

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1

**Deel 1A:  
Effecten van brand op personen**

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

<b>Inhoudsopgave</b>		<b>pagina</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Algemeen	6
1.2	Verantwoording	6
1.3	Modellen	6
1.4	Hoofdstukbeschrijving	6
<b>2</b>	<b>Identificatie schema en berekeningsmethode</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>De effecten van warmtestraling op personen</b>	<b>12</b>
3.1	Inleiding	12
3.2	Karakterisering van letsel	12
3.3	Gevolgen van brandwonden	14
3.4	Fysische eigenschappen van de huid	15
3.5	Berekeningsmodel voor temperatuurverloop in de huid als gevolg van warmtestraling	16
3.5.1	Inleiding	16
3.5.2	Model voor warmtetransport in de huid	16
3.6	Experimentele bepaling van letsel door warmtestraling	22
<b>4</b>	<b>Statistisch model voor letsel door warmtestraling</b>	<b>28</b>
4.1	Inleiding	28
4.2	Het 'vulnerability model' voor de bepaling van schadeomvang door warmtestraling	28
4.3	Aangepast model voor koolwaterstofbranden	30
4.4	Correctiefactoren voor de bepaling van de schadeomvang m.b.v. probitfuncties	33
4.5	Overige modellen voor letsel door warmtestraling	35
4.5.1	Het Lees-model	35
4.5.2	Het Prugh Model	39
<b>5</b>	<b>De invloed van kleding en bescherming door gebouwen</b>	<b>40</b>
5.1	Inleiding	40
5.2	De ontsteking van kleding	40
5.2.1	Spontane ontsteking	40
5.2.2	'Piloted' ontsteking	44
5.2.3	Effecten van brandende kleding	44
5.3	De beschermende werking van kleding	44
5.4	Bescherming door gebouwen	46
<b>6</b>	<b>Keuze van de blootstellingsduur van personen bij warmtestraling door brand</b>	<b>47</b>
6.1	Inleiding	47
6.2	Invloed van de samenstelling van de blootgestelde groep	47
6.3	Invloed van de brandsituatie	49
6.4	Literatuurgegevens over blootstellingsduur en vluchtgedrag	49
6.5	Bepalen van de effectieve blootstellingsduur	50
<b>7</b>	<b>Schade ten gevolge van een wolkbrand ('flash fire')</b>	<b>52</b>
7.1	Inleiding	52

7.2	Het verloop van een wolkbrand	52
7.3	Persoonlijk letsel door een wolkbrand	53
7.4	Conclusie	53

## Samenvatting

In dit deel van PGS 1 wordt de benodigde informatie gegeven om de effecten van brand op personen te kunnen bepalen. De volgende factoren die van invloed zijn op de omvang van de schade worden behandeld:

- Relatie tussen warmtestralingsdosis en omvang van letsel (hoofdstuk 4)
- Invloed van kleding en bescherming door gebouwen op omvang van letsel (hoofdstuk 5)
- Blootstellingsduur die wordt bepaald door onder andere de vluchtsnelheid en mogelijkheid tot schuilen (hoofdstuk 6)

Ingeval van letsel ten gevolge van een brand vallen de letseloorzaken in twee categorieën:

1. letsel door vlamcontact: dit geldt voor personen binnen de omvang van de (plas-) brand;
2. letsel door warmtestraling.

Het is aannemelijk dat personen binnen de omvang van de brand zullen overlijden (zie ook § 7.3: letsel ten gevolge van wolkbrand) ten gevolge van het directe vlamcontact.

Het letsel veroorzaakt door warmtestraling op de huid kenmerkt zich gewoonlijk als eerste-, tweede- of derdegraadsverbranding. De verbrandingsgraad duidt aan in welke mate en tot welke diepte de huid is beschadigd. Op basis van literatuurgegevens is geconcludeerd dat brandwonden ontstaan als de temperatuurverhoging op de huid ten minste 9K bedraagt. De diepte van de verbranding volgt uit de berekening van de diepte tot waar de temperatuurverhoging tenminste 9K bedraagt. Als de verbranding zich beperkt tot de dikte van de epidermis ( $x = 0,12$  mm) is sprake van eerstegraadsverbranding. Aantasting van de dermis ( $x = 2$  mm) betekent tweedegraadsverbranding. Bij nog diepere verbranding ontstaan derdegraads brandwonden.

Als gevolg van verbrandingen kunnen personen komen te overlijden. In het algemeen wordt ervan uitgegaan dat er bij tweede- en derdegraadsverbrandingen een kans op overlijden bestaat. Er bestaat een relatie tussen percentage verbrand huidoppervlak en overlijdenskans (Tabel 3-1, hoofdstuk 3), afhankelijk van de leeftijd van de getroffen persoon. Ook is er een relatie bepaald tussen de brandwonddiepte en de kans op overlijden (Hymes, hoofdstuk 4).

Er zijn verschillende probitrelaties afgeleid voor eerste-, tweede-, derdegraadsverbrandingen en letaliteit. Deze geven de probit als functie van de warmtestralingsdosis. De probit-waarde correspondeert met de kans op het letsel waarvoor de probitrelatie geldt. De warmtestralingsdosis is de blootstellingsduur maal de warmtestralingsintensiteit tot een bepaalde macht:

$$D_s = t \cdot q^n \text{ [s} \cdot (\text{W/m}^2)^n \text{]}$$

De meeste ontwikkelde modellen voor de beschrijving van letsel door brand zijn gebaseerd op de warmtestralingsdosis als veroorzakende factor.

Persoonlijk letsel bij afwezigheid van beschermende kleding kan bij langdurige blootstelling reeds optreden bij een stralingsintensiteit van ca.  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Kleding kan een beschermende werking hebben, mits deze niet ontsteekt door zelfontbranding of vonken (zie § 5.3). De beschermende werking wordt tot uitdrukking gebracht in een reductie van het

verbrande huidoppervlak en de daarbij behorende letaliteit (zie § 5.3 Tabel 5-2). Bij ontbranding van de kleding kan de letale letselkans op 100% gesteld worden.

Voor de berekening van de blootstellingsduur ( $\Delta t$ ) is geen eenduidige formule te geven. Factoren die  $\Delta t$  beïnvloeden zijn onder andere (zie hoofdstuk 6 en Bijlage 2):

- schuilmogelijkheden
  - vluchtmogelijkheden
  - groepssamenstelling
-

## **1 Inleiding**

### **1.1 Algemeen**

Brand kan op verschillende manieren schade veroorzaken:

- a) door warmtestraling,
- b) door de vorming van toxische verbrandingsproducten.

In dit deel van PGS 1 worden alleen de effecten van warmtestraling besproken. Informatie over de vorming van toxische verbrandingsproducten bij brand is opgenomen in deel 3 van PGS 1.

### **1.2 Verantwoording**

Ten opzichte van de eerste editie van CPR 16 zijn de hoofdstukken betreffende de effecten van brand op de mens aangevuld en/of geactualiseerd met informatie uit Lees (1996) [32]. Deze informatie betreft onder andere additionele modellen om overlijdenspercentages vast te stellen (Lees model en Prugh model), informatie over beschermende werking van gebouwen, nieuwe informatie omtrent de relatie tussen percentage verbrand huidoppervlak en letaliteit en extra informatie over ontsteking van kleding.

### **1.3 Modellen**

In hoofdstuk 6 ("Warmte-uitstraling") van PGS 1 [1] worden modellen behandeld voor de berekening van de warmtestralingsintensiteit voor verschillende soorten branden. Het effect van een brand wordt uitgedrukt in het stralingsniveau als functie van de afstand en als functie van de tijd.

Er zijn verschillende situaties denkbaar waarbij, tengevolge van een calamiteit, de warmteontwikkeling zo groot is dat in de omgeving schade van niet verwaarloosbare omvang ontstaat. Deze schade kan zich uiten door brandwonden bij blootgestelden en door materiaalvervorming en -verzwakking als gevolg van oververhitting. Bovendien kunnen (onder andere door zelfontbranding) secundaire branden ontstaan.

De bekendste modellen voor de berekening van schade door warmtestraling worden beschreven in het "Vulnerability Model" van de US Coast Guard [2]. Deze modellen zijn beperkt van opzet en bovendien voor de Nederlandse situatie beperkt bruikbaar. Dit wordt onder andere veroorzaakt door het verschil in bouwwijze in Nederland en in de Verenigde Staten. Bovendien zijn de in [2] beschreven modellen vrijwel volledig gebaseerd op schadeanalyses van kernexplosies. Er bestaat echter de nodige twijfel over de overeenstemming tussen het schadebeeld van kernexplosies en conventionele branden van bijvoorbeeld koolwaterstoffen. In de eerste editie van CPR 16 was reeds een model opgenomen dat een aanpassing betrof van het "Vulnerability Model", om het geschikt te maken voor het bepalen van schade ten gevolge van koolwaterstofbranden. In deze tweede editie zijn tevens het Lees model (1994) en het Prugh model (1994) beschreven.

De in dit rapport beschreven modellen zijn geschikt voor de Nederlandse situatie, en gebaseerd op conventionele branden.

### **1.4 Hoofdstukbeschrijving**

Hoofdstuk 2 geeft het identificatie schema waarin beschreven is hoe gebruik gemaakt kan worden van de verschillende hoofdstukken om schade door warmtestraling te bepalen.

Hoofdstuk 3 geeft een algemene beschrijving van het effect van warmtestraling op de huid. Eerst geeft

---

het een karakterisering van het verbrandingsletsel en de gevolgen ervan. Vervolgens is een beschrijving van de fysische huideigenschappen opgenomen en tenslotte volgt een model van de berekening van het temperatuurverloop in de huid tengevolge van warmtestraling.

Hoofdstuk 4 geeft een statistische karakterisering van persoonlijk letsel tengevolge van warmtestraling. Met de hier gegeven probitfuncties kan de ernst van het letsel worden berekend uitgaande van een bekende blootstellingsduur en stralingsintensiteit.

Hoofdstuk 5 beschrijft de invloed van kleding op de omvang van het letsel. Tevens geeft het waarden voor de stralingsintensiteit waarbij kleding ontvlamt, voor diverse stoffen. De beschermende werking komt tot uitdrukking in een reductiefactor op de schadeomvang. Een paragraaf is gewijd aan de beschermende invloed van gebouwen.

Hoofdstuk 6 geeft aanwijzingen voor het bepalen van de effectieve blootstellingsduur. Hierbij wordt rekening gehouden met een bepaald vluchtgedrag van de blootgestelde personen en de invloed van de omgeving. De invloed van het vluchtgedrag op de schadeomvang wordt afgeschat.

Hoofdstuk 7 analyseert de gevolgen van een wolkbrand.

---

## 2 Identificatie schema en berekeningsmethode

Met behulp van het ingegeven identificatieschema kan nagegaan worden onder welke omstandigheden de informatie uit dit deel van PGS 1 bruikbare waarden geeft voor het bepalen van de schade door warmtestraling. De nummers buiten de blokken verwijzen naar de betreffende paragraaf in dit hoofdstuk.

Aan de hand van het identificatieschema wordt hieronder aangegeven hoe het berekenen van de schade aan personen door warmtestraling kan plaatsvinden.

*I Bepaal het aantal slachtoffers binnen het vlamgebied (zie Bijlage 1)*

- a) bereken afmetingen van de vlam (R)
- b) bepaal de bevolkingsdichtheid in het gebied van de vlam
- c) beregen het aantal slachtoffers binnen het vlamoppervlak met de formule:  $N_1 = N_o \cdot R^2$

Veronderstellingen:

- homogene bevolkingsverdeling;
- alle personen verblijven buitenshuis.

*II Bepaal de maximale effectieve blootstellingduur van een slachtoffer ( $t_{eff}$ ) (zie hoofdstuk 5 en Bijlage 2)*

*III Bepaal de volgende grootheden:*

- a) straal van vlamgebied (R, straal van vuurbal of brandende plas); stralingsintensiteit aan het vlamoppervlak  $q_o$  (bijvoorbeeld met behulp van het "Gele Boek" [1]);
- b) stralingsintensiteit als functie van de afstand tot de vlamrand (bijvoorbeeld met behulp van een computerprogramma [16]), hieruit volgt de veilige afstand ( $x_v$ ); maximale vluchttijd ( $t_v$ ) vanaf de vlamrand (R) naar  $x_v$  (hier is de stralingsintensiteit  $1 \text{ kW/m}^2$ ) (Bijlage 2);
- c) brandduur ( $t_o$ );
- d) effectieve blootstellingduur ( $t_{eff}$ ) inclusief vluchtgedrag (zie Bijlage 2 en paragraaf 5.4). De effectieve blootstellingsduur is gelijk aan de som van de reactietijd  $t_r$  en de vluchttijd  $t_v$ .

Veronderstellingen:

- vluchtsnelheid  $u = 4 \text{ m/s}$ ; reactietijd  $t_r = 5 \text{ s}$  (zie paragraaf 5.4);
- de berekende maximale vluchttijd geldt voor alle blootgestelde personen en is dus een overschatting.

*IV Bepaal het aantal slachtoffers buiten het vlamgebied ( $N_2$ ) (zie Bijlage 1) met de formule:*

$$N_2 = \int_R^{\infty} p(r) * N_o * 2\pi * r dr \quad (D.2)$$



waarin,

$$p(r) = F_k * \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\operatorname{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{D.3})$$

( $F_k$  is een reductiefactor tengevolge van eventuele beschermende werking van kleding, zie hieronder).  
 $p(r)$  is de kans op overlijden op afstand  $r$  vanaf het midden van de vuurhaard.

V *Bepaal de invloed van kleding ( $F_k$ ) (zie hoofdstuk 4)*

a) kleding ontbrandt niet

In paragraaf 5.3 wordt voor de invloed van kleding een reductiefactor op het percentage slachtoffers gegeven:  $F_k = 0,14$ , waarbij verondersteld wordt dat de kleding niet ontbrandt. De afmetingen van het 100% letaliteitsgebied zijn dus gelijk aan de afmetingen van de vlam + het gebied waarbinnen kleding spontaan ontbrandt.

Veronderstellingen voor gebied waarin kleding niet ontbrandt:

- met kleding bedekte huid blijft onbeschadigd;
- er is een gemiddelde leeftijdsopbouw van de blootgestelde bevolking;
- men is volledig gekleed, dat wil zeggen alleen gezicht, hals en onderarmen kunnen verbrandingen oplopen.

b) kleding wordt ontstoken

Veronderstelling: bij ontsteking van kleding treedt dodelijk letsel op.

Stel ontsteking vindt plaats indien de ontvangen warmtestralingsdosis ( $D_{sk}$ ) groter is dan

$$2,5 * 10^4 \left( \frac{kW}{m^2} \right)^2 * s \quad (\text{zie paragraaf 4.2}).$$

We bepalen nu de afstand tot de oorsprong ( $R_k$ ) waarbinnen deze dosis overschreden wordt inclusief vluchtgedrag. Daarbij stellen we de exponent  $n$  in de dosis gelijk aan 2.7 (de maximaal gemeten waarde, zie paragraaf 5.2).

$$D_{sk} = q_o^{2,7} * t_r + \int_{t_r}^{t_c} q(t)^{2,7} * dt \quad (\text{D.4})$$

waarin

$$q(t) = q_o \left( \frac{x_o}{x_o + u(t - t_r)} \right)^2$$

en

$t_r = \text{reactietijd} = 5 \text{ s.}$

Uitgaande van de gegeven dosis kan nu de tijd, waarop deze bereikt wordt, berekend worden met behulp van:

$$D_{sk} \geq 2,5 * 10^4 = (q_o)^{2,7} * t_r + \int_{t_r}^{t_c} \left[ q_o * \frac{x_o}{x + u * (t - t_r)} \right]^{2,7} * dt \quad (\text{D.5})$$

met

$$t_c = \left( \frac{x_v - x_o}{u} \right) + t_r \quad (D.6)$$

waarin

$x_v$  = afstand waarop  $q = 1 \text{ kW/m}^2$

en

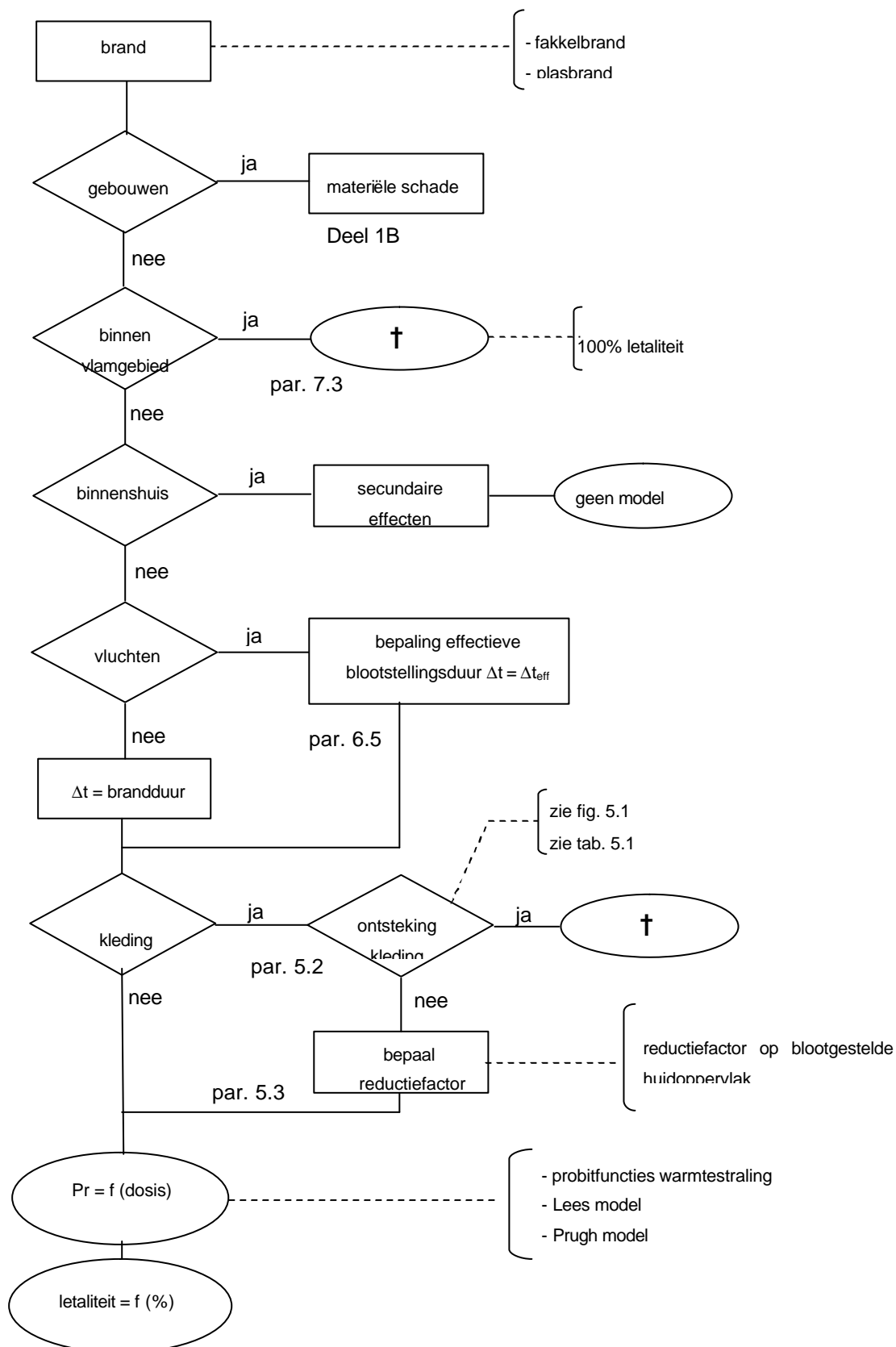
$x_o$  = startpositie van slachtoffer vanaf vlamrand.

Hieruit kan langs iteratieve weg  $x_o$  worden bepaald. Deze waarde van  $x_o$  is tevens de minimale waarde van  $x_o$  in de formules (B.3), (B.4) en (B.5). De bijbehorende waarde van  $R_k$  volgt uit:

$$R_k = R + x_o \quad (D.7)$$

De invloed van de ontstekende kleding wordt verwerkt door de oppervlakte "binnen" het vlamgebied (= 100% dodelijk letsel gebied) te vergroten. In (D.2) en (D.3) moet daartoe  $R$  worden vervangen door  $R_k$ . Op deze wijze worden tevens "dubbeltellingen" (tengevolge van kledingbrand en directe stralingsschade) vermeden.

---



**Figuur 2-1: Identificatie schema voor bepaling van effecten van brand op personen**

### **3 De effecten van warmtestraling op personen**

#### **3.1 Inleiding**

Warmtestraling heeft een tweeledig effect op personen, namelijk fysiologische effecten en pathologische effecten.

Fysiologische effecten uiten zich voornamelijk bij verblijf onder hete, vochtige condities. De effecten zijn:

- a) stijging van de hartslag;
- b) zweten;
- c) stijging van de lichaamstemperatuur.

Deze effecten spelen alleen een rol bij blootstelling over langere tijd en zullen verder niet beschouwd worden.

Pathologische effecten van warmtestraling hebben betrekking op het ontstaan van brandwonden door warmtetransport naar de huid. Voor de onbeschermdde huid is dit proces vrij eenvoudig te beschrijven. Voor de door kleding beschermde huid is dit meer gecompliceerd.

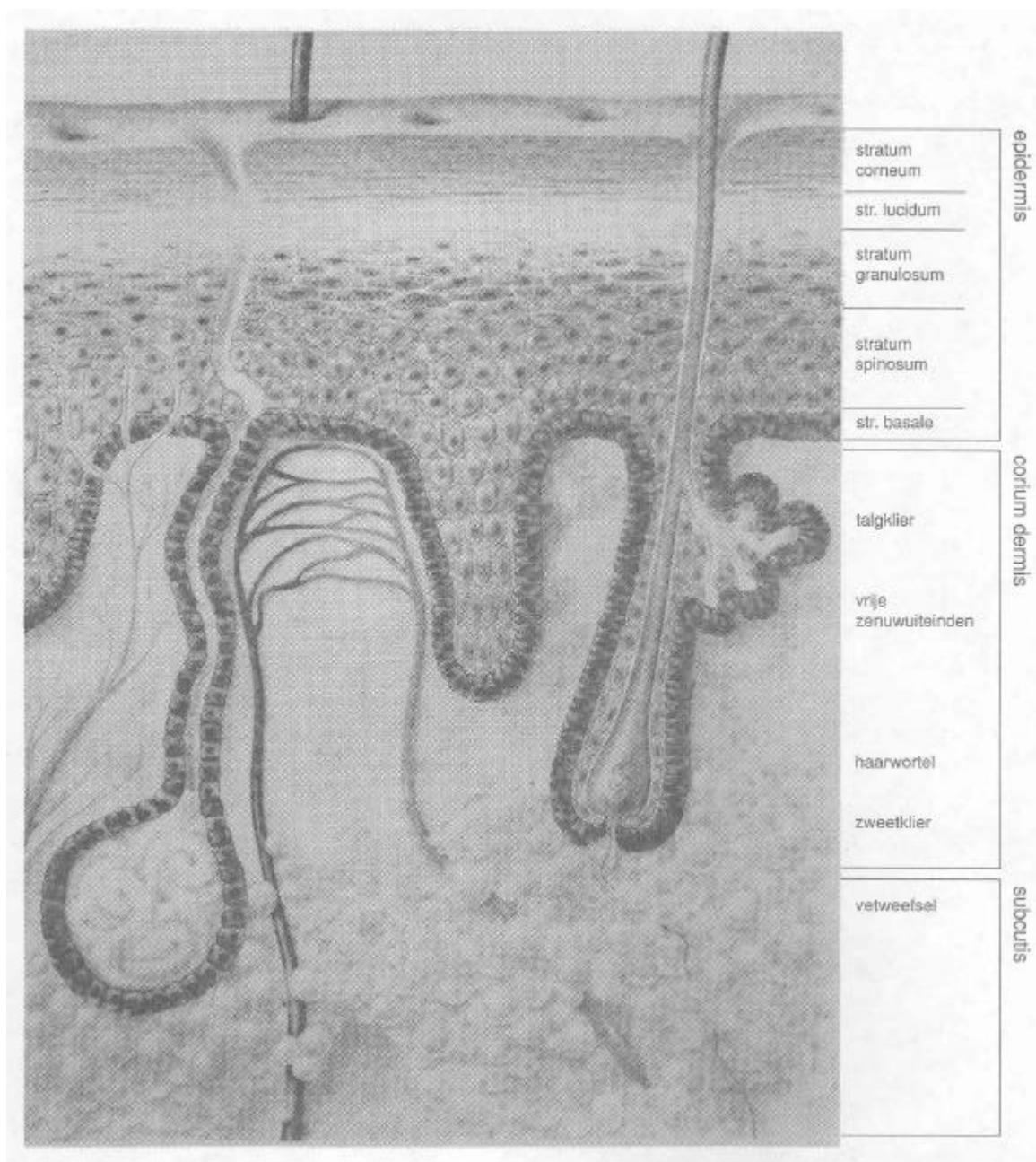
Het ontstaan van brandwonden op door kleding bedekte lichaamsdelen wordt voornamelijk veroorzaakt door het in brand raken of smelten (plakken aan de huid) van die kleding. Dit verschijnsel wordt afzonderlijk behandeld (§ 5.2).

Na een karakterisering van de ernst van letsel door warmtestraling (brandwonden) (paragraaf 3.2) en behandeling van de belangrijkste fysische eigenschappen van de huid (paragraaf 3.3) wordt een model behandeld voor de berekening van de diepte van verbrandingen als functie van de stralingsdosis waaraan de huid wordt blootgesteld (paragraaf 3.4).

#### **3.2 Karakterisering van letsel**

Het letsel veroorzaakt door warmtestraling op de huid wordt gewoonlijk gekarakteriseerd als eerste-, tweede- of derdegraadsverbranding. Daarmee wordt aangeduid in welke mate en tot welke diepte de huid is beschadigd. Een geïllustreerde beschrijving van brandwonden en de lichaamsreacties die hierdoor worden veroorzaakt, als mede de therapie, wordt gegeven in het boek "Brandwonden" [3]. De hieronder gegeven indeling van brandwonden in graden is uit dit boek overgenomen.

Figuur 3-1 (eveneens overgenomen uit [3]) geeft een doorsnede van de huid. De bovenste huidlaag, de epidermis, heeft onder andere als functie de vorming van cellen; vanuit de basale cellaag van het epidermis (stratum basale) vindt het herstel na verbranding plaats. Bij verbranding van de dermis vindt het herstel plaats vanuit de uitstulpingen van de epidermis in de dermis.



**Figuur 3-1: Dwarsdoorsnede huid**

Een eerstegraadsverbranding is oppervlakkig en wordt gekenmerkt door een rode, droge en pijnlijke huid. Bij een tweedegraadsverbranding is de epidermis (dikte 0,07-0,12 mm) verbrand; een dergelijke verbranding kenmerkt zich door blaarvorming en een natte huid, die nog rood is. Een derdegraadsverbranding strekt zich uit tot de dermis (dikte 12 mm) waarin zich onder meer de haarwortels en de vrije zenuwuiteinden bevinden; de verbrande huid is gevoelloos en droog en heeft een witte, gele of zwarte kleur. Alleen binnen de tweedegraadsverbrandingen wordt nog onderscheid gemaakt namelijk tussen oppervlakkige en diepe verbrandingen.



De genezingsduur voor diepe tweede- en derdegraadsverbrandingen kan worden gesteld op respectievelijk 14-21 en 21 dagen. Blaarvorming wordt globaal geacht tweedegraads te zijn.

### 3.4 Fysische eigenschappen van de huid

De fysische eigenschappen van de huid hangen sterk af van het deel van de menselijke huid dat wordt beschouwd. Dit geldt in het bijzonder voor de dikte van de huid.

Door Stoll [4] worden de gemiddelde waarden gegeven, zoals vermeld in Tabel 3-2.

**Tabel 3-2: Gemiddelde waarden voor fysische eigenschappen van de huid van een man van 70 kg en 1,7 meter [4]**

Gewicht, M	4 kg
Oppervlak, A	1,8 m <sup>2</sup>
Volume, V	3,6*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Waterinhoud, -	70-75% (massa)
Soortelijk gewicht, ρ	1100 kg/m <sup>3</sup>
Dikte, d	0,05-5 mm (in hoofdzaak 1-2 mm)

De belangrijkste eigenschap van de huid ten aanzien van verwonding door warmtestraling is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $a_t$

$$a_t = \frac{l}{r \cdot c} \quad \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (3.1)$$

met

$\lambda$ : warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m\*K]

$\rho$ : soortelijk gewicht [kg/m<sup>3</sup>]

$c$ : soortelijke warmte [J/(kg\*K)]

Deze grootte bepaalt de snelheid, waarmee de energie door de huid wordt opgenomen en de temperatuur ervan stijgt. Een andere grootte die bepalend is voor de mate van temperatuurverhoging, is de zogenaamde thermische traagheid:  $\lambda\rho c$  [J<sup>2</sup>s/(m<sup>4</sup>\*K<sup>2</sup>)]. Door Hardee en Lee [5] wordt een warmtegeleidingsmodel voor de huid gegeven. Hoewel soms voor de thermische eigenschappen van de huid gegevens voor water worden gebruikt, blijkt uit metingen dat deze eigenschappen sterk kunnen variëren. In Tabel 3-3 zijn een aantal meetwaarden weergegeven.

**Tabel 3-3: Thermische eigenschappen van de menselijke huid [5]**

	$\lambda$ [W/(m*K)]	$\rho c$ [J/(m <sup>3</sup> *K)]	$a_t$ [m <sup>2</sup> /s]	$\lambda\rho c$ [J <sup>2</sup> s/(m <sup>4</sup> *K <sup>2</sup> )]
Perkins et al [6]	0,764	3,35x10 <sup>6</sup>	0,228x10 <sup>-6</sup>	2,56x10 <sup>6</sup>
Mitchell [21]	0,591	4,19x10 <sup>6</sup>	0,141x10 <sup>-6</sup>	2,47x10 <sup>6</sup>
Stoll [4]	0,628	3,68x10 <sup>6</sup>	0,171x10 <sup>-6</sup>	2,31x10 <sup>6</sup>

In [5] wordt de voorkeur gegeven aan het gebruik van de waarden van Perkins et al [6].

De absorptiecoëfficiënt  $a$  geeft aan welk deel van de invallende straling wordt geabsorbeerd. Uit de experimenten van Stoll en Chianta [7] met (zwart gemaakte) huid volgt een absorptie van 94%. Gezien het geringe gereflecteerde deel kan worden uitgegaan van een volledige absorptie van de invallende straling.

### **3.5 Berekeningsmodel voor temperatuurverloop in de huid als gevolg van warmtestraling**

#### **3.5.1 Inleiding**

Brandwonden ontstaan door temperatuurverhoging van de huid als gevolg van warmtetransport in de huid. Bij warmtetoever als gevolg van warmtestraling door brand is de opname van de energie vrijwel volledig (zie "Fysische eigenschappen van de huid"). Afhankelijk van de mate van temperatuurverhoging en de penetratiediepte ontstaan min of meer ernstige brandwonden, zie paragraaf 3.2. Door Hardee en Lee [5] is een model beschreven om de temperatuur in de huid als functie van tijd en plaats te berekenen. Door vergelijking van de berekende temperaturen aan grenswaarden voor een graad van verbranding kan een indruk worden verkregen van de mate van verbranding als gevolg van blootstelling aan een warmtestralingsdosis.

#### **3.5.2 Model voor warmtetransport in de huid**

Het transport van warmte in de huid door straling van een brand kan worden beschouwd als eendimensionaal warmtetransportprobleem, zie Figuur 3-2.

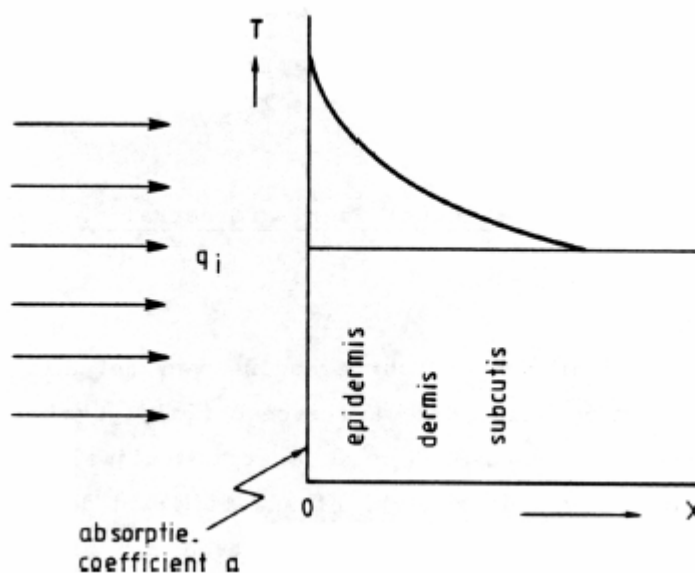
Een deel van de invallende straling zal gereflecteerd worden aan het oppervlak van de huid. Afhankelijk van de toestand van de huid zal deze reflectie groter of kleiner zijn. De doorgelaten warmtestroom  $q$  volgt uit:

$$q = a * q_i \quad [W/m^2] \quad (3.2)$$

met  $a$  de absorptiecoëfficiënt.

---





**Figuur 3-2: Eéndimensionaal model voor het warmtetransport in de huid**

Wanneer de huid wordt voorgesteld als een halfoneindig medium, waaraan voor  $0 \leq t \leq t_c$  een constante warmtestroom  $q$  wordt toegevoerd, dan kan voor tijd  $t \leq t_c$  het temperatuurverloop worden berekend met (zie [5]):

$$T(t, x) - T_i = \frac{2q}{\sqrt{\rho r c}} (\sqrt{t}) \operatorname{ierfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4a_t t}} \right) \quad [\text{K}] \quad (3.3)$$

- $T_i$  : de begintemperatuur [K]
- $T(t, x)$  : temperatuur van de huid op diepte  $x$  als functie van de tijd [K]
- $x$  : de penetratiediepte [m]
- $\operatorname{ierfc}$  : geïntegreerde complementaire error-functie
- $t$  : tijd [s]
- $t_c$  : blootstellingsduur [s]

waarin:

$$\operatorname{ierfc}(z) = \int_z^\infty \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z'}^\infty \exp(-h^2) dh \right) dz' \quad (3.4)$$

De totale warmtehoeveelheid  $Q$  in de huid ten gevolge van een warmtepuls gedurende  $t_c$  is:

$$Q = q * t_c \quad (3.5)$$

Aan het einde van de blootstellingsduur zal deze warmtehoeveelheid zijn opgeslagen in de bovenste

laag van de huid. Voor  $t > t_c$  diffundeert de warmte verder in de huid en geeft daar een temperatuurverhoging. Voor  $t > t_c$  volgt het temperatuurverloop uit:

$$T(t) - T_i = \frac{2q}{\sqrt{\rho r c}} \left[ \sqrt{t} * \operatorname{ierfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4a_t t}} \right) - \sqrt{t - t_c} * \operatorname{ierfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4a_t (t - t_c)}} \right) \right] \quad (3.6)$$

met  $T(t)$  in [K].

Bij deze afleiding is er geen rekening mee gehouden dat in de huid ook warmte wordt afgevoerd door de stroming van bloed door de bloedvaten. De gegeven fysische eigenschappen van de huid in paragraaf 3.4 zijn experimenteel bepaald. Door gebruik van die gegevens wordt impliciet rekening gehouden met warmtetransport door stroming van bloed. Indien de blootstellingsduur erg lang is (bijvoorbeeld > 1 minuut) dan geeft het model door verwaarlozing van de warmteafvoer een overschatting.

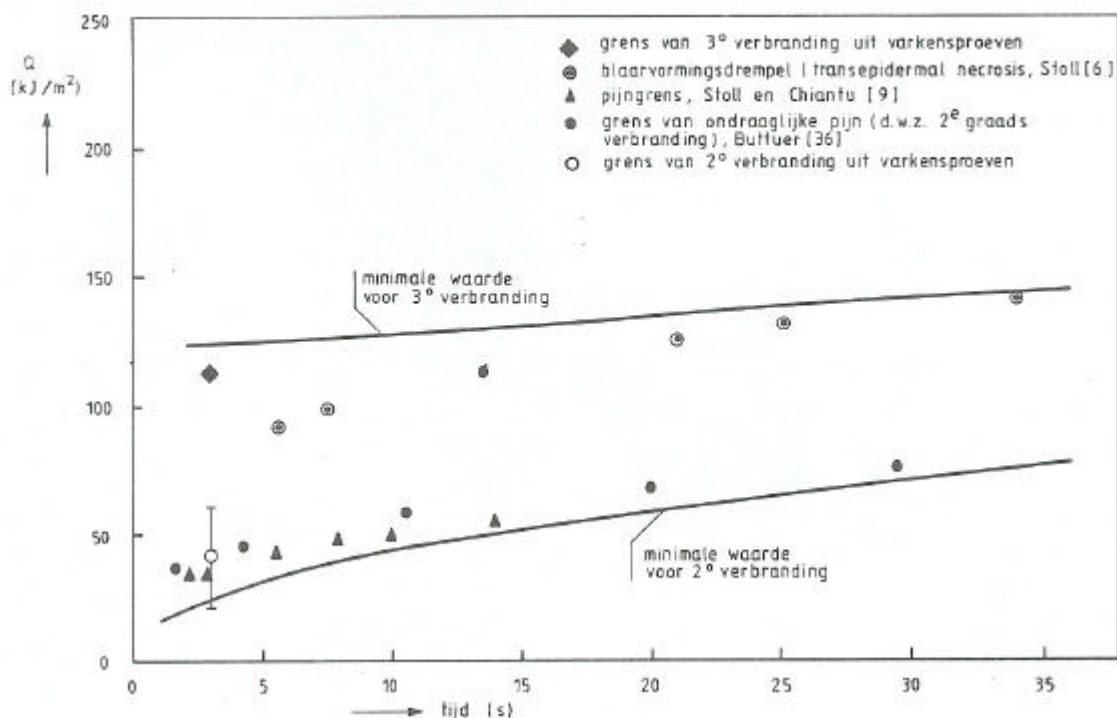
In [5] wordt op basis van literatuurgegevens geconcludeerd dat brandwonden ontstaan als de temperatuurverhoging tenminste 9K bedraagt. De diepte van de verbranding volgt uit de berekening van de diepte tot waar de temperatuurverhoging tenminste 9K bedraagt.

Als de verbranding zich beperkt tot de dikte van de epidermis ( $x = 0,12$  mm) is sprake van eerstegraadsverbranding. Bij aantasting van de dermis ( $x = 2$  mm) betekent dit tweedegraadsverbranding. Bij nog diepere verbranding ontstaan derdegraads brandwonden. De criteria zijn samengevat in Tabel 3-4.

**Tabel 3-4: Criteria voor de ernst van brandwonden.**

Verbrandingsgraad	Diepte tot waar $DT = 9K$ (mm)
Eerste	< 0,12
Tweede	< 2
Derde	> 2

Op basis van deze criteria is in Hardee en Lee [5] de stralingsdosis (in  $\text{kJ/m}^2$ ) als functie van de blootstellingsduur afgeleid voor tweede- en derdegraadsverbrandingen met behulp van formule (3.3) en (3.6). De resultaten zijn getoetst aan experimentele gegevens (zie Figuur 3-3).



**Figuur 3-3: Minimale waarden van door de huid geabsorbeerde warmtedichtheid (stralingsdosis) bij een gegeven tijdsduur voor tweede- en derdegraadsverbrandingen (volgens het model Hardee en Lee [5]), en experimentele resultaten.**

Het model [5] komt redelijk overeen met de in Figuur 3-3 gegeven experimenten. Echter op basis van een analyse van verdere experimentele gegevens door Hymes [8] concludeert deze dat de resultaten van het model van Hardee en Lee [5] (zoals hiervoor beschreven) niet door alle experimentele gegevens worden ondersteund.

Experimentele resultaten zoals gerapporteerd door Hymes [8] zijn weergegeven in Tabel 3-5 en Figuur 3-4.

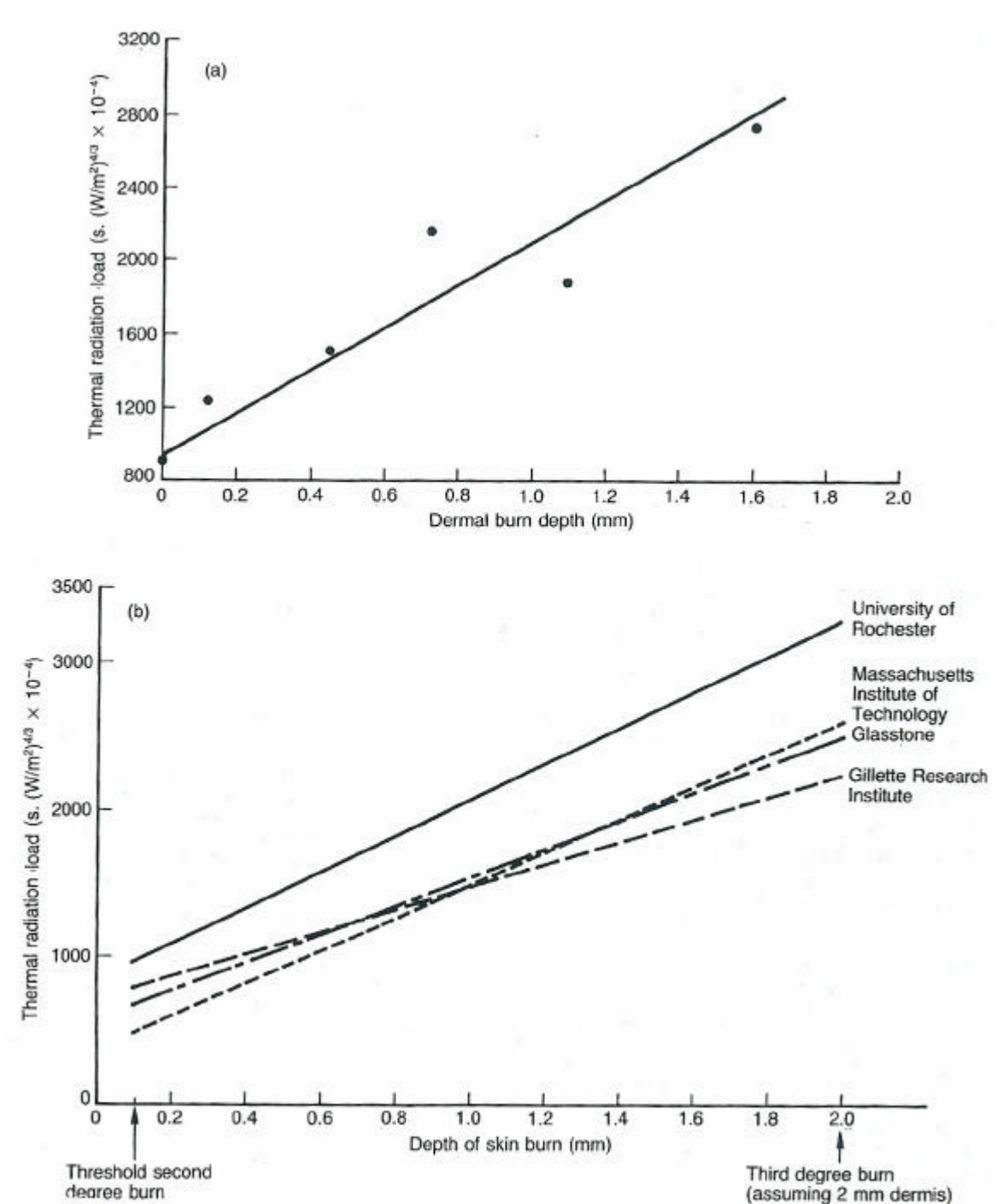
**Tabel 3-5: Tweede en derdegradsverbrandingen bij varkens blootgesteld aan warmtestraling [32]**

Opgenomen warmte [kJ/m <sup>2</sup> ]	Tijd [s]	Warmtestralingsdosis [s*(W/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> ]	Huid schade [mm]	'steam bleb'
210	0,5	1,57 * 10 <sup>7</sup>	0,17	Nee
	1	1,24 * 10 <sup>7</sup>	0,16	Nee
	3	0,86 * 10 <sup>7</sup>	Geen	Nee
	5	0,73 * 10 <sup>7</sup>	Geen	Nee
	30	0,4 * 10 <sup>7</sup>	Geen	Nee
420	0,3	4,68 * 10 <sup>7</sup>	0,49	Ja
	3	2,17 * 10 <sup>7</sup>	0,72	Nee
	10	1,45 * 10 <sup>7</sup>	0,45	Nee
670	0,5	7,385 * 10 <sup>7</sup>	0,9	Ja
	1	5,86 * 10 <sup>7</sup>	1,1	Ja
	3	4,065 * 10 <sup>7</sup>	1,4	Soms
	5	3,43 * 10 <sup>7</sup>	1,6	Nee
	10	2,72 * 10 <sup>7</sup>	1,6	Nee
	30	1,89 * 10 <sup>7</sup>	1,1	Nee

In een bespreking van de resultaten worden door Hardee en Lee [5] de volgende redenen genoemd waarom experimentele gegevens (kunnen) afwijken (tot een 4 á 6 keer hogere minimale waarde).

- De golflengte van de gebruikte straling is van invloed op de absorptiecoëfficiënt  $\alpha$  (50 à 85%) en kan worden gereflecteerd als sprake is van een stralingsbron met een zeer hoge temperatuur. Bijvoorbeeld: een kernexplosie [9], of 4000 °C [6], in tegenstelling tot de 2000 à 2300 °C in [5].
- Het kunstmatig zwart maken van de huid vergroot de absorptiecoëfficiënt.
- Zéér intense warmtebronnen kunnen aanleiding geven tot het "verkolen" van de bovenste huidlaag, dit geeft bescherming tegen diepere verbranding.

Verder blijkt uit simulatieproeven met een kunsthuid (zie paragraaf 3.6) dat de warmteafvoer door het bloed niet verwaarloosd mag worden. Omdat het in voorkomende praktijksituaties niet duidelijk is hoe groot de absorptiecoëfficiënt is, verdient het aanbeveling deze voorzichtigheidshalve gelijk aan 1 te kiezen.

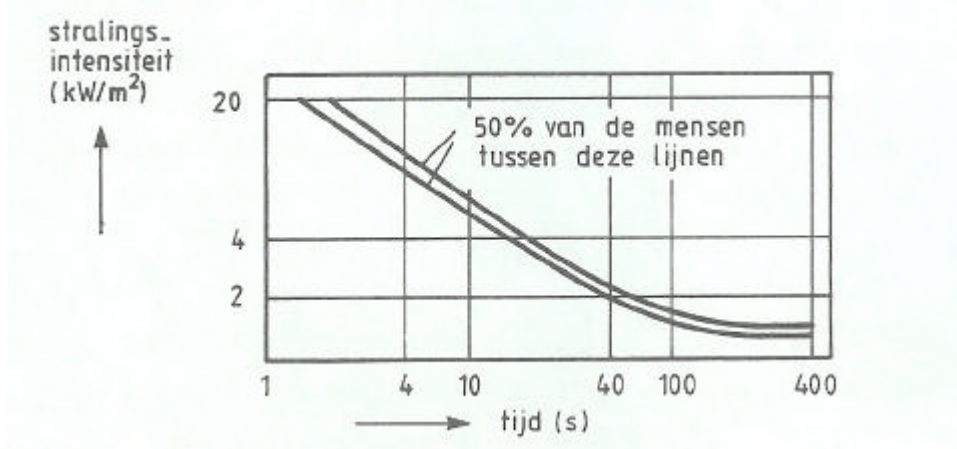


**Figuur 3-4: Experimentele bepaling van letsel door warmtestraling [Hymes, 8]**

- a) sub-'steam-bleb' verbrandingen bij varkens, data verkregen bij de universiteit van Rochester door Hinshaw
- b) vergelijking met resultaten van andere onderzoekers

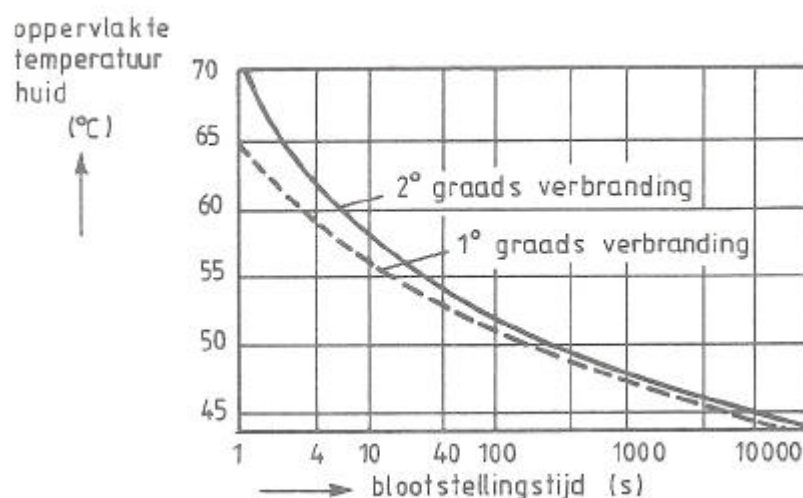
### 3.6 Experimentele bepaling van letsel door warmtestraling

Uit proeven volgt een verband tussen de warmtestroomdichtheid en de tijd waarna deze warmtestroom tot onverdraagbare pijn leidt, bij blootstelling van de onbedekte huid aan warmtestraling. Zie Figuur 3-5 [22]. De grootste warmtestralingsintensiteit die de huid gedurende langere tijd kan absorberen zonder dat er pijn wordt gevoeld is ca.  $1 \text{ kW/m}^2$ . Deze waarde ligt in de buurt van de warmtestroom die wordt ontvangen van de middagzon in de zomer. Hoewel geen pijn wordt gevoeld, zal wel weefselbeschadiging optreden bij langdurige blootstelling aan deze stralingsintensiteit. Bij het voelen van pijn zal de persoon trachten het blootgestelde deel van de huid van de stralingsbron af te wenden.



Figuur 3-5: Tijd voor onverdraagbare pijn volgens [33]

Voor met kleding bedekte huid wordt in het algemeen uitgegaan van een temperatuurcriterium. Daarbij geldt dat een temperatuur van  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  nog juist gedurende langere tijd kan worden verdragen, zonder dat dit leidt tot een pijnsensatie. Voor een kortere blootstelduur gelden uiteraard hogere grenswaarden. Dit is in Figuur 3-6 in beeld gebracht.



Figuur 3-6: De kritieke oppervlaktetemperatuur van de huid als functie van de expositieduur.

In

**Tabel 3-6** zijn enkele limieten voor pijn en letsel gegeven in termen van warmtestralingsintensiteit in sectie A en warmtestralingsdosis in sectie B.

In Tabel 3-7, sectie A, wordt de blootstellingsduur tot pijnwaarneming bij de mens weergegeven voor verschillende warmtestralingsintensiteiten. Het betreft onderzoeksresultaten van Buettner en Stoll [25] en Green [29]. In Figuur 3-7 (Mudan, [30]) zijn resultaten van deze en van andere onderzoekers opgenomen.

De pijngrens kan ook worden uitgedrukt in termen van warmtestralingsdosis. In Tabel 3-7, sectie C, worden door Hymes gegeven waarden getoond, die gebaseerd zijn op het werk van Stoll en Greene. Hymes geeft als richtwaarde voor de pijngrens een waarde van  $9,2 \cdot 10^5$  [s(W/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]. Resultaten voor de blootstellingsduur tot blaarvorming zijn weergegeven in Tabel 3-7, sectie B. Een weergave (Mudan, [30]) van deze en andere data is opgenomen als Figuur 3-7.

**Tabel 3-6: Enkele drempelwaarden voor pijn en schade als gevolg van warmtestraling**

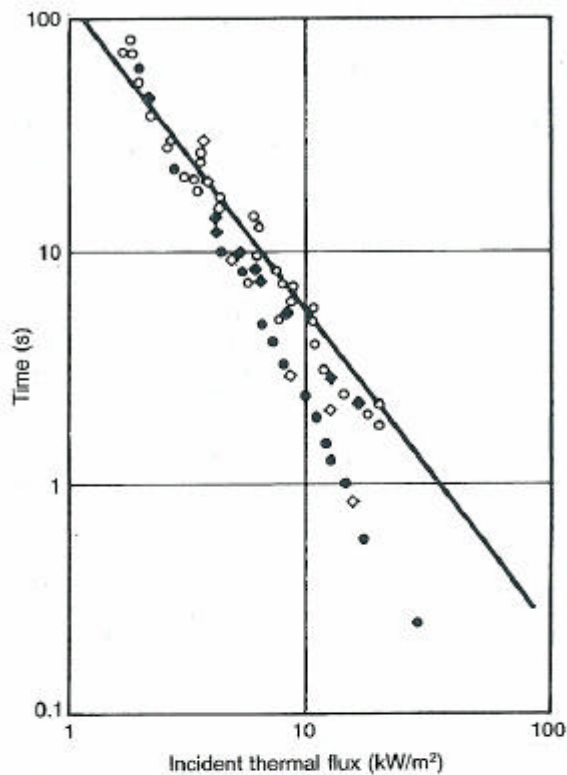
<b>A: Warmtestralingsintensiteit</b>		
<b>[kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Effect</b>	<b>Referentie</b>
1,5	Pijndrempel	Atallah en Allan (1971)
2,1	Pijn na 1 minuut	
1	Net te verdragen door een geklede persoon	HSE (1978)
8	Binnen een aantal minuten dodelijk	
4,7	Pijndrempel, gemiddelde tijd tot pijnervaring 14,5 s	Crocker en Napier (1986)
<b>B: Warmtehoeveelheid</b>		
<b>[kJ/m<sup>2</sup>]</b>		<b>Referentie</b>
40	Tweedegraads verbrandingen	Williamson en Mann (1981) <sup>1</sup>
65	Pijndrempel	
125	Derdegraads verbrandingen	
125	Eerstegraads verbrandingen	Rijnmond Public Authority (1982)
100	Drempel voor blaarvorming	Crossthaite (1984) <sup>1</sup>
200	Blaarvorming	
250	Tweedegraads verbrandingen	
375	Derdegraads verbrandingen	
700	50% letaliteit	
65	Pijndrempel; huid niet rood noch blaarvorming	BS 5908: 1990
125	Eerstegraads verbrandingen	
200	Aanvang van ernstig letsel	
250	Tweedegraads verbrandingen	
375	Derdegraads verbrandingen	

<sup>1</sup> Voor warmtestraling afkomstig van een vuurbal

**Tabel 3-7: Tijden tot aan pijngrens en drempelwaarde voor blaarvorming**

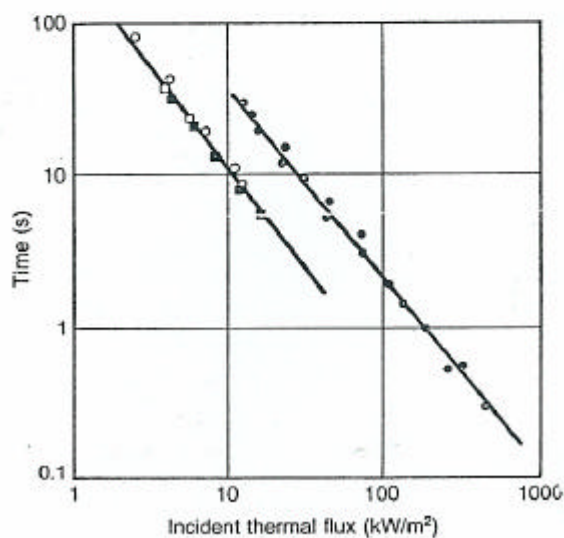
<b>A: Tijd tot bereiken van de pijndrempel; warmtestralingsintensiteit</b>		
<b>Auteurs</b>	<b>Warmtestralingsintensiteit [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Tijd [s]</b>
Stoll & Greene (1959)	4,2	13,5
	5,2	10,1
	6,3	7,8
	8,4	5,5
	12,6	2,9
	16,8	2,2
Buettner (1951)	3,7	20
	6,2	10
	9,7	5
	18	2
API RP 521: 1990	1,74	60
	2,33	40
	2,90	30
	4,73	16
	6,94	9
	9,46	6
	11,67	4
	19,87	2
<b>B: Tijd tot bereiken van drempelwaarde voor blaarvorming; warmtestralingsintensiteit</b>		
<b>Auteurs</b>	<b>Warmtestralingsintensiteit [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Tijd [s]</b>
Stoll & Greene (1959)	4,2	33,8
	6,3	20,8
	8,4	13,4
	12,6	7,8
	16,8	5,6
<b>C: Tijd tot bereiken van pijndrempel; warmtestralingsbelasting</b>		
<b>Auteurs</b>	<b>Warmtestralingsbelasting [s(W/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]</b>	<b>Tijd [s]</b>
Hymes (1983) [8]	8,6*10 <sup>5</sup>	13
	8,8*10 <sup>5</sup>	10
	9,0*10 <sup>5</sup>	8
	9,1*10 <sup>5</sup>	5,5
	10,3*10 <sup>5</sup>	3





A:  
pijndrempel

- Buettner (1951b)
- Hardy, Jacobs and Meixner (1953)
- ◇ Stoll and Greene (1959)
- ◆ Bigelow *et al.* (1945)

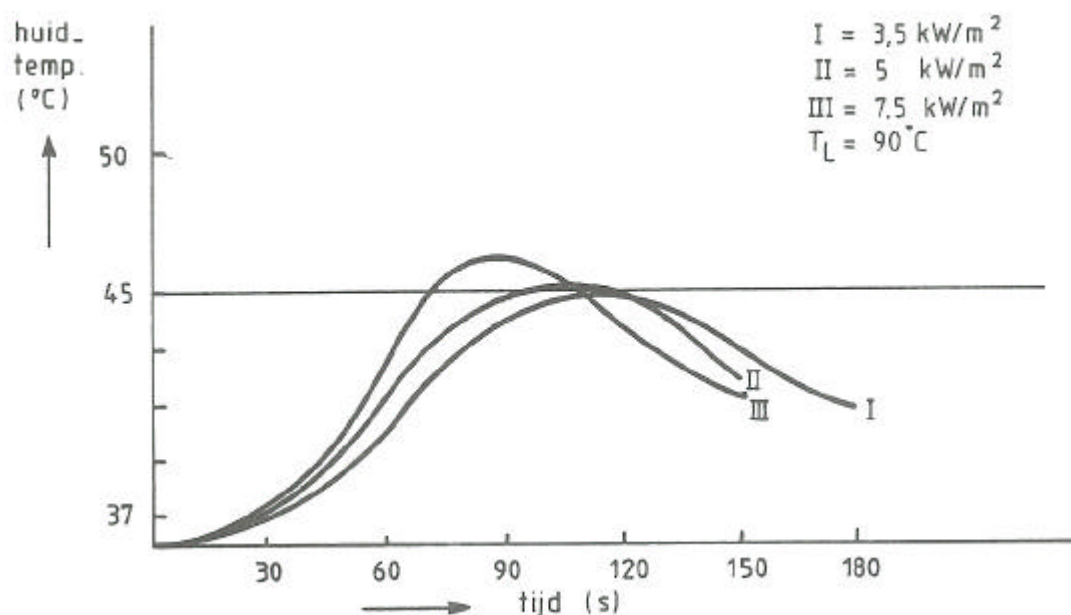


B:  
drempelwaarde voor  
blaarvorming

- Stoll and Greene (1959), threshold blister
- Stoll and Greene (1959), full blister
- Mehta, Wong and Williams (1973)
- Mixter (1959)

**Figuur 3-7: tijd tot het optreden van effecten (drempelwaarden) als gevolg van warmtestraling**

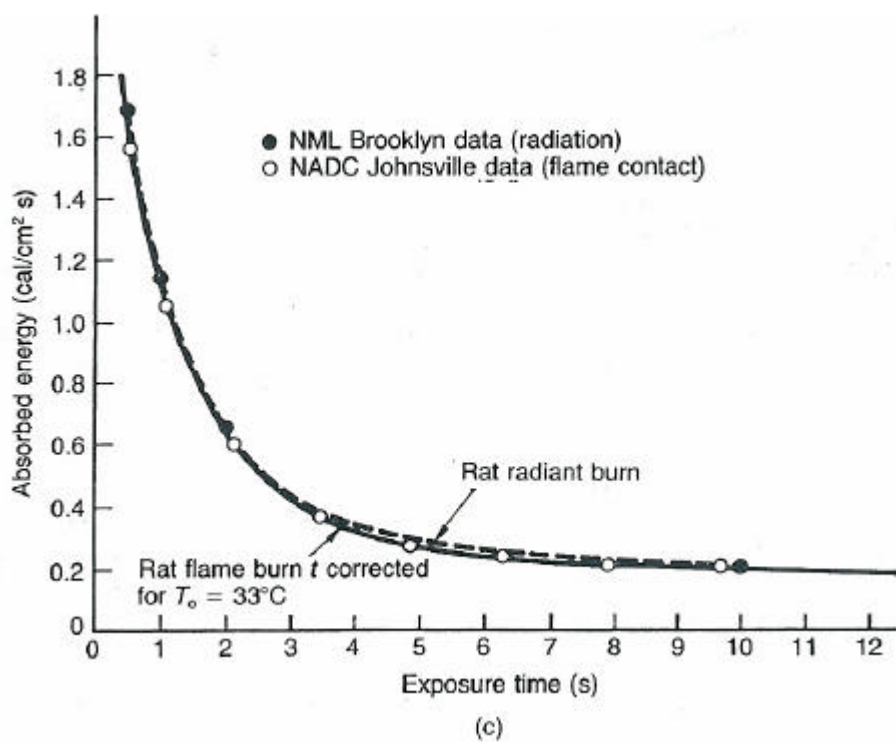
Het Centrum voor Brandveiligheid TNO heeft, samen met het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO, een huidmodel ontwikkeld waarmee de beschermende werking van kleding onder verschillende omstandigheden kan worden beoordeeld. Het huidmodel bestaat uit een kunst huid opgebouwd uit lagen kunststof en koper. De achterzijde van de huid wordt met behulp van een watercircuit op 37 °C gehouden. De kunst huid, waartegen de te onderzoeken kleding wordt gespannen, wordt blootgesteld aan een van te voren ingestelde warmtestralingsdosis, terwijl de oppervlaktetemperatuur van de huid als functie van de tijd wordt geregistreerd. Zodra een temperatuur van 45 °C wordt bereikt, wordt de warmtestraling weggenomen. De huidtemperatuur stijgt nog even door voordat de temperatuur gaat dalen; zie Figuur 3-8. Combinatie van warmtestralingsdosis en convectieve warmtebelasting op de kleding is mogelijk. Een meer volledige beschrijving van het model en de meetmethode is gegeven in [23], [24].



**Figuur 3-8: Huidtemperatuur als functie van de tijd voor een beklede huid bij verschillende waarde van de stralingsintensiteit en een luchttemperatuur 90 °C; na het bereiken van de kritieke temperatuur (= 45 °C) wordt de straling en de hete luchtstroom weggenomen.**

Stoll en Chianta [7] (1959 en 1971) beschrijven de werking van brand/brandwonden op ratten. De reacties van ratten op warmtestraling(s dosis) en vlamcontact is afzonderlijk bestudeerd door NML te Brooklyn en door NADC te Johnsville. In Figuur 3-9 is een vergelijking gegeven tussen de resultaten van deze twee onderzoeken, welke vrijwel identiek zijn.

Deze resultaten duiden erop dat de dosis-reactie relatie hetzelfde is voor warmtestraling(s dosis) als voor vlamcontact. De resultaten zijn ook toepasbaar voor de mens.



Figuur 3-9: Brandwonden bij ratten blootgesteld aan warmtestraling en vlamcontact

## **4 Statistisch model voor letsel door warmtestraling**

### **4.1 Inleiding**

In een kwantitatieve risicoanalyse wordt de omvang van de schade gebruikt om de ernst van een gebeurtenis uit te drukken. Met betrekking tot letsel door warmtestraling betekent dit dat behoefte bestaat aan een model waarmee, op basis van een berekening van de warmtestralingsdosis (intensiteit en tijdsduur), kan worden bepaald wat de aard en de omvang van het letsel zal zijn. In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de uitdrukking van de kans op letsel door middel van probitfuncties. Hierin wordt de kans op een bepaalde letselsoort uitgedrukt in de warmtestralingsdosis.

De letselsoorten zijn:

- a) eerste-, tweede-, en derdegraadsverbranding;
- b) dodelijk letsel

Op basis van de berekende warmtestralingsdosis, de probit functie(-s) en gegevens over de bevolkingsdichtheid verdeling kan de schadeomvang worden bepaald. De afscherming door kleding, gebouwen, verblijf binnenshuis, etc. worden in hoofdstuk 5 behandeld.

### **4.2 Het 'vulnerability model' voor de bepaling van schadeomvang door warmtestraling**

Een van de eerste sets van relaties voor thermisch letsel zijn die gegeven in het 'vulnerability model' van Eisenberg, Lynch en Breeding (1975) [2]. Voor letaal letsel gebruiken deze auteurs een aanpassing van de door C.S. White (1971) [9] gegeven data betreffende letsel door warmtestraling veroorzaakt door nucleaire explosies (bombardement van Japan). De data van White voor warmtestraling zijn gebaseerd op de kernwapengrootte. Door een formule te gebruiken van Gladstone (1962) voor de relatie tussen kernwapengrootte en tijdsduur van de puls, converteerden Eisenberg, Lynch en Breeding de originele data naar warmtestralingsintensiteiten over een gedefinieerde puls. De resultaten zijn samengevat in sectie A van Tabel 4-1. Uit een analyse van deze data verkregen de auteurs de data die weergegeven zijn in de eerste vier kolommen van sectie B van Tabel 4-1. Verdere analyse toonde aan dat de vorm van de veroorzakende factor  $q^{4/3}$  zou moeten zijn, hetgeen bevestigd wordt door de relatief constante waarde voor de warmtestralingsdosis  $t \cdot q^{4/3}$  in de drie datasets voor 1, 50 en 99% letaliteit in de laatste kolom van sectie B van Tabel 4-1.

---

**Tabel 4-1: Geschatte relaties tussen warmtestralingsintensiteit en thermisch letsel (naar Eisenberg, Lynch en Breeding [2])**

<b>A. Nucleaire wapens; effecten en thermisch letsel</b>			
<b>Wapen grootte</b>	<b>20 kt</b>	<b>1 Mt</b>	<b>20 Mt</b>
<b>Puls duur</b>	<b>1,43 s</b>	<b>10,1 s</b>	<b>45,2 s</b>
<i>Thermisch letsel</i>	<i>Warmtestralingsintensiteit [W/m<sup>2</sup>]</i>		
Eerstegraadsverbranding	73,27 *10 <sup>3</sup>	12,43 *10 <sup>3</sup>	3,71 *10 <sup>3</sup>
tweedegraadsverbranding	131,5 *10 <sup>3</sup>	26,92 *10 <sup>3</sup>	9,25 *10 <sup>3</sup>
<i>Effecten (beperkt gekleed, zomer)</i>	<i>Warmtestralingsintensiteit [W/m<sup>2</sup>]</i>		
Lichte verwondingen	73,27 *10 <sup>3</sup>	12,43 *10 <sup>3</sup>	3,60 *10 <sup>3</sup>
Drempel voor significant letsel	117,2 *10 <sup>3</sup>	24,87 *10 <sup>3</sup>	8,79 *10 <sup>3</sup>
Letaliteit (drempel)	146,5 *10 <sup>3</sup>	33,16 *10 <sup>3</sup>	10,17 *10 <sup>3</sup>
Letaliteit nabij 50%	263,8 *10 <sup>3</sup>	57,99 *10 <sup>3</sup>	18,51 *10 <sup>3</sup>
Letaliteit nabij 100%	586,2 *10 <sup>3</sup>	128,5 *10 <sup>3</sup>	39,86 *10 <sup>3</sup>
<b>B. Warmtestralingsintensiteit en letaliteit</b>			
<b>Letaliteit [%]</b>	<b>Duur [s]</b>	<b>Warmtestralingsintensiteit [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Thermische belasting t*q<sup>4/3</sup> [s(W/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]</b>
1	1,43	146*10 <sup>3</sup>	1099*10 <sup>4</sup>
1	10,1	33,1*10 <sup>3</sup>	1073*10 <sup>4</sup>
1	45,2	10,2*10 <sup>3</sup>	1000*10 <sup>4</sup>
50	1,43	263,6*10 <sup>3</sup>	2471*10 <sup>4</sup>
50	10,1	57,95*10 <sup>3</sup>	2264*10 <sup>4</sup>
50	45,2	18,5*10 <sup>3</sup>	2210*10 <sup>4</sup>
99	1,43	586*10 <sup>3</sup>	7008*10 <sup>4</sup>
99	10,1	128*10 <sup>3</sup>	6546*10 <sup>4</sup>
99	45,2	39,8*10 <sup>3</sup>	6149*10 <sup>4</sup>

De probit relatie die door Eisenberg, Lynch en Breeding (het 'vulnerability model') is afgeleid op basis van gegevens over kernwapenexplosies, is:

$$Pr = -38,48 + 2,56 * \ln \left( t * q^{\frac{4}{3}} \right) \quad (4.1)$$

met t in seconden en warmtestralingsintensiteit q in W/m<sup>2</sup>.

Voor niet letaal letsel is alleen de grenswaarde van belang; voor eerstegraads brandwonden blijkt op basis van metingen bij kernexplosies (zie [2]) dat de 1% grenswaarden het beste kunnen worden uitgedrukt in t\*q<sup>1,15</sup> (in plaats van t\*q<sup>4/3</sup>). Voor eerstegraads verbrandingen is de grenswaarde volgens [2]:

$$t * q^{1,15} = 5,5 * 10^5 \quad \text{eenheid: } s * \left( \frac{W}{m^2} \right)^{1,15} \quad (4.2)$$

Voor tweedegraads brandwonden volgt uit gegevens uit [2] als grenswaarde voor kernexplosies:

$$t * q^{\frac{4}{3}} = 8,7 * 10^6 \quad \text{eenheid: } s * \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4.3)$$

### 4.3 Aangepast model voor koolwaterstofbranden

De golflengte (?) van de warmtestraling van kernexplosies bevindt zich hoofdzakelijk in het zichtbare en het UV-deel ( $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ) van het spectrum. Bij branden van koolwaterstoffen en dergelijke bevindt de golflengte zich in hoofdzaak in het infrarood gebied ( $\lambda > 1 \mu\text{m}$ ). Naarmate de golflengte toeneemt penetreert de straling dieper in de huid (vergelijk magnetronoven, golflengte = 0,1 - 1 mm) en is het schademechanisme anders; straling met een grotere golflengte leidt tot opwarming tot grotere diepte. Als deze opwarming bepaalde grenswaarden overschrijdt, leidt dit tot diepere brandwonden (hogere graad) dan bij bestraling met een kortere golflengte.

Hieruit volgt dat de stralingsdosis van branden van koolwaterstoffen en dergelijke, nodig voor een bepaalde schade, lager is dan voor straling van bijvoorbeeld kernwapenexplosies.

In het vervolg van deze paragraaf worden probitfuncties voor "koolwaterstofbranden" gegeven.

Op basis van gegevens van Stoll et al [7] in een vervolg op [2], worden in [10] de volgende probitfuncties voorgesteld, waarbij de grenswaarden ten opzichte van [2] zijn aangepast voor koolwaterstofbranden.

De grenswaarde 1% voor de dosis voor eerstegraadsverbrandingen blijkt op basis van metingen [7] een factor 2,23 lager te zijn voor infraroodstraling in vergelijking met UV-straling (vergelijk 3.4 en 3.2).

Eerste graadsverbranding:

$$\text{Pr} = -39,83 + 3,0186 \ln \left( t * q^{\frac{4}{3}} \right) \quad (4.4)$$

Aannemende dat dezelfde factor geldig is voor letaliteit volgt hiervoor [7]: letaliteit:

$$\text{Pr} = -36,38 + 2,56 \ln \left( t * q^{\frac{4}{3}} \right) \quad (4.5)$$

Als we dezelfde aanpassing voor tweedegraadsbrandwonden toepassen dan wordt de grenswaarde

$$t * q^{\frac{4}{3}} = 3,9 * 10^6 \quad \text{eenheid: } s * \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4.6)$$

Bij gebrek aan voldoende gegevens moet noodzakelijkerwijs een aanname worden gedaan over het verloop van de probitfunctie. Een aanname die vaak wordt gedaan, is dat voor verschillende schadetypes, bij dezelfde soort blootstelling, de helling van de probitfunctie gelijk is (vergelijk probitfunctie tweedegraads verbranding en letaliteit als gevolg van straling Figuur 4-1).

Als dus wordt aangenomen dat de helling van de probitfunctie voor tweedegraads verbrandingen overeenkomt met die voor eerstegraads verbrandingen, dan volgt voor tweedegraads verbranding:

$$Pr = -43,14 + 3,0186 \ln \left( t * q^{\frac{4}{3}} \right) \quad (4.7)$$

In Figuur 4-1 zijn deze probitfuncties uitgezet als kans op bepaald letsel als functie van de stralingsdosis. Hierbij is gebruik gemaakt van de relatie tussen de waarde van de probitfunctie en het overeenkomstige percentage, (zie Tabel 4-2). Dit percentage geeft aan:

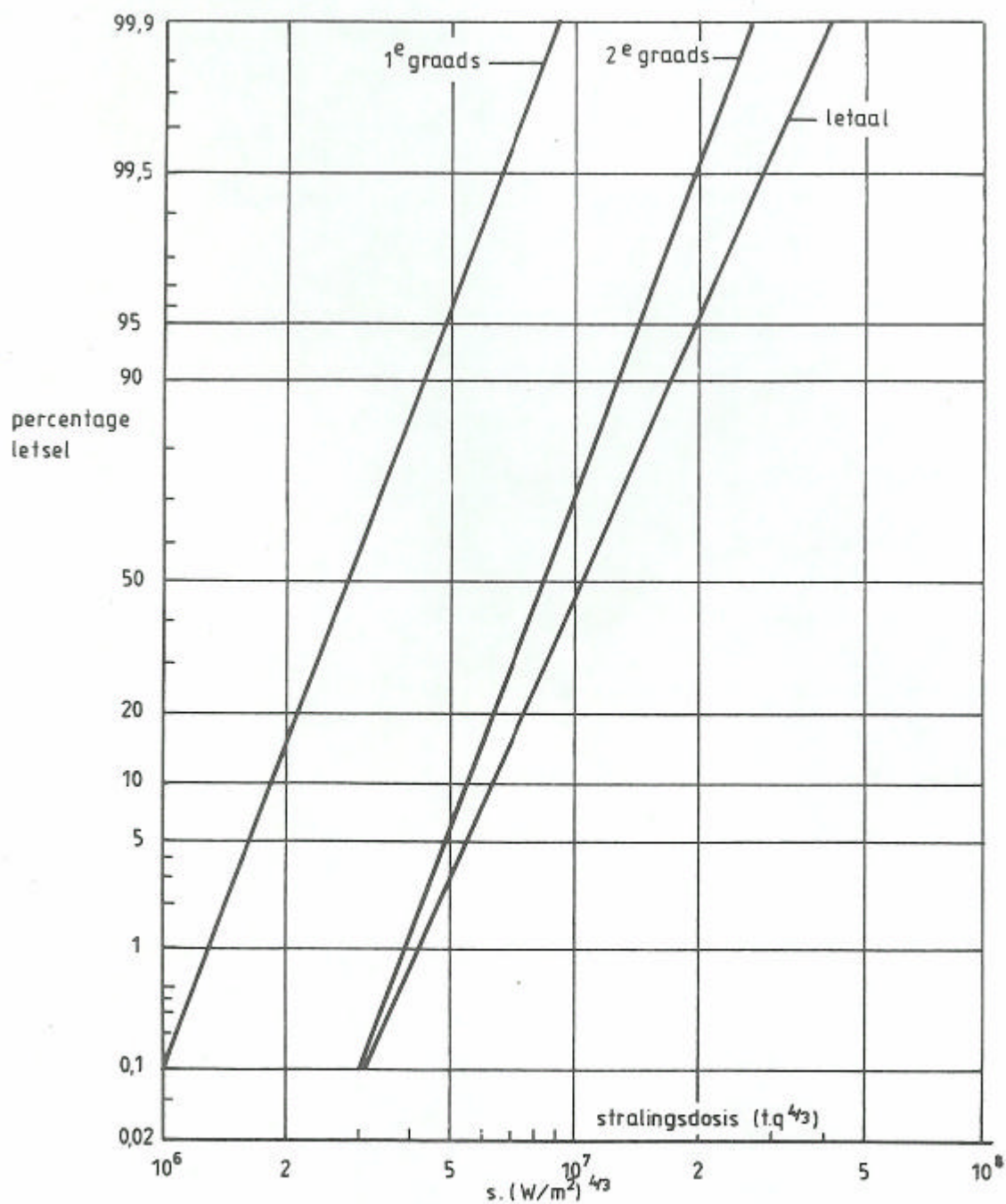
- het deel van de betrokken bevolking dat het bij deze probitfunctie behorende letsel krijgt, óf
- de kans dat een individu het betreffende letsel oploopt.

In Figuur 4-1 en de probitfuncties is géén rekening gehouden met de mogelijke invloed van kleding en vluchtgedrag. Zie daarvoor de hoofdstukken 4 en 5.

Bij het bepalen van de schadeomvang met behulp van genoemd percentage moet rekening gehouden worden met "dubbeltellingen", zie §4.4. Immers zo hangt het onder andere van de fractie tweede- en derdegraads verbrande huid af, of de getroffene zal overlijden of niet.

**Tabel 4-2 Het verband tussen het percentage en de waarde van de probitfunctie**

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,897	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
--	0,0	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09



**Figuur 4-1** Probitfuncties voor warmtestraling van koolwaterstofbranden zonder invloed van kleding



#### 4.4 Correctiefactoren voor de bepaling van de schadeomvang m.b.v. probitfuncties

De waarde van de probitfunctie correspondeert met de fractie van de totale getroffen populatie in een bij deze probitfunctie behorende schadeklasse bij een gegeven warmtestralingsdosis.

Met behulp van de set probitfuncties wordt per letselklasse de getroffen fractie van de totale betrokken bevolking bepaald. Er wordt uitgegaan van een gegeven warmtestralingsdosis. Door de definitie van de probitfunctie (onafhankelijke klassen) ontstaan daarbij "dubbeltellingen": dit zijn personen die in meerdere letselklassen tegelijk vallen. Hierdoor zijn er in werkelijkheid minder slachtoffers dan uit de sommatie over alle klassen zou volgen.

Bijvoorbeeld (zie Figuur 4-1):

$$\text{Warmtestralingsdosis} = 5 * 10^6 s \left( \frac{W}{m^2} \right)^{1,25} \quad (4.8)$$

getroffen percentage van de totale bevolking:

eerstegraads	= 96%
tweedegraads	= 5%
derdegraads	= 3%
totaal	= 104%

Uit de bovenstaande percentages is af te leiden dat dubbeltellingen optreden.

Oorzaken van dubbeltellingen:

1. Een enkel schademechanisme van een enkele gebeurtenis veroorzaakt, door escalatie, slachtoffers in verschillende letselklassen. Hierbij wordt de fractie slachtoffers in een bepaalde schadeklasse ook meegeteld in alle volgende (= "lichtere") klassen. Bijvoorbeeld: een brand kan dood, gedeeltelijk herstelbaar letsel of geheel herstelbaar letsel veroorzaken. Een slachtoffer in de klasse "dood" is tevens meegeteld in de klassen "gedeeltelijk herstelbaar" en "geheel herstelbaar", een slachtoffer in de klasse "gedeeltelijk herstelbaar" tevens in de klasse "geheel herstelbaar".
2. Meerdere schademechanismen van eenzelfde gebeurtenis veroorzaken tegelijkertijd slachtoffers in dezelfde letselklasse (bijvoorbeeld explosie kan doden via directe schokgolf of via botsing).
3. Verschillende gebeurtenissen op verschillende tijdstippen veroorzaken alle schade aan dezelfde persoon, terwijl de eerste gebeurtenis dermate grote schade veroorzaakt dat opvolgende gebeurtenissen er niet meer toe doen. Dat wil zeggen: de eerste gebeurtenis reduceert de omvang van de betrokken bevolking. Bijvoorbeeld: een persoon gedood door toxisch gas kan niet verder "beschadigd" worden door een daarop volgende explosie).

Correcties voor dubbeltellingen. Zie Bijlage G van [19].

##### Correctie op oorzaak 1.

Het cumulatieve effect kan verwijderd worden door de fracties van de populatie getroffen en die zwaardere schade hebben opgelopen van de klasse met relatief lichtere schade af te trekken. Bijvoorbeeld, het percentage getroffen en met uitsluitend eerstegraads verbrandingen wordt gevonden door van het berekende percentage (door middel van de probitfunctie) het percentage tweedegraads-

en derdegraads verbrande slachtoffers af te trekken.

### Correctie op oorzaak 2.

Dit verschijnsel is met behulp van een "Venn-diagram" weergegeven (zie Figuur 4-2). Verzameling A geeft aan alle slachtoffers in een bepaalde schadeklasse tengevolge van schademechanisme A, verzameling B idem tengevolge van mechanisme B. Indien de bijbehorende fracties (F) gegeven worden door F(A) en F(B), dan is de totale fractie in deze klasse gegeven door het product van F(A) en F(B), zie bijvoorbeeld [20].

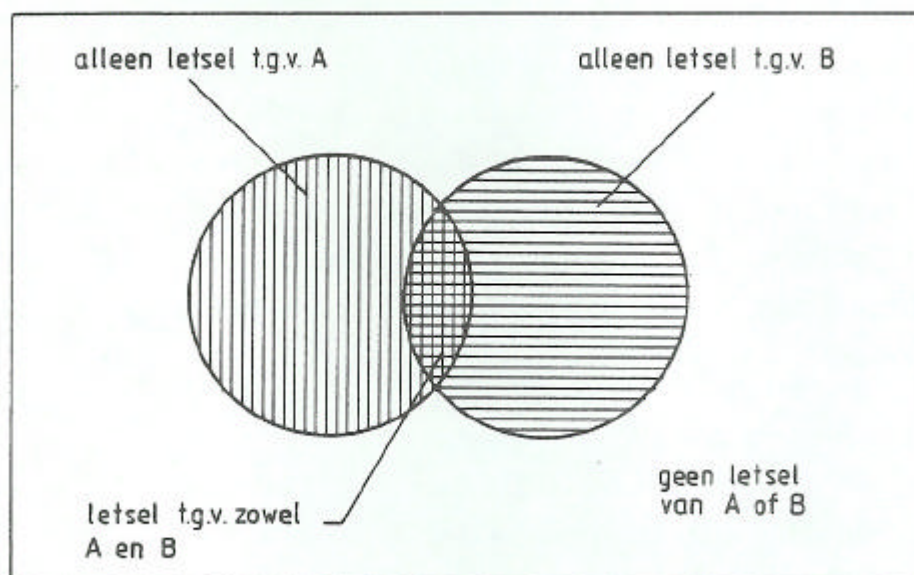
Dus voor het berekenen van het totale aantal slachtoffers moet de som van het aantal slachtoffers als gevolg van mechanisme A en mechanisme B gereduceerd worden met een factor  $(1 - F_A * F_B)$ .

### Correctie op oorzaak 3.

De juiste fractie  $F_i$  doden als gevolg van gebeurtenis op tijdstip  $t_i$ , wordt gevonden door de berekende fractie  $F_i$  door middel van de probitfunctie, te verdisconteren met de resterende betrokken bevolking dat als gevolg van de eerdere gebeurtenissen op tijdstippen is  $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}$  is verkleind:

$$F_i^{correctie} = F_i * (1 - F_1 - F_2^{correctie} - \dots - F_{i-1}^{correctie}) \quad (4.9)$$

N.B.  $F_i$  t/m  $F_1$  zijn steeds betrokken op de oorspronkelijke populatie!



**Figuur 4-2 Een Venn diagram van twee gelijktijdige schademechanismen; de vier resulterende letselklassen zijn in de figuur aangegeven.**

## 4.5 Overige modellen voor letsel door warmtestraling

In deze paragraaf worden het Lees-model en het Prugh-model behandeld. Beide modellen geven een relatie voor de overlijdenskans ten gevolge van letsel door warmtestraling.

### 4.5.1 Het Lees-model

Een model voor het bepalen van de verwondingen door warmtestraling is ontwikkeld door Lees [31]. Dit model is gebaseerd op modellen ontwikkeld door anderen, zoals Hymes (paragraaf 3.5.2) en Lawrence [28]. Aan de hand van dit model kan een berekening gedaan worden voor fatale wonden veroorzaakt door het plotselinge vrijkomen van warmte, door bijvoorbeeld een vuurbal.

In het Lees model wordt als veroorzakende factor de warmtestralingsdosis  $D_{s,L}$  genomen, gegeven als:

$$D_{s,L} = tq^{\frac{4}{3}} \quad \text{eenheid:} \quad \left[ s \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad (4.10)$$

Voor het bepalen van de ernst van een brandwond wordt het werk van Hymes (paragraaf 3.5.2) gebruikt. Hieruit blijkt de volgende relatie tussen warmtestralingsdosis en brandwonddiepte:

$$d = (8,85 * 10^{-8}) * (D_{s,L} - 920) \quad (4.11)$$

Voor de relatie tussen het percentage verbrand huidoppervlak en letaliteit worden de data van J.C. Lawrence gebruikt. Deze zijn te vinden in Tabel 3-1. Uit deze data en op basis van het uitgangspunt dat 20% van het lichaam onbedekt en derhalve blootgesteld is aan de brand (zie paragraaf 4.3), wordt de gemiddelde letaliteit voor een bevolkingsgroep bepaald. De beschouwde bevolking is die in de leeftijdscategorieën tussen de 10 en 69 jaar verdeeld over 12 groepen. De gemiddelde letaliteit ( $p_{ma}$ ) voor de geselecteerde bevolkingscategorie bedraagt op basis van de besproken uitgangspunten en de data uit Tabel 3-1

$$p_{ma} = \frac{(0,1 * 3) + 0,3 + 0,5}{12} = 0,09 \quad (4.12)$$

Voor de basis situatie die hierboven is besproken, wordt voor de bij  $p_{ma} = 0,09$  behorende brandwonddiepte een waarde van  $d_a = 0,25$  mm genomen. Deze brandwonddiepte correspondeert met een warmtestralingsdosis van  $1,2 * 10^7 (W/m^2)^{4/3}s$  volgens vergelijking 4.11. De warmtestralingsdosis waarbij de brandwonddiepte en het letaliteitspercentage 0 zijn, bedraagt  $9,2 * 10^6 (W/m^2)^{4/3}s$  volgens vergelijking 4.11.

Door tussen de hierboven afgeleide punten te extrapoleren kan er een tabel gemaakt worden die de relatie weergeeft tussen warmtestralingsdosis, brandwonddiepte en letaliteit.

**Tabel 4-3 Relatie tussen warmtestralingsdosis, brandwonddiepte en letaliteit volgens Lees [31]**

Warmtestralingsdosis, $D_{s,L}$ ( $W/m^2$ ) <sup>4/3</sup> s	Brandwonddiepte, $d$ (mm)	Letaliteit, $p_m$
$920 \cdot 10^4$	0	0
$1200 \cdot 10^4$	0,25	0,09
$3200 \cdot 10^4$	2,0	0,64
$4500 \cdot 10^4$	3,17	1,0

De variatie van de letaliteit met betrekking tot de brandwonddiepte kan worden uitgedrukt in termen van de gemiddelde brandwonddiepte aan de hand van de volgende relaties.

$$d_1 = \frac{d - d_l}{d_a - d_l} \quad d \leq d_a \quad (4.13a)$$

$$d_2 = \frac{d - d_a}{d_u - d_a} \quad d > d_a \quad (4.13b)$$

De subscript a, l, u, 1 en 2 staan voor gemiddelde, laagste, hoogste, eerste coëfficiënt en tweede coëfficiënt. De letaliteit (overlijdenskans) kan dan gegeven worden als:

$$p_m = d_1 * p_{ma} \quad d \leq d_a \quad (4.14a)$$

$$p_m = p_{ma} + d_2 * (1 - p_{ma}) \quad d > d_a \quad (4.14b)$$

Als blootgesteld gebied wordt de onbedekte huid van zowel de voor- als achterkant van het lichaam aangehouden. De blootstelling wordt aan beide kanten even groot verondersteld.

Om een correcte relatie weer te geven over de blootstelling van de huid moet er wel rekening mee worden gehouden dat maar de helft van de onbedekte huid op een moment blootgesteld kan zijn (voorkant of achterkant). Deze factor wordt in de warmtestralingsdosis vergelijking toegepast op de blootstellingstijd, zodat de vergelijking voor de warmtestralingsdosis als volgt wordt:  $tq^{4/3}$ , met  $\gamma=0,5$ . Op deze manier wordt een gegeven warmtestralingsdosis inwerkend op de helft van het blootgestelde huidoppervlak gedurende tijdsinterval t, behandeld als zijnde equivalent aan de helft van die warmtestralingsdosis inwerkend op het totale blootgestelde huidoppervlak gedurende hetzelfde tijdsinterval.

Voor ontsteking van kleding zijn correlaties ontwikkeld die gebruik maken van verschillende warmtestralingsdoses. De warmtestralingsdosis gebruikt door Hymes (en besproken in paragraaf 3.5.2) is de reguliere warmtestralingsdosis  $tq^{4/3}$ . In paragraaf 5.2 worden de volgende vergelijking en drempelwaarde voor ontsteking van kleding afgeleid:

$$tq^2 = 3,5 * 10^{10} \quad \text{eenheid: } \left[ s \left( \frac{W}{m^2} \right)^2 \right] \quad (4.15)$$

Dit geeft voor een 5 seconden durende puls een intensiteit  $q = 84 \text{ kW/m}^2$  en een warmtestralingsdosis

van:

$$D_{s,L} = tq^{\frac{4}{3}} \approx 1,8 * 10^7 \quad \text{eenheid} \left[ s \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad (4.16)$$

uitgaande van de dosisrelatie van Hymes.

In het Lees model wordt verondersteld dat ontbranding van kleding resulteert in verdubbeling van het effectief blootgesteld oppervlak. Als ontbranding van kleding optreedt, wordt dit verdubbelde oppervlak dus het nominaal blootgesteld oppervlak. De factor  $\phi$  heeft dan de waarde één.

Aan de hand van de nieuwe vergelijking voor warmtestralingsdosis is een uitgebreidere tabel gemaakt voor de relatie tussen warmtestralingsdosis, brandwonddiepte en letaliteit in het Lees model ten opzichte van het model van Eisenberg. Dit is Tabel 4-4.

**Tabel 4-4: relatie tussen warmtestralingsdosis, brandwonddiepte en letaliteit in het Lees model ten opzichte van het model van Eisenberg**

Warmtestralingsdosis $D_{s,L}$ [(W/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> s]	Brandwonddiepte d (mm)	Letaliteit volgens Lees, $p_m$ (%)	Letaliteit volgens Eisenberg, (%)
1,0*10 <sup>7</sup>	0,07	0,025	0,015
1,2*10 <sup>7</sup>	0,25	0,09	0,04
1,4*10 <sup>7</sup>	0,42	0,14	0,09
1,6*10 <sup>7</sup>	0,60	0,20	0,16
1,8*10 <sup>7</sup>	0,78	0,26	0,24
2,0*10 <sup>7</sup>	0,96	0,31	0,33
2,5*10 <sup>7</sup>	1,40	0,45	0,55
3,0*10 <sup>7</sup>	1,84	0,59	0,73
3,2*10 <sup>7</sup>	2,00	0,64	0,78
4,5*10 <sup>7</sup>	3,17	1,00	0,95

De probitrelatie voor letaal letsel die verkregen wordt uit de data in de bovenstaande tabel is:

$$Pr = -10,7 + 1,99 \ln \left( \frac{D_{s,L}}{10^4} \right) \quad (4.17)$$

In deze probitrelatie is de laatste waarde van Lees met een overlijdenskans van 1,0 niet mee genomen. Zoals beschreven op de vorige pagina correspondeert een warmtestralingsdosis van 4500 \* 10<sup>4</sup> met een letaliteitspercentage van 100%.

Hierdoor geldt de gegeven probit relatie maar tot een letaliteitspercentage van 70%. De volgende vergelijkingen dienen te worden gebruikt in plaats van vergelijking 4.17 voor letaliteitspercentages boven de 70%:

$$p_m = 0,70 + 0,0003 * \left( \left( \frac{D_{s,L}}{10^4} \right) - 3500 \right) \quad \text{waarbij} \quad \left( \frac{D_{s,L}}{10^4} \right) < 4500 \quad (4.18a)$$

en

$$p_m = 1,0 \quad \text{waarbij} \quad \left( \frac{D_{s,L}}{10^4} \right) \geq 4500 \quad (4.18b)$$

In de Tabel 4.4 zijn ter vergelijking ook de letaliteitspercentages gegeven aan de hand van formule 4.19, een probitrelatie die ontwikkeld is door Eisenberg, Lynch en Breeding.

$$\text{Pr} = -14,9 + 2,56 \ln \left( tq^{\frac{4}{3}} * 10^{-4} \right) \quad (4.19)$$

Te zien is dat de resultaten van de twee modellen, behalve voor de zeer hoge warmtestralingsdoses, niet zo veel verschillen. Het verschil tussen de twee modellen zit hem voornamelijk in de behandeling van het effectief blootgesteld oppervlak.

In Tabel 4-5 is het Lees model gegeven voor een plotselinge vuurbal van 20 ton LPG, deze vuurbal is gemodelleerd op basis van het werk van Marshall. Ook de letaliteitspercentages die voor deze vuurbal verkregen worden met de probitrelatie van Eisenberg zijn in de tabel weergegeven. De ruwe warmtestralingsintensiteit van de vuurbal bedraagt  $2,17 \cdot 10^9 / x^2$  [W/m<sup>2</sup>], waarbij x [m] de afstand is tussen het centrum van de vuurbal tot de aangestraalde persoon. De warmtestraling wordt afgezwakt door de atmosferische condities.

De afstand tot 50% letaliteit bij blootstelling aan de beschreven vuurbal bedraagt 170 meter op basis van de Eisenberg probitrelatie en 125 meter op basis van het Lees model. Lees geeft aan dat ook zijn model conservatieve resultaten kan geven, alhoewel het Lees model minder conservatief is dan de Eisenberg probitrelatie.

**Tabel 4-5: Lees model gegeven voor een plotselinge vuurbal van 20 ton LPG**

A Lichamelijke omstandigheden							
Afstand (m)	Warmtestralings-intensiteit [kW/m <sup>2</sup> ]		Warmtestralingsdosis-factor, D <sub>s,L</sub> / t [(W/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> ]	Tijd tot ontbranding [s]	Warmtestralingsdosis [s*(W/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> ]		
	ruw, I	afgezwakt, I <sub>e</sub>			Voor ontbranding	Na ontbranding	Totaal, D <sub>s,L</sub>
75 <sup>a</sup>	390						
95 <sup>b</sup>	240	173	9,64*10 <sup>6</sup>	3,73	1,8*10 <sup>7</sup>	6,044*10 <sup>7</sup>	7,844*10 <sup>7</sup>
105	197	142	7,38*10 <sup>6</sup>	4,89	1,8*10 <sup>7</sup>	3,771*10 <sup>7</sup>	5,571*10 <sup>7</sup>
115	164	118	5,77*10 <sup>6</sup>	6,24	1,8*10 <sup>7</sup>	2,169*10 <sup>7</sup>	3,969*10 <sup>7</sup>
125	139	97	4,44*10 <sup>6</sup>	8,11	1,8*10 <sup>7</sup>	8,39*10 <sup>6</sup>	2,639*10 <sup>7</sup>
135	119	83	3,61*10 <sup>6</sup>	9,97	1,8*10 <sup>7</sup>	5,4*10 <sup>5</sup>	1,854*10 <sup>7</sup>
145	103	72	2,98*10 <sup>6</sup>	N	(1,49 *10 <sup>7</sup> )	N/A	1,490*10 <sup>7</sup>

<sup>a</sup> Straal van bolvormige vuurbal

<sup>b</sup> Straal van semi-seculaire vuurbal

<b>B Thermisch letsel</b>			
<b>Afstand (m)</b>	<b>Ontbranding kleding</b>	<b>Letaliteit Lees, p<sub>m</sub> (%)</b>	<b>Letaliteit Eisenberg (%)</b>
75 <sup>a</sup>	Ja	1,00	1,00
95 <sup>b</sup>	Ja	1,00	1,00
105	Ja	1,00	1,00
115	Ja	0,84	0,99
125	Ja	0,49	0,95
135	Ja	0,23	0,86
145	Nee	0,12	0,72

#### 4.5.2 Het Prugh Model

Naast het model van Lees is er nog een ander model voor het bepalen van de ernst van letsel door brand: het model van Prugh [33]. Het Prugh model heeft betrekking op letsel ten gevolge van blootstelling aan een vuurbal. Prugh presenteert een samenvatting van data op het gebied van letsel door warmtestraling, welke voor letaliteitspercentages gebaseerd zijn op het werk van Eisenberg, Lynch en Breeding [2], het model van Lees [31], A.F. Roberts [34] en 'the society of Fire Protection Engineers' (1988 NFPA/22).

Uit deze data leidt hij de correlatie af voor de overlijdenskans p<sub>m</sub>. Deze correlatie luidt als volgt:

$$p_m = \left( 1 + \left[ 1 - \left\{ \exp \left( -5,3 \left\langle \ln \left[ \frac{t^* q}{53} \right] \right\rangle^2 \right) \right\} \right]^{0,5} \right) * \left\{ 1 - 2 \left[ \frac{t^* q}{53} \right] \right\} \quad (3.20)$$

waarin t\*q staat voor de warmtehoeveelheid [J/m<sup>2</sup>].

Opvallend bij de vergelijking tussen dit model en de andere modellen in PGS 1 is dat de overlijdenskans bij het model van Prugh aanmerkelijk lager is.

Verdere uitleg over de toepassing van het model van Prugh en een vergelijking tussen dit model en andere modellen die gegeven zijn in PGS 1 kan worden gevonden in het boek van Prugh (Quantitative evaluation of fireball hazards. Process Safety Progress. Vol. 13, no. 2. 1994).

## 5 De invloed van kleding en bescherming door gebouwen

### 5.1 Inleiding

In vrijwel alle gevallen zullen personen die worden blootgesteld aan warmtestraling en zich buitenshuis bevinden kleding dragen. Deze kleding zal zeker een positieve invloed hebben op de reductie van de omvang van brandwonden door straling. In paragraaf 5.3 wordt afgeleid in welke mate het aantal dodelijke slachtoffers gereduceerd kan worden door kleding. De beschermende werking van kleding hangt af van verschillende factoren. Bij een goed reflecterende buitenzijde van de kleding zal de warmte slechts in geringe mate worden doorgelaten. Een gering warmtegeleidingsvermogen en een grote warmtecapaciteit van de kleding zal een langzame stijging van de temperatuur van de binnenzijde van de kleding tot gevolg hebben. Ook luchtlagen tussen opvolgende kledingstukken en tussen de huid en de kleding verhoogt de warmte weerstand aanzienlijk. Vocht in kleding verlaagt de warmte weerstand als gevolg van warmtetransport door hete waterdamp.

Indien de stralingsintensiteit zo groot is dat kleding door zelfontbranding ontvlamt dan heeft vluchten weinig zin meer en is de kans op brandwonden door de brandende kleding zeer waarschijnlijk. Daarom is onderzocht bij welke stralingsdosis kledingmaterialen spontaan zullen ontsteken (paragraaf 5.2.1).

### 5.2 De ontsteking van kleding

Voor kleding die wordt blootgesteld aan warmtestraling dient verschil te worden gemaakt tussen spontane en z.g. 'piloted' ontsteking, ontsteking door een ontstekingsbron. Vooral in geval van een BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) is 'piloted' ontsteking waarschijnlijk, bijvoorbeeld door brandend papier of brandende bladeren. De ontstekingstijd zal dan nog minder zijn dan 5 seconden.

#### 5.2.1 Spontane ontsteking

In [11] is voor samples van geweven stoffen (meubelbekledingsstoffen, 3 \* katoen, 1 \* rayon) de tijd nodig voor ontsteking experimenteel bepaald bij drie stralingsniveaus. In overeenstemming met andere schademechanismen kan worden verondersteld dat het al dan niet ontsteken van een sample afhangt van de warmtestralingsdosis  $D_s$ , te definiëren als

$$D_s = t_c * q^n \quad \text{eenheid:} \quad \left[ s * \left( \frac{W}{m^2} \right)^n \right] \quad (5.1)$$

Uit de gegevens in [11] volgt dat de exponent  $n$  voor de vier kledingmonsters praktisch gelijk is aan 2. De volgens (5.1) gedefinieerde stralingsdosis neemt toe als de stofdikte toeneemt, de waarde ligt ruwweg tussen  $2,5 \cdot 10^4$  en  $4,5 \cdot 10^4$  (kW/m<sup>2</sup>)<sup>2</sup> s.

Aangezien meubelbekledingsstoffen gerekend worden tot de zware stofsoorten, wordt voor gemiddelde kleding uitgegaan van een dosis gelijk aan  $2,5 \cdot 10^4$  (kW/m<sup>2</sup>)<sup>2</sup> s. Bij een blootstellingsduur van 60s komt dit overeen met een stralingsintensiteit van 20 kW/m<sup>2</sup>, bij 10s blootstellingsduur met 50 kW/m<sup>2</sup>.

Hymes constateert dat de meeste kleding spontaan zal ontsteken binnen 5 seconden als deze blootgesteld wordt aan een warmtestraling van meer dan 75 kW/m<sup>2</sup>.

---



Door Hymes [8] wordt gebruik gemaakt van de resultaten van onderzoek, uitgevoerd door Wulff [12], naar de eigenschappen van 20 verschillende (alledaagse) kledingstoffen, zie Tabel 5-1. De exponent  $n$  blijkt voor deze stoffen te variëren van circa 1,0 tot 2,7. Een oorzaak voor het verschil met [11] is niet bekend<sup>2</sup>. Uit Tabel 5-1 volgt dat 10 - 40% van de invallende straling wordt doorgelaten. Gemiddeld wordt circa 50% gereflecteerd, 30% wordt doorgelaten en 20% geabsorbeerd door het weefsel. In Figuur 5-1 wordt de tijd nodig voor ontsteking, met en zonder ontstekingsbron, vergeleken met de tijd nodig voor derdegraadsverbranding van de onbeschermdde huid. Het blijkt dat de tijd nodig voor zelfontbranding praktisch altijd langer is dan de tijd nodig voor derdegraadsverbranding van de (onbeschermdde) huid.

Voor bepaalde toepassingen (stoffering, kinderkleding) wordt soms materiaal toegepast dat meer dan normaal vlamwerend is. Dit materiaal zal ook pas bij een hogere stralingsdosis tot ontsteking komen. In de praktijk kan echter worden aangenomen dat de aan warmtestraling bij een brand blootgestelde personen normale kleding dragen.

#### **Toelichting Tabel 5-1 en Figuur 5-1**

Voor de twintig verschillende materialen uit Tabel 5-1 is in Figuur 5-1 de blootstellingstijd nodig voor zelfontbranding, voor verschillende warmtestralingsdoses uitgezet, gebaseerd op de cijfers van Wulff [12].

Ter vergelijking zijn in de figuren tevens de grafieken corresponderende met de ontbranding met ontstekingsbron en voor derdegraadsverbranding, opgenomen.

---

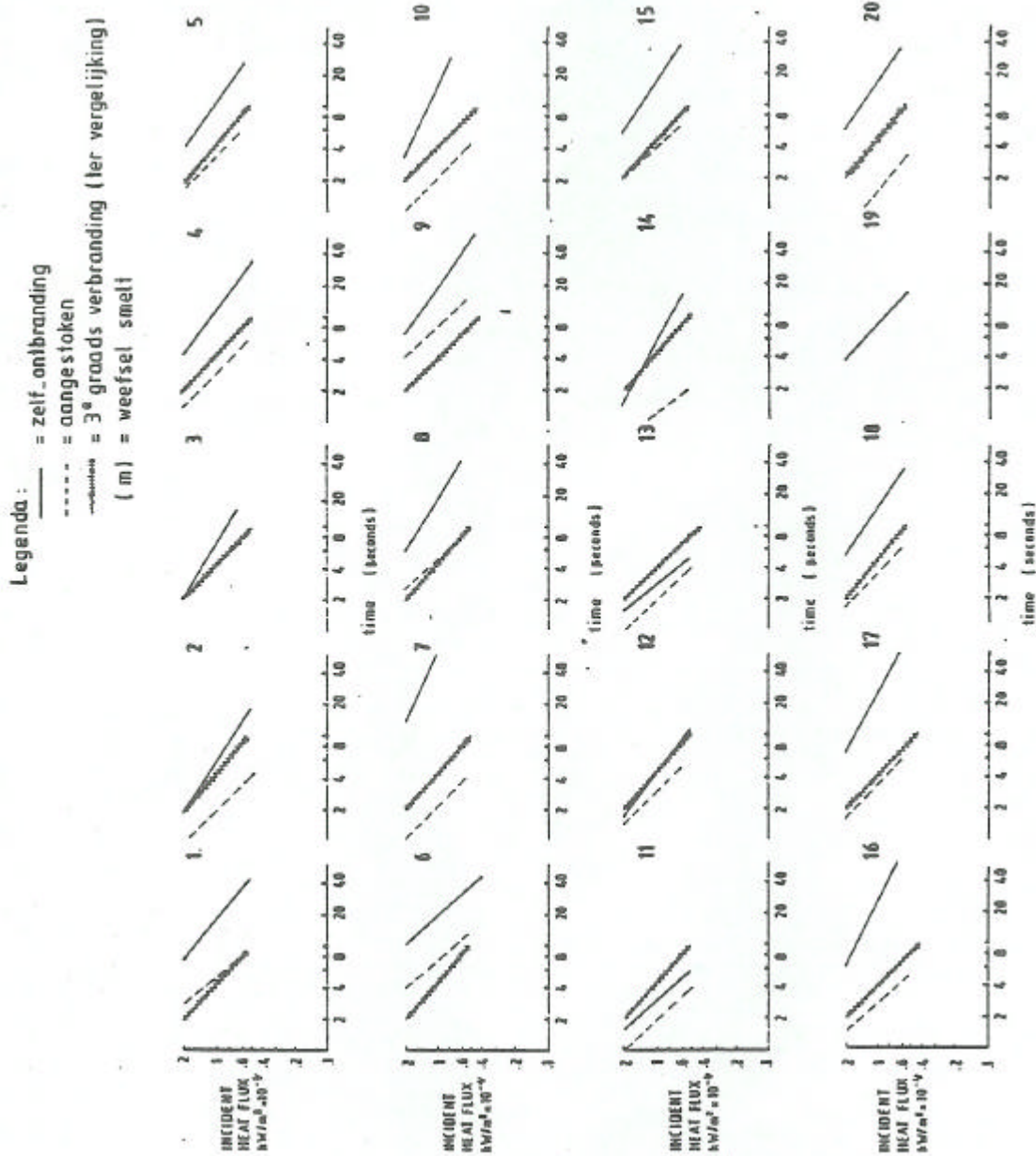
<sup>2</sup> Hilado en Murphy [11] onderzochten meubelbekledingsstoffen, terwijl de door Wulff onderzochte stoffen kledingmaterialen betreffen.

---

Tabel 5-1: Eigenschappen van 20 (alledaagse) kledingstoffen overgenomen uit [8]

Kleefsel en beschrijving	Toezicht	Kleur	Afwerking	Soortelijke massa (kg.m <sup>-2</sup> )	Luchtig oxygen index <sup>a</sup> (%)	Heefueldikte (mm)	Waarne gaeidings-coefficienten bij 90 °C (m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	Soortelijke waarde bij 100 °C (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	Verkoelings-temperatuur (°C) T <sub>c</sub>	Gemiddelde zelfontontings-temperatuur (°C) T <sub>1,0</sub>	Ontstekings-temperatuur (met aansteekvlam) (°C)	Optische respons op i.r. bron: (0,6-2,5 µm) (% van invallende flux)		Verbrandings-waarde kJ/g		
												Geoor- teerd	Geoor- beerd			
1. Pantalon	65/35 PE katoen	wit	daarzaam gepreut	0,24	18	0,46	0,16	1,35	219	413	334	52,2	26,9	10,9	11,1	2,7
2. Geweven blouse	100% PE	geel		0,08	19	0,20	0,22	1,42	134	258	301	50,1	34,6	15,3		
3. Dikker geb.	100% PE	wit		0,21	20	0,65	0,06	1,30	134	250	319	61,9	23,8	14,3		
4. Jersey	100% katoen	marine		0,30	17	0,56	0,13	1,37	162	290	285	49,1	13,7	37,2	13,4	2,9
5. Sporttrui	100% katoen	wit		0,14	17	0,53	0,12	1,54	162	305	306	52,1	29,6	18,3	13,2	1,8
6. Pantalon	65/35 PE-katoen	wit		0,24	17	0,48	0,15	1,20	219	413	341	56,1	28,4	13,5	11,7	2,8
7. Sporttrui	100% acryl	geel		0,15	16	0,79	0,08	1,61	239	242	310	54,9	15,9	39,2	20,8	
8. Sporttrui	65/35 PE-katoen	wit		0,16	17	0,62	0,09	1,39	239	435	294	56,0	27,8	16,4	13,2	2,1
9. Badstof	100% katoen	wit		0,27	16	2,0	0,03	1,49	162	302	294	62,3	23,1	14,6		
10. Badstof	100% katoen	paars		0,07	16	0,10	0,03	1,84	239	436	345	46,6	39,4	20,0	13,0	0,6
11. T-shirt	80/20 acryl	wit		0,11	18	0,61	0,08	1,45	134	228	310	50,8	32,9	16,3	16,0	
12. T-shirt	100% nylon	wit		0,09	20	0,27	0,18	2,19	134	246	345	36,7	43,3	17,0		
13. T-shirt	100% acryl	wit	daarzaam gepreut	0,08	18	0,30	0,18	1,72	134	230	345	44,3	39,0	16,7	15,2	
14. Pantalon	100% nylon	wit		0,06	25	0,11	0,28	1,78	134	241	335	34,6	43,4	21,8		
15. Pantalon	65/35 PE-katoen	bruin		0,23	18	0,42	0,15	1,32	217	422	335	41,3	33,1	20,6	10,0	2,3
16. Overhemd	50/50 PE-katoen	wit		0,12	16	0,32	0,20	1,34	217	555	355	49,9	29,4	20,7	11,6	1,5
17. Badstof	65/35 PE-katoen	wit		0,09	18	0,19	0,25	1,50	252	472	378	46,4	37,2	16,4	12,4	1,0
18. Flanel	100% katoen	wit		0,12	17	0,71	0,07	1,66	162	305	286	57,3	25,1	17,6	13,7	1,7
19. Flanel	100% katoen	wit	brand verwurd	0,15	25	0,68	0,08	1,65	252	468	322	60,2	19,7	20,1	5,6	
20. Flanel	100% wol	bruin		0,20	26	0,72	0,07	1,27	252	471	323	56,5	19,2	23,3	9,3	

[1] In originele tabel: "jersey"



Figuur 5-1: Tijd nodig voor ontsteking van de in Tabel 5-1 opgenomen weefsels – overgenomen uit [8].

### 5.2.2 'Piloted' ontsteking

In geval van 'piloted' ontsteking wordt voor de ontstekingstijd de tijd genomen die nodig is om het stuk textiel op te warmen van zijn initiële temperatuur ( $T_0$ ) tot aan zijn 'piloted' ontstekingstemperatuur ( $T_p$ ). Deze 'piloted' ontstekingstijd wordt gegeven door:

$$t_p = S \cdot c \cdot (T_p - T_0) / (a \cdot W)$$

$a$  = absorptiecoëfficiënt

$c$  = soortelijke warmte (J/kg°C)

$S$  = dichtheid (kg/m<sup>2</sup>)

$W$  = warmtestraling (W/m<sup>2</sup>)

Als voorbeeld berekent Hymes  $t_p$  voor een stuk textiel met  $a = 0,19$ ,  $c = 1,35 \cdot 10^3$  J/kg°C,  $S = 0,24$  kg/m<sup>2</sup> en 'piloted' ontstekingstemperatuur. Bij een initiële temperatuur van 14 °C en een warmtestraling van 198 kW/m<sup>2</sup> is  $t_p$  gelijk aan 2,75 seconden.

### 5.2.3 Effecten van brandende kleding

Brandende kleding heeft twee effecten. Ten eerste veroorzaakt brandende kleding letsel aan de drager ervan. Ten tweede leidt het de drager af. Deze zou kunnen stoppen met vluchten en proberen de vlammen te doven, hetgeen niet alleen de vluchtsnelheid maar ook de oriëntatie van het lichaam ten opzichte van de brand beïnvloedt.

Voor wat betreft de warmtestraling van brandende kleding geeft Hymes de volgende cijfers. De verbrandingswarmte van kleding (zoals katoen) ligt in de range van 5-20 kJ/g, ofwel 1-4 J/mm<sup>2</sup>. Wanneer de kleding brandt, wordt ca. 15-50% van de warmte naar de huid getransporteerd, zodat de warmtestralingsdosis ca. 105-356 kJ/m<sup>2</sup> zou moeten bedragen.

## 5.3 De beschermende werking van kleding

Het ontstaan van wonden op lichaamsdelen die beschermd worden door kleding vergt een hogere stralingsdosis dan voor onbedekte huid. Als wordt verondersteld dat ernstige brandwonden op de door kleding bedekte huid slechts zullen ontstaan wanneer de kleding door zelfontbranding ontstoken wordt, dan houdt dit tevens in dat de overlevingskansen van blootgestelde personen daardoor aanzienlijk vergroot worden.

In [3] wordt een overzicht gegeven van percentages verbrand oppervlak per lichaamsdeel en als functie van de leeftijd (Tabel 5-2).

---

**Tabel 5-2: Overzicht van percentages verbrand oppervlak als functie van de leeftijd.**

Verbranding	1 jaar	1-4 jaar	5-9 jaar	10-14 jaar	15 jaar	volwas-senen
hoofd	19	17	13	11	9	7
hals	2	2	2	2	2	2
romp (voor)	13	13	13	13	13	13
romp (achter)	13	13	13	13	13	13
rechter zitvlak	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
linker zitvlak	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
genitaliën	1	1	1	1	1	1
rechter bovenarm	4	4	4	4	4	4
linker bovenarm	4	4	4	4	4	4
rechter onderarm	3	3	3	3	3	3
linker onderarm	3	3	3	3	3	3
rechter hand	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
linker hand	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
rechter bovenbeen	5,5	6,5	8	8,5	9	9,5
linker bovenbeen	5,5	6,5	8	8,5	9	9,5
rechter onderbeen	5	5	5,5	6	6,5	7
linker onderbeen	5	5	5,5	6	6,5	7
rechter voet	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
linker voet	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Als wordt aangenomen dat door de aanwezigheid van kleding alleen het gezicht, de hals, de onderarmen en de handen verbrandingen oplopen dan is het percentage verbrand oppervlak maximaal gelijk aan het huidoppervlak van die lichaamsdelen, namelijk 20% van totaal. Eventueel kan een verfijning met betrekking tot jaargetijde en bevolkingsgroep worden aangebracht. De fractie van de huid die altijd onbeschermd is, bedraagt 14% (gezicht, hals en handen).

**Tabel 5-3: Verband tussen leeftijd en letaliteit (sterftefractie) bij ongeveer 20% verbrand oppervlak.**

Leeftijd (jaar)																
0-4	5-9	10-14	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85+
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9

Hieruit volgt dat ondanks de beschermende werking van kleding een deel van de blootgestelde personen, door de stralingsdosis letaal wordt getroffen (0% jonger dan 45, 10% tussen 45 en 60 en dan oplopend tot 90% voor personen ouder vanaf 85). Indien de blootgestelde groep qua leeftijdsopbouw dezelfde samenstelling heeft als de Nederlandse bevolking dan betekent dit dat 14% van de blootgestelde personen, ondanks de bescherming door kleding, zodanige brandwonden op zullen lopen dat ze daardoor overlijden.

De beschermende werking door kleding gaat alleen op zolang de zelfontbrandingstemperatuur van de kleding niet bereikt wordt. Op basis van de te berekenen effectieve blootstellingsduur en het bijbehorende stralingsniveau kan aan de hand van Figuur 5-1 (uitgaande van een bepaalde kledingsoort volgens Tabel 5-1) bepaald worden of de kleding ontsteekt. Het lijkt daarbij redelijk uit te gaan van een situatie waarbij ontstekingsbronnen aanwezig zijn (piloted ignition).

Zonder ontsteking van kleding zal de mate waarin eerste-, tweede en derdegraadsverbranding optreedt globaal gezien gelijk zijn aan 14% (=fractie altijd onbeschermd huidoppervlak) van de met probitfuncties berekende waarden. Deze corresponderen met letselklassen ten gevolge van warmtestralingsdoses zonder beschermende kleding, (hoofdstuk 4). In dit geval ligt de keuze voor een overlijdenskans gelijk aan 1 voor de hand.

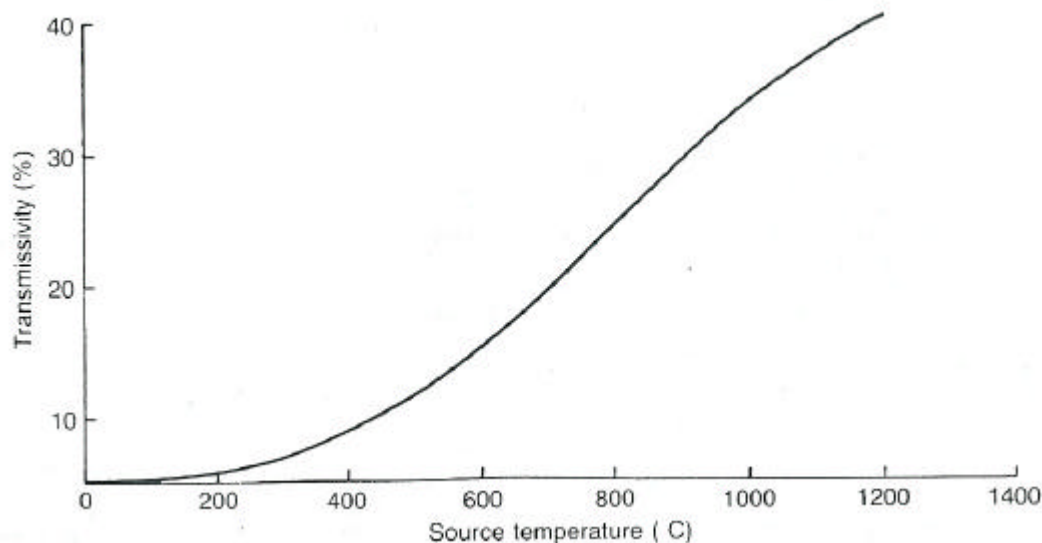
#### 5.4 Bescherming door gebouwen

De mate van bescherming die een gebouw biedt in geval van een brand wordt hoofdzakelijk bepaald door de plek van een persoon binnen het gebouw.

In de meeste gevallen biedt een gebouw volledige bescherming. Een persoon loopt echter wel kans blootgesteld te worden wanneer hij in de buurt van een raam staat. Hij kan dan blootgesteld worden aan de warmtestraling die door glazen ramen heen gaat.

De kans op blootstelling wordt verhoogd wanneer een persoon zich bewust is van een gebeurtenis en achter het raam gaat staan kijken.

Hymes heeft de geleidbaarheid van glas voor warmtestraling onderzocht tot temperaturen van 1200°C. De uitkomsten van dit onderzoek zijn gegeven in Figuur 5-2.



**Figuur 5-2: Doorlatendheid voor warmtestraling van normaal glas voor ruiten**

## **6 Keuze van de blootstellingsduur van personen bij warmtestraling door brand**

### **6.1 Inleiding**

Bij branden, bijvoorbeeld een plasbrand of een fakkel wordt het warmtestralingsletsel bij personen bepaald door de duur van de blootstelling aan de straling. Bij de bepaling van de omvang van het persoonlijk letsel is de keuze van de blootstellingsduur daarom van wezenlijk belang. Het is duidelijk dat de blootstellingsduur in een specifieke situatie van zoveel (toevallige) omstandigheden afhangt dat in feite geen sprake kan zijn van een vaste richtlijn voor de keuze van de blootstellingsduur bij de afleiding van de schade. Behalve van de omgevingsomstandigheden (mogelijke vluchtwegen en schuilmogelijkheden) hangt de duur ook af van de samenstelling van de blootgestelde groep.

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de verschillende facetten die met betrekking tot de blootstellingsduur bij een brand een rol spelen en zal op basis van de beschikbare informatie een aanbeveling worden gedaan voor een zo verantwoord mogelijke keuze voor de blootstellingsduur.

### **6.2 Invloed van de samenstelling van de blootgestelde groep**

Letsel van enige omvang (minimaal eerstegraadsverbrandingen) zal zich alleen voordoen bij personen die zich vrij dicht bij de brand bevinden. Het stralingsniveau neemt ruwweg kwadratisch af met de afstand tot de brand. Dit betekent dat alleen de groep mensen in de directe omgeving van belang is bij de afweging van de invloed van het gedrag van mensen in een brandsituatie.

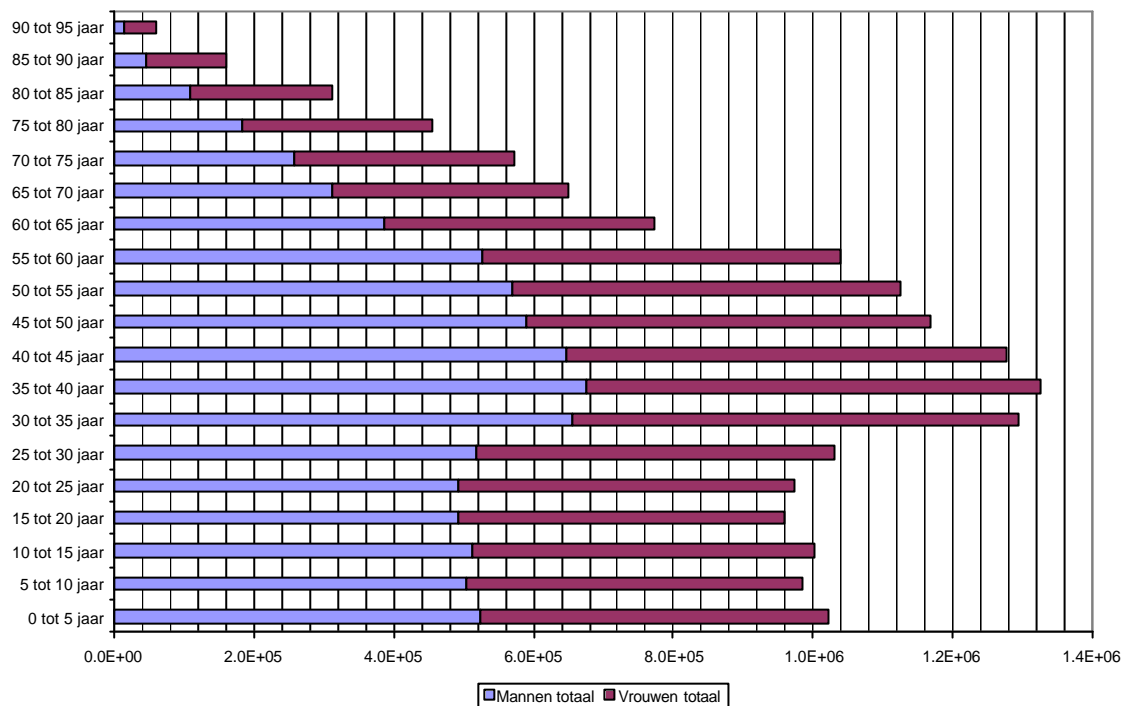
Indien zich een calamiteit voordoet dan is de snelheid waarmee mensen een veilig heenkomen zoeken sterk afhankelijk van de bekendheid van de betrokkenen met de ernst van de situatie. Dit betekent dat bijvoorbeeld werknemers op een raffinaderij waarschijnlijk veel effectiever bescherming zullen zoeken dan kinderen die buiten spelen, in geval in hun omgeving een brand ontstaat. Wel geldt voor iedereen dat de mens van nature geneigd is zich te beschermen tegen fysieke bedreigingen. Bij blootstelling van mensen uit een gevoelige groep (bijvoorbeeld kleuters, zieken, gehandicapten, ouderen) zal in het algemeen de blootstellingsduur langer zijn, doordat de vluchtmogelijkheden geringer zijn.

De personen van de blootgestelde groep die zich binnenshuis bevinden zullen daardoor zoveel bescherming vinden voor warmtestraling dat slachtoffers in die deelgroep niet waarschijnlijk zijn. Slachtoffers binnenshuis kunnen wel optreden doordat er binnenshuis secundaire branden ontstaan.

Ook de leeftijdsopbouw van de blootgestelde groep speelt een rol bij de vaststelling van de blootstellingsduur. De bereidheid en de mogelijkheid tot zelfstandig handelen en het ongecontroleerd handelen door het ontstaan van paniek zijn waarschijnlijk afhankelijk van de leeftijd van de blootgestelden.

De bevolkingsopbouw in Nederland is weergegeven in Figuur 6-1.

---



**Figuur 6-1: Bevolkingsopbouw in Nederland (CBS-gegevens, 2003).**

Als wordt aangenomen dat kinderen jonger dan 10 jaar en ouderen ouder dan 65 jaar minder efficiënt zullen vluchten of schuilen tegen warmtestraling dan de "gemiddelde" blootgestelden dan betekent dit dat voor circa 26% van de bevolking de blootstellingsduur langer is dan het gemiddelde.

Wanneer op voorhand kan worden vastgesteld dat de blootgestelde groep in de beschouwde situatie qua samenstelling afwijkt van de gemiddelde samenstelling dan ligt de keuze voor een afwijkende blootstellingsduur voor de hand.

Door de keuze van een reactietijd en een vluchtsnelheid per subgroep kan per groep de effectieve blootstellingstijd worden afgeleid volgens de methode van paragraaf 6.5. Deze (verschillende) tijdsduren kunnen gebruikt worden bij de afleiding van de schadeomvang met behulp van de probitfuncties, zoals die worden behandeld in hoofdstuk 4.

Het is zinvol om in risicoanalyses bevolkingsgroepen te onderscheiden. Voorbeelden van dergelijke bevolkingsgroepen zijn:

- mensen die worden verpleegd in ziekenhuizen, verpleegtehuizen, etc.;
- bewoners van bejaardenhuizen;
- kinderen in scholen;
- recreanten op stranden en campings.

Het onderzoek naar gevoelige bevolkingsgroepen moet gebaseerd zijn op de overweging van de mogelijkheden van de beschouwde groepen om bescherming te zoeken en te vinden.



Ingeval van blootstelling aan warmtestraling wordt in ruime mate bescherming geboden door aanwezigheid binnenshuis. Dit betekent dat gevoelige bevolkingsgroepen voor warmtestraling in de eerste plaats gezocht moeten worden op plaatsen waar grotere aantallen personen aanwezig (kunnen) zijn met weinig mogelijkheden voor bescherming (bijvoorbeeld recreanten).

### 6.3 Invloed van de brandsituatie

Indien zich een calamiteit voordoet dan is het moment waarop de brand begint van groot belang in relatie tot de kans op en de duur van de blootstelling aan warmtestraling. Wanneer de volle omvang van een brand bij een calamiteit pas enige tijd na het begin van de calamiteit (dat is het moment waarop de kritieke situatie ontdekt wordt en alarm wordt geslagen) optreedt dan zullen eventueel aanwezige personen veelal voldoende tijd ter beschikking hebben om zich in veiligheid te stellen. Indien de brandsituatie zich zonder vooraankondiging voordoet, dan kunnen onder bepaalde omstandigheden de mogelijke vluchtwegen worden versperd door de brand. In zo'n situatie kan de blootstellingsduur in principe net zo lang zijn als de brandduur.

Indien de actie van eventueel blootgestelde personen bestaat uit vluchten om zodoende ver genoeg van de brand te geraken, zodat het stralingsniveau onder een nadelig niveau komt, dan is de omvang van de brand van belang, zie paragraaf 6.4.

Van de vuurhaard wegvluchten is eenvoudiger naarmate minder obstakels op de vluchtweg voorkomen. Dit betekent dat vluchten in een vlakke onbebouwde omgeving het eenvoudigst is en dus het snelste zal verlopen. Bij het zoeken naar schuilmogelijkheden is de aanwezigheid van bebouwing en andere obstakels weer een voordeel. Er worden daarmee meer mogelijkheden geboden om bescherming te vinden in de "schaduw" van een obstakel.

In de meeste gevallen zal de aanwezigheid van obstakels van voordeel zijn ten aanzien van de benodigde tijd om afdoende bescherming te vinden. Het is daarom logisch om deze tijd te koppelen aan de dichtheid van de bebouwing in het beschouwde gebied. Voorgesteld wordt om drie categorieën van omgeving te definiëren:

1. Stedelijk gebied: gebied met stedelijke bebouwing, stapelbouw, industriegebied.
2. Bebouwd gebied: gebied bijvoorbeeld binnen de "bebouwde kom" van dorpen.
3. Onbebouwd gebied: vlak land, bouwland en cultuurland met verspreid voorkomende huizen.

In stedelijk gebied, en in mindere mate in bebouwd gebied, wordt de blootstellingsduur in hoofdzaak bepaald door de tijd die nodig is om een passende schuilgelegenheid te vinden.

In onbebouwd gebied hangt de blootstellingsduur af van de tijd die nodig is om te vluchten tot op een afstand waar het stralingsniveau geen verder letsel meer veroorzaakt.

### 6.4 Literatuurgegevens over blootstellingsduur en vluchtgedrag

Er blijken in de literatuur slechts weinig goed onderbouwde keuzen voor de blootstellingstijd bij straling door brand te worden gegeven. Voor zeer kortdurende branden, zoals de vuurbal ten gevolge van een BLEVE, wordt steeds gekozen voor de brandduur en wordt dus geen rekening gehouden met vluchten en schuilen.

---

In [13] wordt met betrekking tot de blootstellingsduur aanbevolen om voor personen in een stedelijke omgeving een blootstellingsduur van 30 s aan te houden. Voor het overige wordt in [13] er met nadruk op gewezen dat de blootstellingsduur sterk van de heersende omstandigheden afhangt. De keuze wordt overgelaten aan de gebruiker van de modellen, in een voorbeeld wordt aangegeven hoezeer de schadeomvang afhangt van de gekozen blootstellingsduur [13, p.28]. Daaruit volgt dat de schadeomvang (gewonden en doden) volledig wordt bepaald door de blootstellingsduur (toename van de schade met een factor 40 à 50).

Door Hymes [8] wordt in een analyse van het ongeval te Los Alfaques in Spanje aangenomen dat een persoon 5 s nodig heeft om te reageren en daarna in 5 s 30 m aflegt van de vuurhaard af (6 m/s). Deze waarden kunnen beschouwd worden als een zo goed mogelijke schatting.

Gedurende de blootstellingstijd kan een brand verschillende fasen van verbranding doorlopen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een BLEVE waarbij de vuurbal groeit en vervolgens opstijgt en weer uitdooft. De snelheid waarmee de verschillende verbrandingsfasen bij een vuurbal elkaar opvolgen ten opzichte van de reactietijd, heeft invloed op het letsel. Tijdens de reactietijd wordt uitgegaan van letsel aan de voorzijde van de persoon, tijdens het vluchten met letsel aan de achterzijde. In de praktijk lijkt de menselijke reactie op een brandeffect complexer te zijn. Hymes [8] beschrijft een BLEVE die plaatsvond bij Lowell Gas Company te Tewkesbury, Massachusetts in 1972. Eén opmerking die opgenomen is in het boek bevat twee belangrijke aanwijzingen. De brandweermannen leken een kortstondige waarschuwing te hebben gehad voor de komende BLEVE. Aangezien de voorkant van hun kleding onbeschadigd was, maar hun rug wel verbrand was, leken ze vlak voor de BLEVE plots te zijn omgedraaid. Hun gezichten waren echter wel verbrand wat doet vermoeden dat ze de neiging hadden om zich heen te kijken om te zien wat er gebeurde.

In de LPG-Integraalstudie [14] en ook in enkele andere kwantitatieve risicoanalyses wordt een blootstellingsduur van 60 s gehanteerd, ongeacht specifieke omstandigheden. In andere studies wordt ook wel 30 s gehanteerd. De methodiek gehanteerd in [14] leidt tot afstanden groter dan 1000 m waar dodelijk letsel ten gevolge van warmtestraling nog mogelijk kan zijn.

In een analyse van de LPG-ramp in Mexico-City (1984) [15] is geconstateerd dat de grote bebouwingsdichtheid en daarmee gepaard gaande bescherming tegen warmtestraling ertoe heeft geleid dat hooguit tot op één- à tweehonderd meter buiten het zware schadegebied (300 m radius) nog dodelijk letsel ten gevolge van warmtestraling kan zijn opgetreden. In de situatie van Mexico-City is de blootstellingsduur dus aanzienlijk korter dan 60 s.

De keuze van de blootstellingstijd wordt in de geraadpleegde literatuur uitsluitend gebaseerd op "engineering judgement". Het is in risicoanalyses gebruikelijk om, bij gebrek aan gegevens betreffende een parameter, uit te gaan van een pessimistische benadering. Voor de blootstellingsduur betekent dit dat de gekozen blootstellingsduur langer zal zijn dan de redelijkerwijs te verwachten gemiddelde tijdsduur. De gebruikte blootstellingsduren van 30-60 s zijn daarom in veel gevallen een overschatting (zie [14] ten opzichte van [15]).

## 6.5 Bepalen van de effectieve blootstellingsduur

Indien bij de vaststelling van de (globale) blootstellingsduur rekening wordt gehouden met vluchten dan

---

zal in principe ook rekening moeten worden gehouden met een in de tijd variërende (afnemende) stralingsintensiteit. Ter vereenvoudiging kan gebruik worden gemaakt van de volgende (pessimistische) benadering:

de blootstellingsduur is gelijk aan de tijd nodig om te reageren (5s) plus de tijd nodig om op zodanige afstand te geraken dat de stralingsintensiteit niet hoger is dan  $1 \text{ kW/m}^2$ .

De verplaatsingsnelheid bedraagt volgens Hymes [8] 6 m/s. Deze waarde lijkt als gemiddelde aan de hoge kant. Voorgesteld wordt om uit te gaan van een gemiddelde waarde van 4 m/s. Indien de beschouwde blootgestelde groep afwijkt van de gemiddelde samenstelling dan kan gekozen worden voor een andere reactietijd en een andere vluchtsnelheid, zowel in positieve als in negatieve zin. Door het ontbreken van concrete informatie is zo'n afwijkende keuze echter in hoge mate speculatief. In Bijlage 2 wordt een voorbeeldberekening behandeld. Daarbij wordt een uitdrukking afgeleid voor de effectieve blootstellingsduur  $t_{eff}$ , rekening houdend met vluchten. Deze blootstellingsduur is zodanig dat de werkelijke warmtestralingsdosis  $D_s$  kan worden uitgedrukt als

$$D_s = q^{\frac{4}{3}} * t_{eff} \quad (6.1)$$

met

$q$  : de stralingsintensiteit gedurende de reactietijd ( $t_r$ )

$t_{eff}$  : de effectieve blootstellingsduur [s]

$$t_{eff} \cong t_r + \frac{3 x_o}{5 u} \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{u}{x_o} * t_v \right)^{\frac{-5}{3}} \right\} \quad \text{eenheid: [s]} \quad (6.2)$$

met

$x_o$  : de afstand tot het centrum van de brand [m]

$u$  : de vluchtsnelheid [m/s] (= 4 m/s)

$t_c$  : de totale blootstellingsduur ( $t_c = t_r + t_v$ ) [s]

$t_r$  : reactietijd [s] (=5 s)

$t_v$  : vluchttijd ( $t_v = (x_s - x_o)/u$ ) [s]

$x_s$  : afstand van het centrum van de brand tot die positie waarbij de stralingsintensiteit beneden het gevaarsniveau ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) ligt [m]

Door deze benadering wordt de invloed van de omvang van de brand op de blootstellingsduur in rekening gebracht. Bij een brand met een geringere omvang is de af te leggen vluchtweg geringer en zal daarom de stralingsdosis geringer zijn.

In de bovenstaande benadering is geen rekening gehouden met de eventuele mogelijkheden om beschutting te zoeken. Dit effect kan in rekening worden gebracht door  $t_{eff}$  aan een maximum te binden, afhankelijk van de beschouwde omgeving.

In sommige gevallen zal de brand een beperkte tijdsduur hebben. Dit heeft gevolgen voor de te ontvangen stralingsdosis. Dit effect kan ook worden uitgedrukt in de effectieve blootstellingsduur  $t_{eff}$  door in (6.2) voor  $t_c$  de werkelijke brandduur in te vullen als deze korter is dan de vluchttijd, zie Bijlage 2.

## **7 Schade ten gevolge van een wolkbrand ('flash fire')**

### **7.1 Inleiding**

Als gevolg van een ontsnapping van een brandbare stof kan zich een brandbare wolk vormen met zekere afmetingen. Bij ontsteking van deze wolk kunnen significante overdrukken gegenereerd worden of er kan snelle verbranding optreden zonder deze effecten (wolkbrand). In beide gevallen is schade te verwachten ten gevolge van het verbrandingsproces. In de eerste plaats zal materiële schade ontstaan door rechtstreeks vlamcontact binnen de wolk en door warmtestraling. Daarnaast is persoonlijk letsel te verwachten, zowel door direct vlamcontact of door straling als door de effecten van secundaire branden. In het vervolg wordt alleen persoonlijk letsel beschouwd.

### **7.2 Het verloop van een wolkbrand**

Indien na de ontsnapping van een hoeveelheid brandbaar materiaal ontsteking enige tijd uitblijft zal de verbranding van de gevormde gaswolk met grote snelheid verlopen. Indien deze snelheid groot genoeg is kan de vorming van een druk- of schokgolf optreden. Aan de voorwaarden hiervoor wordt aandacht besteed in het hoofdstuk "Gaswolkexplosie" van PGS 2 [1]. Voor de vorming van een druk- of schokgolf is het bovendien nodig dat de wolk of een gedeelte ervan in belangrijke mate gekenmerkt is door opsluiting of door aanwezigheid van obstakels. Als laatste eis kan gesteld worden dat alleen dat deel van de wolk kan bijdragen aan een explosie waar de concentratie zich bevindt tussen de explosiegrenzen van de stof.

Naarmate minder aan bovenstaande eisen is voldaan zal het verbrandingsproces langzamer verlopen en de kans op explosie-effecten kleiner zijn. Maar onafhankelijk daarvan moet rekening worden gehouden met effecten van direct vlamcontact en warmtestraling.

Onder optimale omstandigheden kan de voortplantingssnelheid van het vlamfront vele tientallen meters per seconde bedragen.

Uit de resultaten van een serie experimenten van Lawrence Livermore Laboratory [17] met 40m<sup>3</sup> LNG spills op water volgt dat onder die omstandigheden de voortplantingssnelheid ten opzichte van de wind ca. 7 m/s bedroeg. Rekening houdend met 5 m/s windsnelheid is de absolute snelheid van het vlamfront 2 m/s (tegen de wind) of 12 m/s (met de wind mee). Globaal kan gesteld worden dat de absolute snelheid van het vlamfront 1-10 m/s bedraagt als geen sprake is van vlamversnelling door aanwezigheid obstakels. De resultaten van de Maplin Sands experimenten [18] ondersteunen deze veronderstelling, evenals TNO-experimenten [26].

De vorm van een brandbare gaswolk zal in vrijwel alle gevallen min of meer langgerekt zijn in de windrichting en met een hoogte die kleiner is dan de horizontale afmetingen. De dikte van het verplaatsende vlamfront is afhankelijk van een aantal parameters, zoals de concentratie en de turbulentiegraad in het vlamfront. In het algemeen zal de hoogte enkele meters bedragen.

De bij de verbranding gevormde hete gassen zullen door expansie opstijgen en daardoor zal de vlamhoogte groter zijn dan de wolkhoogte.

Uit het bovenstaande volgt dat een object, dat zich buiten de wolk bevindt, bij ontsteking van de wolk wordt blootgesteld aan warmtestraling afkomstig uit een zich verplaatsend vlamfront.

Objecten binnen de wolk worden gedurende korte tijd blootgesteld aan direct vlamcontact.

---

### **7.3 Persoonlijk letsel door een wolkbrand**

Personen die zich op het moment van ontsteking binnen de wolk en buitenshuis bevinden zullen door het direct vlamcontact tenminste zeer ernstige verwondingen oplopen. Door het directe vlamcontact zullen over grote delen van het lichaam diepe brandwonden worden opgelopen. In [8] wordt aandacht geschonken aan de aard van de verbrandingen ten gevolge van brandende kleding.

In de eerste plaats zullen eventuele vluchtpogingen op het moment van ontsteking van kleding eindigen in pogingen om de brandende kleding te doven. Er is reden om aan te nemen dat het huidoppervlak met ernstige verbrandingen (tweede graad en erger) gelijk is aan het oppervlak verbrande kleding. Er is een Amerikaans onderzoek uitgevoerd in 5 ziekenhuizen, in een periode tussen 1961 en 1966, waar 179 personen werden behandeld voor brandwonden als gevolg van brandende kleding [27]. Hieruit is gebleken dat, in geval de brandwonden zijn ontstaan door brandende kleding, in 40% van de gevallen huidtransplantaties en uitgebreid operatief ingrijpen nodig waren. Slechts in 5% van de gevallen waar de kleding geen vlam vatte was ziekenhuisopname noodzakelijk. Hoewel de resultaten geen bewijs leveren, bieden ze wel een ondersteuning voor de veronderstelling dat als gevolg van het in brand vliegen van de kleding de desbetreffende persoon ernstige tot zéér ernstige brandwonden zal oplopen. Bij ontsteking door een "wolkbrand" mag verwacht worden dat het grootste deel van de kleding zal vlam vatten. De omvang van het verbrande huidoppervlak die daar het gevolg van zal zijn, is waarschijnlijk in de meeste gevallen zo groot dat de blootgestelden zullen overlijden als gevolg van de brandwonden.

De personen die zich op het moment van ontsteking van de gaswolk binnenshuis bevinden zullen niet onmiddellijk worden getroffen door rechtstreeks vlamcontact. De "wolkbrand" zal wel leiden tot secundaire branden op grote schaal. Het zal sterk van de situatie afhangen wat de overlevingskans voor personen binnenshuis zal zijn.

### **7.4 Conclusie**

Als schatting voor de omvang van het persoonlijk letsel door een "wolkbrand" lijkt het redelijk te veronderstellen dat alle personen die zich op het moment van ontsteking binnen de wolk bevinden dodelijk zullen worden getroffen. Dit geldt zowel voor de personen buitenshuis (door direct vlamcontact) als voor de personen binnenshuis (door secundaire branden).

Door de korte blootstellingsduur zal de omvang van het persoonlijk letsel buiten de wolk betrekkelijk gering zijn in relatie tot het letsel binnen de wolk.

---

## Literatuurreferenties

1. PGS 2, Methods for the calculation of physical effects (het "Gele Boek"). (Voorheen CPR 14E, rapport van de Commissie Preventie van Rampen door gevaarlijke stoffen, Sdu Uitgevers, 3e editie 1997.)
  2. Eisenberg, N.A., C.J. Lynch, R.J. Breeding. Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from marine Spills (VM1). US Coast Guard, AD/A-015 245, NTIS rapport no. CG-D-137-75, 1975.
  3. Brandwonden. Uitgave van Philips-Duphar Nederland B.V., Amsterdam, 1979.
  4. A.M. Stoll. Heat transfer in biotechnology, in Advances in Heat Transfer, Vol, 4, Academic Press, New York, 1967, pp. 67-141.
  5. Hardee, H.C., D.J. Lee. A Simple Conduction Model for Skin Burns Resulting from Exposure to Chemical Fireballs. Fire Research, 1, 1977/78, 199-205.
  6. J.B. Perkins, H.E. Pearse and H.D. Kingsley. Studies of flash burns: the relation of time and intensity of applied thermal energy to the severity of burns. The University of Rochester, UR-317, Dec. 1952.
  7. A.M. Stoll and M.A. Chianta. Method and rating system for evaluation of thermal protection. Aerosp. Med., 40 (11), 1969, 1232-1238.
  8. Hymes, I. The physiological and pathological effects of thermal radiation. U.K. Atomic Energy Authority, Safety and Reliability Directorate, Culchetch, Warrington, SRD R 275, 1983.
  9. Glasstone, S., editor. The effects of nuclear weapons. U AEC, april 1962, p. 571.
  10. Tsao, C.K., W.W. Perry. Modifications to the Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills (VM4). US Coast Guard, AD/A-075231, NTIS rapport no. CG-D-38-79, 1979.
  11. Hilado, C.J., Murphy, R.M. Ignition and Flash-fire Studies of Cellulosic Materials. Fire and Materials, vol. 2, no. 4, 1978, 173-176.
  12. Wulff, W. Fabric ignition, Tex. res. J., October 1973.
  13. Rausch, A.H., N.A. Eisenberg, C.J. Lynch. Continuing development of the Vulnerability model (VM2). Department of Transportation United States Coast Guard, Washington D.C., Report no. CG-D-53-17, Feb. 1977.
  14. LPG-Integraalstudie. Vergelijkende risico-analyse van de opslag, de overslag, het vervoer en het gebruik van LPG en benzine. MT-TNO, mei 1983.
  15. Pietersen, C.M. Analysis of the LPG-incident in San Juan IXHUATEPEC, Mexico City, 19 November 1984. MT-TNO, ref. 85-0222, May 1985.
-

16. EFFECTS, the TNO software package for calculation of the physical effects of the escape of hazardous material. Product of MT-TNO dept. of Industrial Safety, Apeldoorn, The Netherlands.
  17. Ermak, D.L., H.C. Goldwire, W.J. Hogan, e.a. Results of 40-m<sup>3</sup> LNG spills onto water. Paper presented at the second symposium on Heavy Gases and Risk Assessment. Battelle-Instituue e.v., Frankfurt, FRG, May 25-26, 1982.
  18. Puttock, J.S., G.W. Colenbrander, D.R. Blackmore. Maplin Sands experiments 1980: Dispersion results from continuous releases of refrigerated liquid propane. Paper presented at the second Symposium on Heavy gases and risk analysis, Frankfurt, May 1982.
  19. Rausch, A.H., C.K. Tsao, R.R. Rowley. Third-stage Development of the Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills (VM3). US Coast Guard, NTIS rapport no. CG-D-5-78, 1978.
  20. Kreyszig, E. Advanced Engineering Mathematics. Wiley and Sons, New York, 1967.
  21. Mitchell, H.H. A general approach to the problem of estimating personnel damage on atom bombed targets. Raud Report, RM-1149, Oct. 12, 1953.
  22. Lie, T.T. Eigenschappen van warmtebeschermd Kleding en Keuringsmethoden. Brand, 1963.
  23. Haffmans, L., P.J. van het Westeinde. TNO-IBBC,rapport B-81-545.
  24. Van Aken, J.A. Beproevingmethode voor op laboratoriumschaal beoordelen van de thermische isolatie van beschermende kleding. TNO-IBBC-rapportnr. B-84-483, april 1984.
  25. Buettner, K. Effects of extreme heat and cold on human skin. I. Analysis of temperature changes caused by different kinds of heat application. II. Surface temperature, pain and heat conductivity in experiments with radiant heat. J. Appl. Phys., Vol 3 (12) (1951), pp. 691-702, 703-713.
  26. Zeeuwen, J.P., C.J.M. van Wingerden, R.H. Dauwe. Experimental investigation into the blast effect produced by unconfined vapour cloud explosions. 4th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries (1983).
  27. Schaplowsky, A.F. Bulletin of the New York Academy of Medicine, 43, no.8, August 1967.
  28. J.C. Lawrence, The mortality of burns, Fire Safety Journal, 17, 1991.
  29. A.M. Stoll en L.C. Green, Relation between pain and tissue damage due to thermal radiation, Journal of Applied Physiology, 14 (1959).
  30. K.S. Mudan, Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires, Prog. Energy Combust.
-

Sci. , 10 (1984)

31. F.P. Lees, The assessment of major hazards: a model for fatal injury from burns., process safety Environ., 72B (1994)
  32. F.P. Lees; Loss prevention in the process industries – hazard identification, assessment and control; second edition 1996
  33. Prugh, R.W., Quantitative evaluation of fireball hazards, Process Safety Prog., 13 (1994)
  34. Roberts, A.F.; The effect of conditions prior to loss of containment on fireball behaviour. The assessment of major hazards, (Rugby: Instn Chem. Engrs), 1982
-



## Symbolenlijst

A	: oppervlak	[m <sup>2</sup> ]
a	: absorptiecoëfficiënt	[-]
a <sub>t</sub>	: temperatuurvereffeningscoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
c	: soortelijke warmte	[J/kg*K]
d	: dikte	[m]
D <sub>s</sub>	: warmtestralingsdosis (ook wel D <sub>sk</sub> , D <sub>sl</sub> )	[s*(W/m <sup>2</sup> ) <sup>n</sup> ]
F	: fractie	[-]
F <sub>k</sub>	: beschermingsfactor ten gevolge van het dragen van kleding	[-]
M	: gewicht	[kg]
n	: exponent in dosis berekeningen	[-]
N <sub>o</sub>	: bevolkingsdichtheid	[m <sup>-2</sup> ]
N <sub>1</sub>	: aantal dodelijke slachtoffers binnen de vuurbal	[-]
N <sub>2</sub>	: idem buiten de vuurbal	[-]
p	: (overlijdens)kans (ook wel p <sub>m</sub> )	[-]
p <sub>ma</sub>	: gemiddelde overlijdenskans	[-]
Pr	: probit	[-]
Q	: warmtehoeveelheid (= warmtestralingsdosis voor n=1)	[J/m <sup>2</sup> ]
q	: (opgenomen) warmtestroom	[W/m <sup>2</sup> ]
q <sub>i</sub>	: invallende warmtestroom	[W/m <sup>2</sup> ]
q <sub>o</sub>	: warmtestralingsintensiteit	[W/m <sup>2</sup> ]
R	: straal van de vuurbal	[m]
r	: afstand tot centrum van de vuurbal	[m]
T	: temperatuur	[K]
t	: tijd	[s]
t <sub>v</sub>	: vluchttijd	[s]
t <sub>c</sub>	: blootstellingstijd (blootstellingsduur)	[s]
t <sub>eff</sub>	: effectieve blootstellingsduur	[s]
t <sub>r</sub>	: reactietijd	[s]
T <sub>o</sub>	: omgevingstemperatuur	[K]
u	: vluchtsnelheid	[m/s]
V	: volume	[m <sup>3</sup> ]
x	: afstand (penetratiediepte)	[m]
x <sub>o</sub>	: initiële afstand tot centrum van de brand	[m]
x <sub>s</sub>	: afstand vanaf het centrum van de brand tot die positie waarbij het stralingsniveau beneden de 1 kW/m <sup>2</sup> ligt	[m]
x <sub>v</sub>	: veilige afstand	[m]
α	: coëfficiënt voor convectieve warmteoverdracht	[W/m <sup>2</sup> K]
<b>d</b>	: brandwonddiepte	[mm]
Δ	: verhouding N <sub>2</sub> /N <sub>1</sub>	[-]
ζ	: r/R	[-]
λ	: warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m*K]
ρ	: soortelijke massa	[kg/m <sup>3</sup> ]
σ	: constante van Stephan Boltzman	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]

## Bijlage 1: Dodelijk letsel buiten een vuurbal of een plasbrand door warmtestraling

De probitfunctie Pr voor dodelijk letsel zonder invloed van de beschermende werking van kleding is (zie paragraaf 3.5):

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln (t \cdot q^{\frac{4}{3}}) \quad (A.1)$$

met

t: blootstellingsduur [s]  
q: stralingsniveau [W/m<sup>2</sup>]

Met verwaarlozing van de demping van warmtestraling door waterdamp in lucht volgt q uit:

$$Q = q_o * 4pR^2$$

$$q = \frac{Q}{4pR^2} \quad (A.2)$$

$$q = \left(\frac{R}{r}\right)^2 * q_o$$

met:

q<sub>o</sub> : het oppervlaktestralingsniveau [kW/m<sup>2</sup>]  
R : de straal van de vuurbal [m]  
r : de afstand [m]

Als het aantal aanwezigen homogeen over het oppervlak verdeeld is dan is het aantal dodelijke slachtoffers binnen de vuurbal:

$$N_1 = N_o * pR^2 \quad (A.3)$$

met:

N<sub>o</sub> : de bevolkingsdichtheid [1/m<sup>2</sup>]  
πR<sup>2</sup>: grondoppervlak bedekt door de vuurbal [m<sup>2</sup>]

Het aantal dodelijke slachtoffers buiten de vuurbal N<sub>2</sub> volgt uit:

$$\Delta N_2(r) = p(r) * N_o * \Delta A$$

p = fractie dodelijke slachtoffers (functie van de afstand)  
N<sub>o</sub> = (homogene) bevolkingsdichtheid [1/m<sup>2</sup>]  
ΔA = oppervlakte cirkel segment op afstand r [m]

Het totale aantal dodelijke slachtoffers wordt gevonden door integratie:

$$N_2 = \int_R^{\infty} p(r) * N_o * 2pr dr \quad (A.4)$$

---

Het verband tussen de probitfuncties en het percentage dodelijk letsel ( $p$ ) wordt weergegeven door (zie ook tabel 3.1):

$$p = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\operatorname{Pr}-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{A.5})$$

Combinatie van (A.5) (A.4) en (A.1) geeft een uitdrukking voor het aantal slachtoffers door warmtestraling. Door combinatie van (A.4) met (A.3) volgt een uitdrukking voor het aantal slachtoffers buiten de wolk gerelateerd aan het aantal binnen de wolk.

$$\Delta = \frac{N_2}{N_1} = \int_R^\infty p(r) * 2 \left( \frac{r}{R} \right) d \left( \frac{r}{R} \right)$$

$$\Delta = \int_1^\infty p(z) * 2z dz \quad (\text{A.6})$$

met  $z = r/R$

N. B.:  $p = f(q)$   
 $q = q_0/z^2$  (zie A.2)

Dus de parameter  $z$  in  $p$  is op eenvoudige wijze ingebracht door substitutie van de factor  $(r/R)$ .

In Figuur A.1 is aan de rechterzijde van de grafiek de integrand van (A.6) uitgezet tegen  $z$  (voor  $q_0 = 190 \text{ kW/m}^2$  en  $t = 10\text{s}$ ). Voor deze situatie geldt dat ofwel dat buiten de vuurbal circa vijfmaal zoveel dodelijke slachtoffers door warmtestraling zullen vallen.

Doordat bij een plasbrand  $q_0$  veel kleiner is (b.v.  $90 \text{ kW/m}^2$ ) is de afstand tot waar dodelijk letsel kan optreden kleiner. Als voorbeeld wordt een plasbrand van (gekoeld) propaan met een straal van 50 m beschouwd met een blootstellingsduur van 10s. Voor deze situatie volgt op soortelijke wijze als voor de vuurbal dat

$$\Delta \cong 2$$

ofwel dat buiten de plasvorming circa tweemaal zoveel dodelijke slachtoffers zullen vallen als daarbinnen.

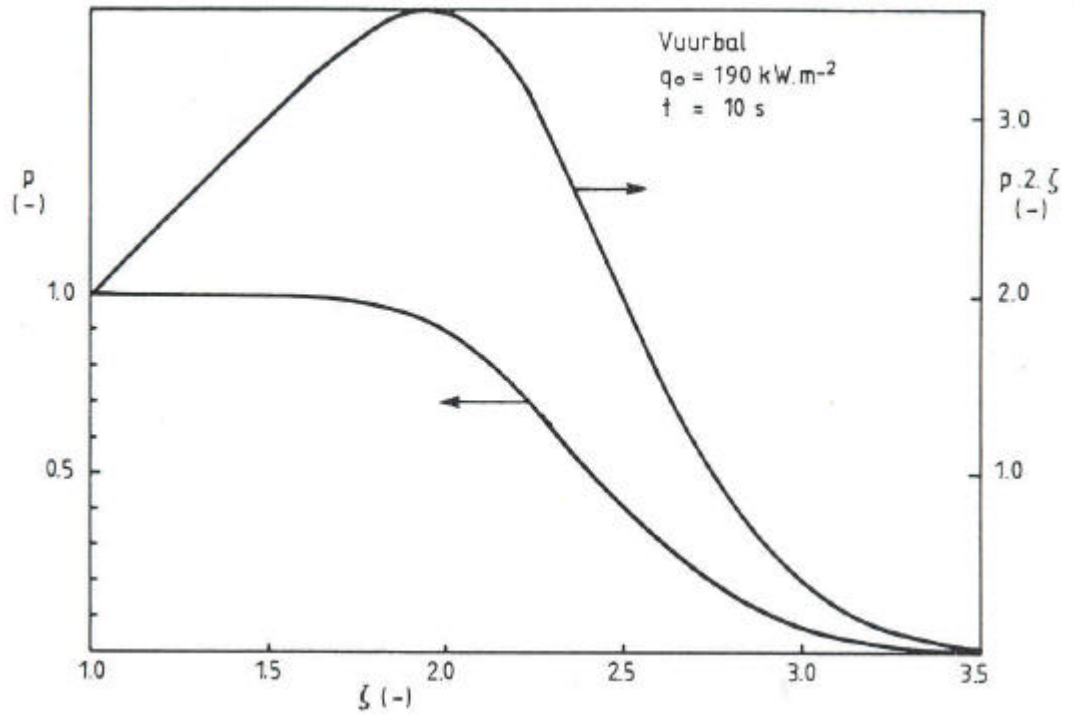
De gemaakte aannames zijn:

Er is geen expliciet rekening gehouden met de beschermende werking van kleding.  
 de vuurbal is ontstaan in het vrije veld; met andere woorden er zijn geen beschuttingsmogelijkheden.  
 de bevolkingsdichtheid is homogeen verdeeld. - binnen de vuurbal is de letaliteit 100%.

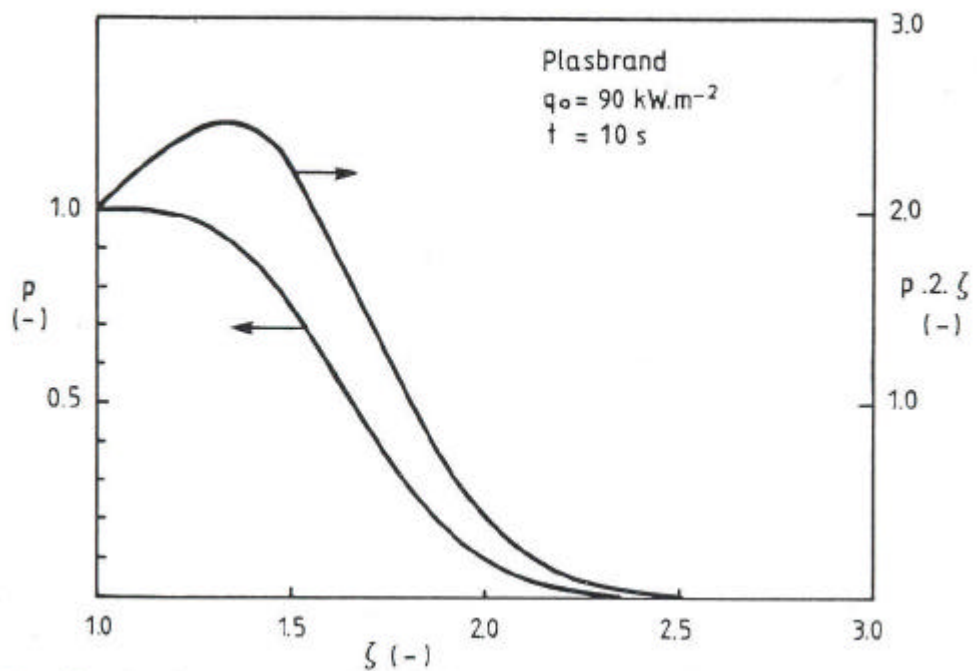
N.B..

$\Delta$  is per definitie gelijk aan het oppervlak onder de curve.

2.p.z is in feite voor elke afstand de verhouding tussen het aantal slachtoffers op die afstand en het aantal slachtoffers binnen de vuurbal.



Figuur A1: De kans op dodelijk letsel door warmtestraling van een vuurbal.



Figuur A2: de kans op dodelijk letsel door warmtestraling van een plasbrand

## Bijlage 2: Voorbeeldberekening blootstellingsduur

In tabel B.1 zijn de resultaten van effectberekeningen met behulp van "Effects" (gebaseerd op modellen uit PGS 2 [1]) weergegeven voor een plasbrandscenario.

Gevraagd: De blootstellingsduur voor iemand die zich bij het begin van de brand op circa 40 m vanaf het centrum van de plas bevindt (10-15 m vanaf de rand).

De plas is voor de ontsteking ontstaan, door bijvoorbeeld het leegstromen van een vat, en wordt verondersteld een vaste afmeting van 55 m te hebben.

Tabel B.1 : Resultaten van een plasbrandberekening met "Effects" [16].

Berekeningsmodel : warmtestraling  
 Component: ISOBUTYLENE  
 Omgevingstemperatuur = 293 (K)  
 Diameter plas = 55 (m)  
 Stralingsintensiteit = 86,0 (kW/m<sup>2</sup>)  
 Relatieve vochtigheid = 90 (Z)

The warmtebelasting is berekend vanaf de rand van de plas.

Afstand (m)	Warmtebelasting Q (kW/m <sup>2</sup> )		
	Q hor,	Q vert,	Q max,
3	28,9	36,2	46,3
6	23,3	31,2	38,9
8	19,8	27,7	34,1
11	17,3	25,1	30,5
14	15,3	22,9	27,6
28	9,4	15,9	18,4
55	4,3	9,1	10,1
83	2,2	5,8	6,2
110	1,2	3,9	4,1
248	0,2	1,0	1,0
385	0,0	0,4	0,4
523	0,0	0,2	0,2

Op 247 m ( $x_s$ ) vanaf de plasrand bedraagt de stralingsintensiteit 1 kW/m<sup>2</sup>. De af te leggen vluchtafstand is  $(x_s - x_o) = (247 \text{ m} - 11 \text{ m}) = 235 \text{ m}$ . De benodigde tijd daarvoor is

$$t_v = \frac{x_s - x_o}{u} = \frac{235 \text{ m}}{4 \text{ m/s}} \cong 80 \text{ s}$$

Rekening houdend met een reactietijd  $t_r = 5 \text{ s}$  bedraagt de totale blootstellingsduur  $t_c = (t_r + t_v) = 85 \text{ s}$ .

De totale stralingsdosis kan als volgt worden bepaald.

Beschouw een persoon op een afstand  $x_o$  vanaf het centrum van een brand.

Het stralingsniveau ter plaatse is  $q$ . De stralingsintensiteit als functie van de afstand kan globaal worden uitgedrukt als:

$$q(x) = q_o * \left( \frac{x_o}{x} \right)^2 \quad (\text{B.3})$$

De stralingsintensiteit die een vluchtend persoon vanaf  $x = x_o$  op tijdstip  $t$  (vanaf het begin van de blootstelling) ondervindt is:

$$q(t) = q_o \left( \frac{x_o}{x_o + u * (t - t_r)} \right)^2 \quad (\text{B.4})$$

(Rekening houdend met reactietijd  $t_r = 5\text{s}$ .)

Tijdens de reactietijd is de stralingsintensiteit constant omdat de locatie van de blootgestelde persoon ten opzichte van de brand dan niet wijzigt.

De totale stralingsdosis kan worden uitgedrukt als:

$$\begin{aligned} D_s &= D_s(t_r) + \bar{D}_s(t_v) \\ &= q_o^{\frac{4}{3}}(t_r) + \int_{t=t_r}^{t_c} q(t)^{\frac{4}{3}} * dt \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} \left[ t_r + \frac{3 x_o}{5 u} \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{u}{x_o} [t_c - t_r] \right)^{\frac{-5}{3}} \right\} \right] \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} (t_r + t_{v,eff}) \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} * t_{eff} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

N.B.  $\bar{D}_s$  = gemiddelde stralingsdosis

Invullen van de waarden  $q_o$ ,  $x_o$ ,  $u$ ,  $t_r$  en  $t_c$  geeft voor dit voorbeeld:

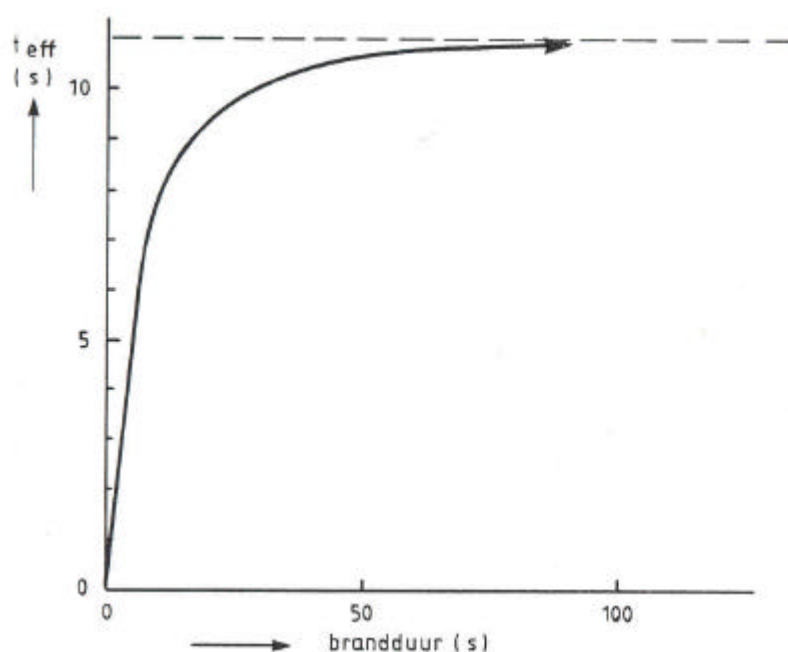
$$t_{eff} \cong 11\text{s}$$

$$D_s = (3 * 10^4)^{\frac{4}{3}} * 11 * \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \text{s} \cong 10^7 \left( \frac{W}{m^2} \right)^{\frac{4}{3}} * \text{s}$$

Als de brandduur korter is dan de vluchtduur, bijvoorbeeld ingeval van een BLEVE, dan kan voor  $t_c$  de brandduur worden ingevuld. Stel dat in bovenstaand voorbeeld de brandduur 40s bedraagt dan is:

$$t_{\text{eff}} \cong 5 + \frac{3}{5} \frac{x_o}{u} \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{u}{x_o} (40 - 5) \right)^{-\frac{5}{3}} \right\} = 10,5s$$

Bij een brandduur van 20s is  $t_{\text{eff}} \cong 9,5s$  en bij 10s is  $t_{\text{eff}} \cong 8s$ , zie Figuur B.2. Voor dit voorbeeld volgt dat de effectieve blootstellingsduur (en daarmee de stralingsdosis) niet sterk meer toeneemt als de brandduur  $\geq 1/2$  de berekende vluchttijd.



**Figuur B.2: Effectieve blootstellingsduur als functie van de brandduur. Beschouwing met betrekking tot de vluchttijd (zie hoofdstuk 6)**

In zogenaamd "stedelijk gebied" met dichte bebouwing is de blootstellingstijd  $\Delta t$  op 10 s gesteld:

Met:

$$\Delta t = t_r + t_v \quad t_r = \text{reactie tijd}$$

$$t_v = \frac{x_v}{u} \quad t_v = \text{vluchttijd}$$

$$t_r = 5 \text{ s} \quad x_v = \text{veilige afstand}$$

$$u = 4 \text{ m/s} \quad u = \text{loopsnelheid}$$

Dit betekent dat de schuilgelegenheden zich gemiddeld op ongeveer 20 m afstand bevinden van het potentiële slachtoffer. Omdat dit een relatief kleine afstand is, mag er van worden uitgegaan dat de stralingsintensiteit tijdens het vluchten niet merkbaar veranderd. Tevens mag er niet van worden

uitgegaan dat de geschikte schuilplaatsen zich bevinden in de richting van de vlam af, zodat naar alle richtingen gemiddeld de intensiteit constant is.

In het geval er sprake is van een vrije vluchtweg, in zogenaamd "onbebouwd gebied" dan is er geen sprake van schuilmogelijkheden en vlucht men altijd in de richting weg van de vlam. Tijdens het vluchten naar een voldoende grote (veilige) afstand tot het centrum van de vlam, zal de stralingsintensiteit afnemen. Deze afname is verdisconteerd om de effectieve blootstellingsduur:

$$\begin{aligned} D_s &= q_o^{\frac{4}{3}} * (t_r + t_{v,eff}) \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} * t_{eff} \end{aligned}$$

Voor het zogenaamde "bebouwde gebied" ligt de zaak niet zo eenvoudig als de bovengenoemde gebieden, in feite de twee uiterste situaties.

De bedreigde aanwezigen zullen steeds individueel moeten uitmaken of wegrennen van de vlam af of dekking zoeken de voorkeur heeft. Ten aanzien van de schatting van het aantal slachtoffers, moet eerst een indruk zijn verkregen met betrekking tot de gemiddelde afstand tussen de bebouwingen; wellicht is op voorhand een afstand van 50 meter een redelijke keuze.

Dit houdt in dat  $t_v \approx 50/u \approx 13$  s, en inclusief een reactie tijd ( $t_r$ ) van 5 s, resulteert dit in een totale blootstellingstijd ( $t_c$ ) van 18 s.

Er van uitgaande dat bij open bebouwing de meeste mensen de neiging zullen hebben zich van de vlam af te bewegen, ligt het voor de hand een effectieve blootstellingstijd te berekenen op, basis van de hier gegeven blootstellingstijd.

$$\begin{aligned} D_s &= D_s(t_r) + \overline{D}_s(t_v) && (t_v = t_c - t_r) \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} * t_{eff} \\ &= q_o^{\frac{4}{3}} * \left( t_r + \frac{3}{5} * \frac{x_o}{u} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{u}{x_o} [t_c - t_r] \right) \right] \right) \end{aligned}$$

(met  $u = 4$  m/s,  $t_c = 18$  s en  $t_r = 5$  s)