld de gevel van een blootgesteld gebouw wordt deze afgeschermd van de straling. Het schuim absorbeert en reflecteert namelijk deels de straling. Zolang het schuim aanwezig is geeft dit een goede afscherming. De schuimlaag moet worden onderhouden, want door de warmtestraling wordt het schuim afgebroken. Daarnaast is het van belang een juiste schuimdichtheid toe te passen. Te zwaar schuim kan van de gevel afglijden en te licht schuim kan worden weggeblazen door de wind, die ook ten gevolge van de brand kan ontstaan.

### Gel

Door toevoegingen aan het water kan er een gel ontstaan. Daarmee kan de blootgestelde gevel worden bedekt. De gellaag heeft dezelfde soort van werking als een waterlaag: de straling wordt deels geabsorbeerd en de gevel wordt gekoeld. Net als schuim breekt ook de gellaag af door blootstelling aan de straling en moet dus worden onderhouden. Ten opzichte van schuim blijft gel beter gehecht aan de gevel en wordt minder snel door wind weggeblazen.

### Additieven

Additieven kunnen de absorptiecapaciteit van water verhogen. Op dit moment is daar nog weinig onderzoek over beschikbaar en lijkt het effect op de absorptiecapaciteit beperkt.

## 5.3 Conclusie

Bij brandoverslag spelen meerdere natuurkundige principes een belangrijke rol. In de regel zal brandoverslag plaatsvinden door warmteoverdracht middels convectie en straling. Vooral straling heeft een grote invloed op de warmteoverdracht naar omliggende gebouwen. De temperatuur van de stralingsbron heeft een grote invloed op de stralingsintensiteit die bij een brand wordt uitgezonden. Een belangrijke factor om de kans voor brandoverslag te bepalen is de onderlinge afstand tussen de stralingsbron en de ontvanger van deze warmtestraling. Eenvoudig gezegd geldt dat hoe dicht een object zich bij de stralingsbron bevindt, hoe groter de stralingsintensiteit is die het object ontvangt en hoe groter de kans dat kritische stralingsfluxen worden bereikt. Een algemene afstand of richtlijn over de afstand waarover brandoverslag plaats kan vinden is niet te geven. Daarvoor is deze teveel afhankelijk van de specifieke omstandigheden zoals brandkenmerken, eigenschappen van het ontvangende gebouw en overige invloedfactoren zoals wind en materiaal.

In het geval van direct vlamcontact met een naastgelegen gebouw zal hier de grootste kans op brandoverslag zijn. Wanneer dit niet het geval is, is het van belang om in te schatten waar de kans op brandoverslag het grootst is om effectief op te treden. Daarbij zal moeten worden gekeken naar de eigenschappen van het brandende gebouw, zoals mogelijke openingen waar de brand uitkomt en waar de temperatuur het hoogst is in relatie tot de

afstand van naastgelegen gebouwen. Bij naastgelegen objecten zijn vooral ramen, hout en kunststoffen kwetsbaar. Ook kunnen daken met asfaltbitumen relatief snel tot ontbranding komen.

Wanneer het gaat om het inzetten van een blusmiddel zijn er verschillende opties. Het aanbrengen van een dun laagje water en dit vervolgens in stand houden biedt in de meeste gevallen een zeer goede bescherming tegen zowel convectie als straling. Ook het aanbrengen van een schuimlaag op een naastgelegen gebouw lijkt een goede optie in het voorkomen van brandoverslag. Net als bij de waterlaag is het ook hier van belang om de schuimlaag intact te houden en continu schuim te blijven aanbrengen op de locaties waar het wordt afgebroken door de inkomende stralingsenergie of vlammen. Het plaatsen van een waterscherm heeft een beperkter effect in de vermindering van straling en is daarom minder effectief dan bijvoorbeeld het aanbrengen van de waterlaag. Het aanbrengen van gel of het toevoegen van additieven aan water om zo een betere bescherming te kunnen bieden lijkt maar beperkt te werken.

# Literatuur

- Atreya, A. (2002). Convection Heat Transfer. In M.J. Hurley (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Third Edit, p. 1.44-1.72). Quincy, Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.
- Aubert, A., Candelier, F., & Sollicec, C. (2013). Experimental study of heat transfer in a water film exposed to a radiant flux. Application to thermal protection of composite walls. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 10–17.  
<http://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.06.005>
- Barnett, C. R. (1989). Fire separation between external walls of buildings. *Fire Safety Science*, 2, 841–850.
- Boulet, P., Collin, A., & Parent, G. (2006). Heat transfer through a water spary curtain under the effect of a strong radiative source. *Fire Safety Journal*, 41(1), 15–30.  
<http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.07.007>
- Boyd, C. F., & Marzo di, M. (1998). The behavior of a fire-protection foam exposed to radiant heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(12), 1719–1728.  
[http://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00280-9](http://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00280-9)
- Brandweeracademie (2013a). *Bevelvoerder Brandbestrijding* (3e druk). Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2013b). *Basis voor brandveiligheid - De onderbouwing van brandbeveiliging in gebouwen* (1e druk). Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2014). *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2015). *Defensieve buiteninzet: warmtestraling en waterschermen*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2016). *Casuïstiek ondergeventileerde branden*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Buchanan. (1994). *Fire Engineering Design Guide*. Canterbury: Centre for Advanced Engineering - University of Canterbury.
- Buchlin, J. M. (2005). *Thermal Shielding by Water Spray Curtains*. Belgium.
- Carlsson, E. (1999). *External Fire Spread To Adjoining Buildings - A review of fire safety design guidance and related research*. Lund, Sweden.
- Cote, A. E. (2003). *Operation of Fire Protection Systems - a special edition of the fire protection handbook*. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Deleu, C. (2009). *Onderzoek naar de risico's tot brandoverslag bij een volontwikkelde brand in een industriegebouw naar naastliggende gebouwen*. Gent.
- DiNunno, P.J. & Forssell, E.W. (2002). Clean agent total flooding fire extinguishing systems. In M.J. Hurley (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Third Edit, pp. 1483-1530). Quincy, Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.
- Drysdale, D. (1985). *An Introduction to Fire Dynamics*. Chicester: John Wiley And Sons.
- Eilander, S. (2005). Brandoverslag door straling. Kennisbank Bouwfysica.
- Försth, M., & Möller, K. (2011). *Absorption of heat radiation in liquid droplets*. Boras.
- Försth, M., & Möller, K. (2013). Enhanced absorption of fire induced heat radiation in liquid droplets. *Fire Safety Journal*, 55, 182–196.  
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.005>
- Heskestad, G. (2002). Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment. In P. J. DiNunno, D. Drysdale, C. Beyler, & E. Al. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Third Edit, p. 2.1-2.17). Quincy, Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.

- Hostikka, S., & McGrattan, K. (2006). Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays. *Fire Safety Journal*, 41(1), 76–86. <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.09.003>
- Husted, B. P., Ho, J., & Martin, D. A. (2016). Comparison of Experiments and Numerical Simulations of a High Pressure Water Mist Curtain as a Radiation Shield. In *Interflam 2016 - Fire Science & Engineering Conference* (pp. 505–510). London, UK: Interscience Communications.
- Ingason, H., & Lönnemark, A. (2011). Fire spread between industrial premises. In *Fire Safety Science - PROCEEDINGS OF THE TENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM* (pp. 1305–1317). SP Technical Research Institute of Sweden. <http://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-1305>
- Law, M. (1963). *Heat radiation from fires and building separation*. Londen.
- Lechene, S., Blanchard, E., Parent, G., Acem, Z., & Boulet, P. (2009). *Water sprays used as radiative shield, investigations at laboratory scale*. Nancy, France.
- Madrzykowski, D. (1988). *Study of the Ignition Inhibiting Properties of Compressed Air Foam*. Gaithersburg, MD.
- Madrzykowski, D. (1998). *Demonstration of Biodegradable, Environmentally Safe, Non-Toxic Fire Suppression Liquids*. Gaithersburg, MD.
- McGuire, J. H. (1965). Fire and the spatial separation of buildings. *Fire Technology*, 1(4), 278–287. <http://doi.org/10.1007/BF02588470>
- Merci, B., & Beji, T. (2016). *Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures*. London, UK: CRC Press/Balkema.
- Murrel, J. V., Crowhurst, D., & Rock, P. (1995). Experimental Study of The Thermal Radiation Attenuation of Sprays from Selected Hydraulic Nozzles. *Proceedings of Halon Options Technical Working Conference 1995*, 369–378.
- NEN6068. *Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen tuimten* (2016). Delft, Netherlands.
- Oleszkiewicz, I. (1989). Heat transfer from a window fire plume to a building facade. *American Society of Mechanical Engineers*, 123, 163–170.
- Ondrus, J. (1985). *Fire Hazards of Facades with Externally Applied Thermal Insulation*. Lund, Sweden.
- Parent, G., Morlon, R., Acem, Z., Fromy, P., Blanchard, E., & Boulet, P. (2016). Radiative shielding effect due to different water sprays used in a real scale application. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 174–181. <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.008>
- Rockett, J. A., & Milke, J. A. (2002). Conduction of Heat in Solids. In P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. Beyler, W. Douglas Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Third Edit, p. 1.27-1.43). Quincy, Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.
- SFPE. (2002). *Piloted ignition of solid materials under radiant exposure*. USA.
- Tafreshi, A. M., & Marzo di, M. (1998). *Fire Protection Foam Thermal Physical Properties*. College Park, MD.
- Tafreshi, A. M., & Di Marzo, M. (1999). Foams and gels as fire protection agents. *Fire Safety Journal*, 33, 295–305.
- The Physics Hypertextbook (n.d.). *Blackbody Radiation*, opgevraagd op 23 juli 2018 op <http://physics.info/planck/>
- Thauvoye, C., Russo, P., Blanchet, J. M., Duplantier, S., Kruppa, J., Muller, A., ... Zhao, B. (2010). Method for Calculating Heat Fluxes from a Warehouse Fire. In *8th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*. Lund, Sweden.
- Tien, C. L., Lee, K. Y., & Stretton, A. J. (2002). Radiation Heat Transfer. In P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. Beyler, W. Douglas Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Third Edit, p. 1.73-1.89).

- Quincy, Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.
- Tromp, A. J., & Van Mierlo, R. J. M. (2013). *Fire Safety Engineering - Handboek voor de Bouw*. Delft: Uitgeverij Eburon.
- Universiteit Twente. (2014). Samenvatting Stromingsleer.
- Viskanta, R., & Tseng, C. C. (2007). Spectral radiation characteristics of water sprays. *Combustion Theory and Modelling*, 11(1), 113–125.  
<http://doi.org/10.1080/13647830600823175>
- VROM. (2003). *Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1, Deel 1B : Effecten van brand op constructies*. Den Haag.



# Bijlage 1

## Stralingsintensiteit en brandoverslag

De kans op brandoverslag is afhankelijk van de stralingsintensiteit op de blootgestelde gevel en van de materiaaleigenschappen van (delen) van die gevel. In deze bijlage is de stralingsintensiteit uitgewerkt.

De stralingsintensiteit kan worden berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$E = \varnothing \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Met daarin

$$E = \text{Stralingsintensiteit in } W/m^2$$

$$\varnothing = \text{zichtfactor (variërend van } 0 - 1)$$

$$\varepsilon = \text{emissiviteit (variërend van } 0 - 1)$$

$$\sigma = \text{Stefan - Boltzmann constante} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

$$T = \text{absolute temperatuur in } K$$

Bij de berekening(en) die zijn gemaakt kan het volgende worden opgemerkt.

- > De zichtfactor  $\varnothing$  wordt bepaald door afstand van het punt op de blootgestelde gevel tot het vlamfront en de zichthoek waarmee het vlamfront wordt gezien vanuit dat punt (zie bijlage 1).
- > De emissiviteit  $\varepsilon$  varieert. In de praktijk wordt vaak een waarde van 0,7 gebruikt. Voor de hier uitgevoerde berekening worden twee waarden genomen:
  - >  $\varepsilon = 1$  daartuit volgt de maximale straling, 'worst case',
  - >  $\varepsilon = 0,7$  daartuit volgt een gematigde straling, 'best case'.
- > Voor de temperatuur  $T$  is  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1223 \text{ K}$ ) genomen. Overeenkomstig de waarde die is geconstateerd bij full-scale experimenten met uitlaande brand ( $900 \text{ }^\circ\text{C}$  tot  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- > De stralingsintensiteit op de blootgestelde gevel kan worden berekend voor een bepaald brandoppervlak (vlamfront) en een bepaalde afstand van het punt op de blootgestelde gevel tot het vlamfront.
- > De afstand van de blootgestelde gevel tot het vlamfront is in het algemeen kleiner dan de afstand tussen de gevel van het bronobject en het blootgestelde object.

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in onderstaande tabellen, met

- >  $\varepsilon = 0,7$  geel gemarkeerd  $E \geq 15 \text{ kW/m}^2$ , tabel B2.1
- >  $\varepsilon = 1$  geel gemarkeerd  $E \geq 10 \text{ kW/m}^2$ , tabel B2.2

**Tabel B2.1 Stralingsintensiteit E (kW/m<sup>2</sup>) voor ε = 0,7, geel gemarkeerd E ≥ 15 kW/m<sup>2</sup>**

Brand oppervlak m <sup>2</sup>	Afstand (m)											
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	
4	21.0	4.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	34.0	8.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	54.0	18.0	5.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	63.0	25.0	8.0	4.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	67.0	30.0	10.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	70.0	33.0	12.0	6.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
60	73.0	38.0	14.0	7.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
70	75.0	42.0	16.0	8.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
80	76.0	44.0	18.0	9.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
90	77.0	46.0	19.0	10.0	6.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	79.0	49.0	21.0	11.0	7.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
200	83.0	63.0	34.0	19.0	12.0	8.0	6.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0
300	85.0	70.0	43.0	26.0	17.0	12.0	8.0	5.0	3.0	2.0	2.0	2.0
400	86.0	74.0	49.0	32.0	21.0	15.0	11.0	7.0	4.0	3.0	2.0	2.0
500	87.0	76.0	54.0	36.0	25.0	18.0	13.0	8.0	5.0	4.0	3.0	3.0
600	87.0	78.0	58.0	40.0	28.0	21.0	15.0	9.0	6.0	4.0	3.0	3.0
700	87.0	80.0	61.0	44.0	31.0	23.0	17.0	11.0	7.0	5.0	4.0	4.0
800	87.0	81.0	63.0	47.0	34.0	25.0	19.0	12.0	8.0	6.0	4.0	4.0
900	88.0	81.0	65.0	49.0	37.0	28.0	21.0	13.0	9.0	7.0	5.0	5.0
1000	88.0	82.0	67.0	51.0	39.0	30.0	23.0	15.0	10.0	7.0	5.0	5.0

In bovenstaande tabel is de gematigde waarde voor de emissiviteit ε = 0,7 gehanteerd en de hoge (drempel)waarde E ≥ 15 kW/m<sup>2</sup>. Bij zowel een hogere emissiviteit als een hogere (drempel)waarde E zal het gele gebied naar een grotere afstand (naar rechts) schuiven. In het gemarkeerde gebied is de kans op brandoverslag daarom groot.

**Tabel B2.2 Stralingsintensiteit E (kW/m<sup>2</sup>) voor ε = 1, geel gemarkeerd E ≥ 10 kW/m<sup>2</sup>**

Brand oppervlak m <sup>2</sup>	Afstand (m)											
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	
4	30.0	6.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	49.0	12.0	3.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	77.0	26.0	8.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	90.0	36.0	12.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
40	96.0	42.0	14.0	7.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
50	100.0	48.0	17.0	8.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
60	104.0	54.0	20.0	10.0	6.0	4.0	3.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
70	107.0	60.0	23.0	12.0	7.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
80	109.0	63.0	26.0	13.0	8.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
90	110.0	66.0	28.0	14.0	8.0	5.0	4.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	112.0	70.0	30.0	16.0	9.0	6.0	4.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0
200	119.0	90.0	49.0	28.0	17.0	12.0	8.0	5.0	3.0	2.0	2.0	2.0
300	122.0	100.0	61.0	37.0	24.0	17.0	12.0	7.0	5.0	3.0	2.0	2.0
400	123.0	105.0	70.0	45.0	30.0	21.0	16.0	9.0	6.0	4.0	3.0	3.0
500	124.0	109.0	77.0	52.0	36.0	26.0	19.0	11.0	8.0	5.0	4.0	4.0
600	124.0	112.0	82.0	58.0	41.0	29.0	22.0	13.0	9.0	6.0	5.0	5.0
700	125.0	114.0	87.0	62.0	45.0	33.0	25.0	15.0	10.0	7.0	6.0	6.0
800	125.0	115.0	90.0	67.0	49.0	36.0	28.0	17.0	12.0	8.0	6.0	6.0
900	125.0	116.0	93.0	70.0	52.0	39.0	30.0	19.0	13.0	9.0	7.0	7.0
1000	125.0	117.0	96.0	74.0	56.0	42.0	33.0	21.0	14.0	10.0	8.0	8.0

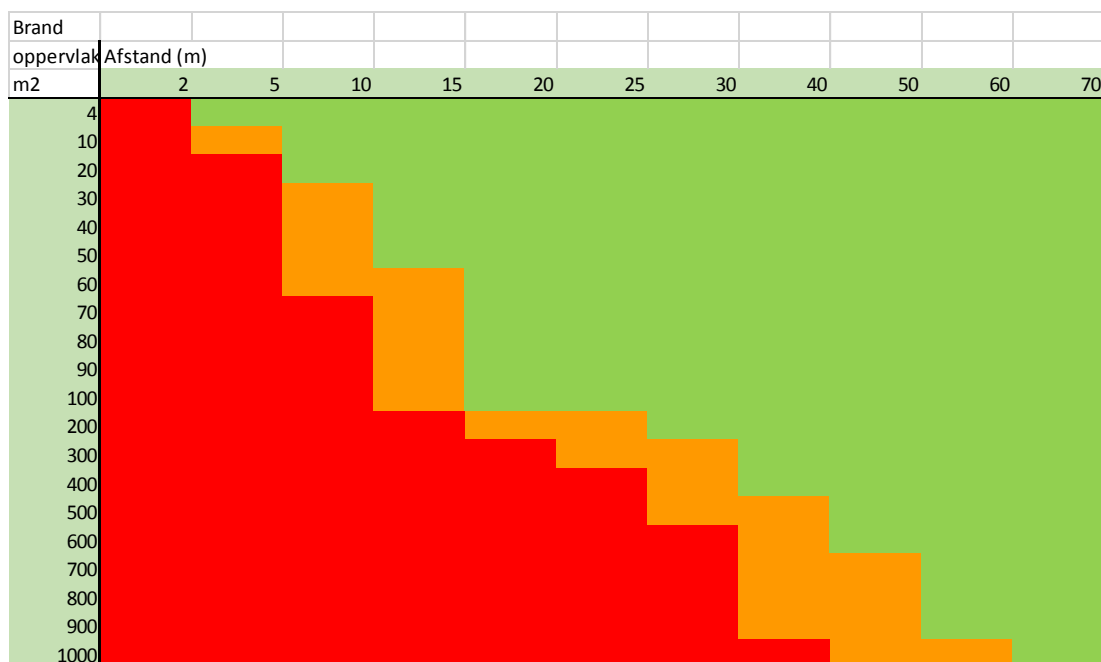
In bovenstaande tabel is de maximale waarde voor de emissiviteit ε = 1 gehanteerd en de lage (drempel)waarde E ≥ 10 kW/m<sup>2</sup>. Bij zowel een lagere emissiviteit als een lagere (drempel)waarde E zal het gele gebied naar een kleinere afstand (naar links) schuiven. In het witte gebied is de kans op brandoverslag daarom gering.

De combinatie van beide tabellen levert tabel B2.4. Hierin is rood het gebied met  $\epsilon = 0,7$  en  $E \geq 15 \text{ kW/m}^2$  (het gele gebied uit tabel B2.1) en groen het gebied met  $\epsilon = 1$  en  $E < 10 \text{ kW/m}^2$  (het witte gebied uit Tabel B2.2).

**Tabel B2.3 Kans op brandoverslag in de drie gebieden**

Kleur in figuur B2.4	Kans op overslag
Rood	Groot
Oranje	Reëel
Groen	Gering

**Tabel B2.4 Kans op brandoverslag**

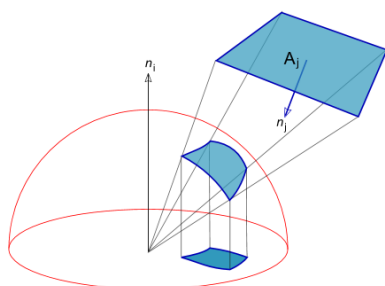


*Oppervlak = het oppervlak van het vlamfront. Bij een uitslaande brand is dit niet alleen het oppervlak van de opening waar de vlammen uitkomen maar het hele vlamlichaam.  
Afstand = de afstand van het vlamfront tot het blootgestelde object. Dit is een kleinere afstand dan die tussen de gevels (van het brandende gebouw en het blootgestelde gebouw).*

# Bijlage 2

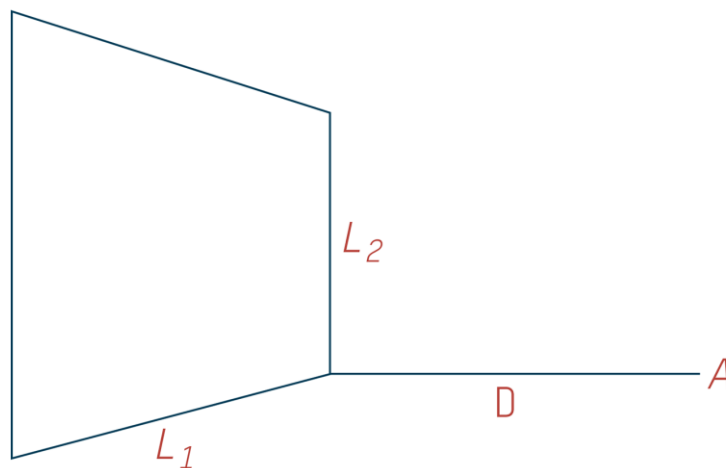
## Zichtfactor

In geval van brand is de zichtfactor de ruimtehoek waarmee een waarnemer het vlamfront (vuur en hete rook) kan zien. Daarbij is de zichtfactor het deel (fractie) van de halve bol die gevuld is met het vlamfront. Als de helft van de bol is bedekt met het vlamfront, is de zichtfactor 1.



**Figuur B1.1** Zichtfactor

In het geval van twee evenwijdige vlakken (gevels) kan de zichtfactor worden berekend met vergelijking B1.3, met bijbehorende situatieschets in figuur B1.2.



**Figuur B1.2** Het oppervlakte element A bevindt zich loodrecht boven de hoek van de stralingsbron (vlak L1-L2)

Het oppervlakte element A bevindt zich loodrecht boven het hoekpunt van de stralingsbron, het vlak L1-L2. Het vlak waarin A zich bevindt (wordt hier niet getoond) is evenwijdig met het vlak L1-L2 (Deleu, 2009).

$$\phi_A = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \left( \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \left( \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

Waarbij:

$\phi_A$  = zicht factor

$$X = \frac{L_2}{D}$$

$$Y = \frac{L_1}{D}$$

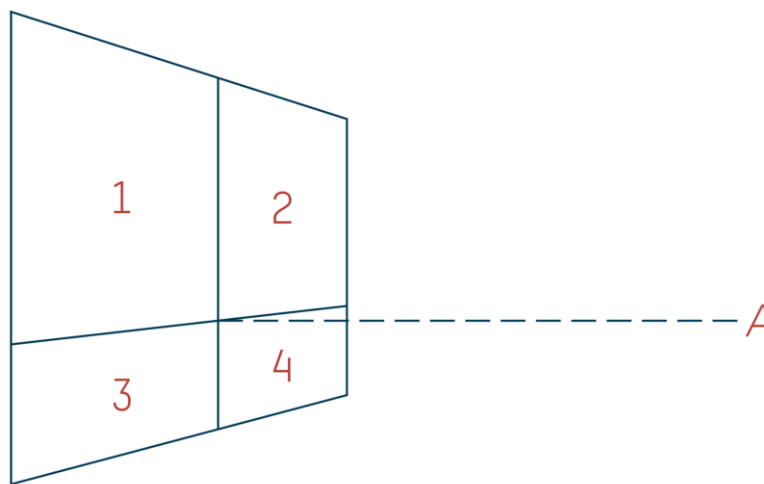
D = Afstand van punt A tot aan de straler in meters

$L_2$  = Hoogte van de rechthoek in meters

$L_1$  = Breedte van de rechthoek in meters

### Vergelijking B1.3 Zichtfactor voor punt loodrecht tegenover hoek

Bij een punt op een afstand van een stralende gevel kan de gevel worden opgedeeld in vier kwadranten. Een voorbeeld hiervan is in figuur B1.4 weergegeven.



**Figuur B1.4 Zichtfactor voor punt tegenover gevel**

Punt A staat daarbij voor elk van de vier kwadranten loodrecht op een hoekpunt. Door voor elk van de vier kwadranten vervolgens afzonderlijk met vergelijking 3. de zichtfactor op punt A te bepalen kan een totale zichtfactor  $\phi_{\text{tot}}$  worden berekend. De totale zichtfactor voor punt A is:

$$\phi_{\text{tot}} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$$

### Figuur B1.5 Totale zichtfactor

De straling die punt dA daarbij ontvangt kan vervolgens worden berekend volgens onderstaande vergelijking

$$E = \phi_{\text{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

### Figuur B1.6 Stralingsintensiteit