

Kampweg 5  
Postbus 23  
3769 ZG Soesterberg

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T 0346 356 211  
F 0346 353 977  
Info-DenV@tno.nl

## TNO-rapport

**TNO-DV3 2006 C024**

### Veilige stralingscontouren bij incidenten - gerelateerd aan warmtebelasting voor hulpverleners

Datum	april 2006
Auteur(s)	dr. E.A. den Hartog, drs. R. Heus
Opdrachtgever	Brandweer Rotterdam
Projectnummer	013.75204
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Titel	Ongerubriceerd
Samenvatting	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Bijlagen	Ongerubriceerd
Aantal pagina's	21 (incl. bijlage)
Aantal bijlagen	1

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

## Veilige stralingscontouren bij incidenten - gerelateerd aan warmtebelasting voor hulpverleners



### Probleemstelling

Brandweer Rotterdam hanteert stralingscontouren om de veiligheid van hulpverleners te garanderen tijdens een inzet bij risicovolle bedrijven in het havengebied. De stralingscontouren geven de grenzen aan waarbinnen men zonder gevaar kan opereren, afhankelijk van de beschermingsmiddelen die worden gebruikt. Brandweer Rotterdam hanteert deze stralingscontouren bij het opstellen van aanwijzingen ten behoeve van de bedrijfsbrandweren en bij het adviseren met betrekking tot milieuvergunningen. TNO Defensie en Veiligheid, locatie Soesterberg is gevraagd om met behulp van het doorrekenen van een aantal scenario's te

bepalen of de stralingscontouren realistisch zijn. De hoofdvraag van deze modelstudie luidt uiteindelijk: 'Hoe rechtvaardig zijn de huidige stralingscontouren, die gebruikt worden als veiligheidszones voor brandweer en overige hulpverleners?'

### Beschrijving van de werkzaamheden

Het bij TNO aanwezige computermodel THDYN (Thermal physiology Dynamics), is gebruikt om voor de verschillende scenario's een schatting te maken van de warmtebelasting en daarmee de maximale inzetduur van de hulpverleners te bepalen op basis van de lichaamstemperatuur.

Cruciale inputparameters in THDYN, omgeving (luchttemperatuur en stralingswarmte), fysieke inspanning en kleding zijn gevarieerd om op die manier in totaal ruim 1100 verschillende varianten te onderzoeken. Er zal voor verschillende stralingsniveaus (1, 1,5, 2 en 3 kW/m<sup>2</sup>) worden aangegeven waar de beperking voor de hulpverleners zit.

### Resultaten en conclusies

De stralingscontouren 1 en 1,5 kW/m<sup>2</sup> laten geen beperkingen zien met betrekking tot de inzetduur. Bij een combinatie van hogere luchttemperaturen en inspanningsniveau wordt de inzet beperkt, maar niet als gevolg van omgevingsomstandigheden of beschermende kleding. Bij 2 kW/m<sup>2</sup> is het duidelijk dat beschermende kleding voor brandbestrijding de voorkeur verdient boven standaard operatorskleding. Bij het hoogste stralingsniveau van 3 kW/m<sup>2</sup> is beschermende kleding voor brandbestrijding een noodzaak. Zonder deze kleding zou de inzetduur zeer beperkt zijn en is de kans op huidschade nadrukkelijk aanwezig.

### Toepasbaarheid

De resultaten van het onderzoek kunnen gebruikt worden om aan te geven waarom stralingscontouren belangrijk zijn om verantwoord hulpverleners in te zetten bij risicovolle incidenten op industriële complexen.

## Veilige stralingscontouren bij incidenten - gerelateerd aan warmtebelasting voor hulpverleners

### Contact en rapportinformatie

PROGRAMMA	PROJECT
<b>Programmabegeleider</b> -	<b>Projectbegeleider</b> M. Nijssen, Brandweer Rotterdam
<b>Programmaleider</b> -	<b>Projectleider</b> R. Heus, TNO Defensie en Veiligheid
<b>Programmatitel</b> -	<b>Projecttitel</b> Brandweer Rotterdam: Contouren
<b>Programmanummer</b> -	<b>Projectnummer</b> 013.75204
<b>Programmaplanning</b> -	<b>Projectplanning</b> Start 01-12-2005 Gereed 01-02-2006
<b>Toezichthouder</b> -	
<b>Frequentie van overleg</b> Met de programma/projectbegeleider werd drie maal gesproken over de invulling en de voortgang van het onderzoek.	<b>Projectteam</b> dr. E.A. den Hartog drs. R. Heus

Kampweg 5  
Postbus 23  
3769 ZG Soesterberg

T 0346 356 211  
F 0346 353 977

[Info-DenV@tno.nl](mailto:Info-DenV@tno.nl)

**TNO-rapportnummer**  
TNO-DV3 2006 C024

**Oprachtnummer**  
-

**Datum**  
april 2006

**Auteur(s)**  
dr. E.A. den Hartog, drs. R. Heus

**Rubricering rapport**  
Ongerubriceerd

## Samenvatting

### Inleiding

Brandweer Rotterdam Rijnmond hanteert zogeheten stralingscontouren ter bepaling van zones met verschillende risiconiveaus in geval van brand op een industrieel complex. Deze stralingscontouren zijn momenteel 3 kW/m<sup>2</sup> voor de hulpverleners gekleed in beschermende kleding voor brandbestrijding en 1 kW/m<sup>2</sup> voor alle overige hulpverleners. Aan TNO Defensie en Veiligheid (D&V) is gevraagd om aan te geven of deze contouren redelijk zijn of dat aanpassing gerechtvaardigd is. In deze studie is vooral gekeken naar de opwarming van het menselijk lichaam op verschillende niveaus van de hittestraling, met kleding, omgevingstemperatuur en inspanning als variabelen.

De hoofdvraag van deze modelstudie luidt: 'Hoe rechtvaardig zijn de huidig gebruikte stralingscontouren, die gebruikt worden als veiligheidszones voor hulpverleners gekleed in beschermende uitrusting voor brandbestrijding en BHV'ers gekleed in standaard operator's kleding'.

### Methode

Het bij TNO Defensie en Veiligheid aanwezige computermodel THDYN (Thermal physiology Dynamics), is gebruikt om voor verschillende scenario's de warmtebelasting in te schatten en daarmee de inzetduur van de hulpverleners te bepalen. De warmtebelasting van mensen is het resultaat van klimaatbelasting, kleding, inspanning en persoonlijke factoren. Kleding voor brandweermensen ligt goeddeels vast. Tijdens brandbestrijdingsactiviteiten op een industrieel complex vormt de stralingswarmte de grootste belasting. Voor de overige hulpverleners geldt dat kleding sterk kan variëren en op voorhand geen kleding voor brandbestrijding hoeft te zijn. Voor de isolatiewaarden die gebruikt zijn in de modelberekeningen is gebruikgemaakt van informatie die is opgedaan met de moderne brandweerkleding in voorgaande projecten. Door luchttemperatuur, stralingswarmte, fysieke inspanning en kleding als invoerparameters voor THDYN te variëren zijn 1296 verschillende scenario's gesimuleerd. Er is voor de vier meest relevante stralingsniveaus (1, 1,5, 2 en 3 kW/m<sup>2</sup>) aangegeven waar de beperking voor de hulpverleners zit.

### Resultaten

Bij een stralingscontour van 1 kW/m<sup>2</sup> geeft het model bij lage inspanning geen beperking voor de inzetduur, bij toenemende inspanning komt er een beperking. Op het hoogste arbeidsniveau (300 W/m<sup>2</sup>) begint de beperking te komen vanaf circa 18 °C, wat normaal is voor deze zware inspanning. Bij een stralingscontour van 1,5 kW/m<sup>2</sup> wordt grotendeels hetzelfde beeld gezien, maar de maximale inzet wordt dan verder beperkt door de inspanning. Al bij matige inspanning komt er in de zomer (boven de 20 °C) een beperking en moeten mensen bewaakt worden.

Bij 2 kW/m<sup>2</sup> beginnen we een duidelijk voordeel te zien van isolerende (brandweer)kleding. In dit gebied lijkt het niet verstandig om nog mensen toe te laten die dergelijk kleding niet dragen. Ook zal dit stralingsniveau bij onbedekte huid een waarschijnlijk risico gaan geven op huidschade. Het THDYN model in zijn huidige vorm geeft over huidverbranding zonder aanpassingen geen uitsluitel en daarom is huidverbranding in deze studie buiten beschouwing gelaten.

Bij 3 kW/m<sup>2</sup> is het duidelijk dat beschermende kleding noodzaak is. In dit stralingsgebied is inzet zonder beschermende brandweerkleding onmogelijk. Bij toenemende inspanningsniveaus (matig tot zwaar) wordt de inzetduur beperkt tot ongeveer 20 minuten.

**Conclusie**

Op basis van de berekeningen van het THDYN model is er geen directe reden om de gebruikte veiligheidscontouren voor brandbestrijding, van  $3 \text{ kW/m}^2$  voor hulpverleners in brandweerkleding en  $1 \text{ kW/m}^2$  voor overige hulpverleners te wijzigen. Deze contouren geven een inzetgebied aan dat verantwoord is voor de hulpverleners. Er zijn mogelijkheden om de contour voor overige hulpverleners te verleggen van  $1 \text{ kW/m}^2$  naar  $1,5 \text{ kW/m}^2$ , mits er onder warme omstandigheden, zoals in de zomer, rekening gehouden wordt met de eisen aan het werken onder warme omstandigheden en extra medische bewaking van het personeel mogelijk is.

## Summary

### Introduction

The fire fighters organization of Rotterdam Rijnmond utilizes so-called Radiation-contours to determine safety zones with relation to fires on industrial complexes. These radiation-contours are currently  $3 \text{ kW/m}^2$  for fire fighters and  $1 \text{ kW/m}^2$  for other emergency responders. TNO Defense, Security and Safety was requested to indicate whether these values are reasonable or need changing. In this study the heat strain to the human body, as imposed by different levels of radiative heat was investigated, with the factors, clothing, air temperature and exercise levels as variables.

The main question in this study was: How justifiable are the radiation-contours currently used to determine safety zones for fire fighters in protective clothing and other emergency responders that have no special protective clothing.

### Methods

The computer model THDYN (Thermal physiology Dynamics) that is in use with TNO Defense, Security and Safety, was utilized to simulate the heat strain in various scenarios and thus estimate the tolerance time for emergency responders. The heat strain of humans results from factors such as climate, clothing, exercise and individual variables. The clothing for fire fighters is largely fixed. During the fighting of a large industrial fire the radiation imposes the largest heat stress. Other emergency responders have clothing that may largely vary in properties and may not provide flame and heat protection. Insulation values used in the simulations were obtained from previous projects on fire fighter clothing. Varying climate (air temperature, radiative heat), exercise levels and clothing insulation as input parameters to THDYN, 1296 different scenarios have been simulated. For the four most relevant scenarios of radiative heat ( $1, 1.5, 2$  en  $3 \text{ kW/m}^2$ ) the limitations to emergency responders have been indicated.

### Results

At a radiation-contour of  $1 \text{ kW/m}^2$  the model predicts no limitations to work at low levels of exercise. At higher exercise levels limitations do come up. At the highest exercise level ( $300 \text{ W/m}^2$ ) work duration limitations appear at air temperature above  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , which is quite typical at this exercise level. At the radiation-contour of  $1.5 \text{ kW/m}^2$  similar results are obtained, but the maximal duration is further limited at higher exercise levels. Already at moderately high exercise levels (above  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) work duration limitations appear and personnel need to be monitored.

At  $2 \text{ kW/m}^2$  the advantage of having protective clothing becomes apparent. At these radiation levels it is no longer prudent to allow people without protective clothing. At these radiation levels risk on burn injuries on unprotected skin will become relevant. The current version of the THDYN model does not allow for prediction on local skin temperatures and this issue was not considered further in this study.

At  $3 \text{ kW/m}^2$  protective clothing is clearly necessary. At this radiation-contour working without protective clothing is impossible. At moderate to high exercise levels the work duration is limited to 20 minutes.

### Conclusion

Based on the THDYN simulations, there is no direct reason to change the radiation-contours of  $3 \text{ kW/m}^2$  for fire fighters or  $1 \text{ kW/m}^2$  for other emergency responders.

These radiation-contours indicate a safety area in which it is reasonable to operate.

There are possibilities to move the  $1 \text{ kW/m}^2$  contour for other emergency responders up

to 1.5 kW/m<sup>2</sup>. Such an action would require medical monitoring and surveillance of emergency responder personnel under warm climatic conditions, like in summer, to limit work durations if necessary.

# Inhoudsopgave

	<b>Managementuittreksel.....</b>	<b>2</b>
	<b>Samenvatting.....</b>	<b>4</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Methode .....</b>	<b>10</b>
2.1	Kleding .....	11
<b>3</b>	<b>Resultaten .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Discussie.....</b>	<b>16</b>
4.1	De contouren.....	16
4.2	Huidtemperatuur .....	16
4.3	Individuele verschillen.....	16
4.4	Aanbevelingen .....	17
<b>5</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening.....</b>	<b>20</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Technische bijlage - Gebruikte invoer voor THDYN	



# 1 Inleiding

Brandweer Rotterdam Rijnmond hanteert zogeheten stralingscontouren ter bepaling van zones met verschillende risiconiveaus in geval van brand op een industrieel complex. Deze stralingscontouren zijn momenteel  $3 \text{ kW/m}^2$  voor de hulpverleners gekleed in beschermende kleding voor brandbestrijding en  $1 \text{ kW/m}^2$  voor alle overige hulpverleners die niet beschikken over brandweerkleding, zijnde operators die BHV'er zijn.

Aan TNO Defensie en Veiligheid (D&V) is gevraagd om aan te geven of deze contouren redelijk zijn of dat aanpassing gerechtvaardigd is. Hiervoor is het bij TNO D&V ontwikkelde THDYN (Thermal physiology Dynamics) model (Lotens, 1993) gebruikt dat de warmtewisseling van het menselijk lichaam plus kleding berekent onder verschillende omgevingscondities en inspanningsniveaus. De factoren kleding, temperatuur, stralingsintensiteit en inspanning beïnvloeden de inzetduur onder warme omstandigheden. In deze studie is vooral gekeken naar de opwarming van het menselijk lichaam op verschillende niveaus van de hittestraling. Daarbij zijn de eerder genoemde factoren kleding, omgevingstemperatuur en inspanning op ieder stralingsniveau gevarieerd om een indruk te krijgen wat het effect van de hittestraling is op de inzet van hulpverleners onder een reeks verschillende omstandigheden, de zogenaamde scenario's.

Met het model THDYN zijn deze scenario's doorgerekend voor de toename in de kerntemperatuur van het lichaam. Een toename van de temperatuur van de kern van het lichaam tot  $38,5 \text{ }^\circ\text{C}$  is hier als afbreekcriterium gesteld om de hulpverleningsactiviteiten te staken. Een dergelijke kerntemperatuur geeft aan dat er een opwarming van het lichaam plaats vindt die het menselijk prestatievermogen mogelijk negatief beïnvloedt. Een veilige inzet, vooral voor langere duur, gaat uit van een kerntemperatuur die niet zo hoog oploopt. Een inzetbeperking zou ook kunnen plaatsvinden doordat de huidtemperatuur te hoog wordt ( $> 42 \text{ }^\circ\text{C}$ ), waardoor huidverbranding kan ontstaan (Heus, 1994). In de berekeningen is die factor daarom niet meegenomen, deels omdat dat gebeurt bij hogere waarden van de hittestraling en dus bij nog kortere inzetten en deels omdat het THDYN model minder geschikt is voor een dergelijke toepassing, omdat het in de huidige vorm niets zegt over lokale huidtemperaturen. Met aanpassingen zou het mogelijk zijn geweest lokale huidtemperaturen te berekenen, maar het werd in deze context als minder relevant geacht.

De hoofdvraag van deze modelstudie luidt uiteindelijk: 'Hoe rechtvaardig zijn de huidig gebruikte stralingscontouren, die gebruikt worden als veiligheidszones voor hulpverleners gekleed in beschermende uitrusting voor brandbestrijding en BHV'ers gekleed in standaard operator's kleding'.

## 2 Methode

Het bij TNO D&V aanwezige en gevalideerde computermodel THDYN, is gebruikt om voor verschillende scenario's de warmtebelasting van hulpverleners in te schatten en daarmee de inzetduur van die hulpverleners te bepalen. De warmtebelasting van mensen is het resultaat van klimaatbelasting (temperatuur, straling, vochtigheid en wind), kleding, inspanning en persoonlijke factoren (acclimatisatie en getraindheid) en al deze factoren dienen als input voor het simulatiemodel. Bij de hulpverleners in brandbestrijdings-uitrusting (=brandweermensen) liggen de kleding en het inspanningsniveau goeddeels vast. De persoonlijke factoren kunnen sterk verschillen, bij de brandweer vooral in getraindheid. Tijdens brandbestrijdingsactiviteiten vormt de klimaatbelasting de grootste belasting. Bij een incident op een industrieel complex zijn dat de stralingswarmte van de (brandende) bron en het buitenklimaat, dat in Nederland sterk kan variëren. Voor de overige hulpverleners (BHV'ers in operator's kleding) moet men er van uit gaan dat deze over verschillende typen kleding beschikken. Deze kleding zal op voorhand niet brandwerend hoeven zijn en is in het bereik van normale kleding zoals mensen deze op het werk dragen. Nadere informatie rond het gebruik van THDYN voor brandweertoepassingen is te vinden in de rapportage 'Inzettijd Brandweerlieden' (Den Hartog e.a. 2001).

Tabel 1 Gevarieerde parameters bij het berekenen van de mogelijke scenario's.

Metabolisme [W/m <sup>2</sup> ] (inspanningsniveau)	Luchttemperatuur [°C]	Kleding (1) heat transfer coëfficiënt buitenlaag [W/m <sup>2</sup> K] (2) Totale kledingisolatie [clo]	Stralingswarmte [W/m <sup>2</sup> ]
100 (zeer lichte arbeid)	10	(1) 4,0 (2) 2,0	0
140 (lichte arbeid)	14	(1) 8,0 (2) 1,2	500
185 (matige arbeid)	18	(1) 12,0 (2) 0,89	1000
220 (matige – zware arbeid)	22	(1) 16,0 (2) 0,76	1500
260 (zware – zeer zware arbeid)	26		2000
300 (zeer zware arbeid)	30		2500
			3000
			3500
			4000
6 condities	6 condities	4 condities	9 condities
In totaal 1296 condities gesimuleerd			

In tabel 1 zijn de verschillende waarden gegeven die bovengenoemde parameters gegeven zijn om de verschillende scenario's door te rekenen.

**Stralingswarmte:** Deze spreekt voor zich, om een volledig beeld te krijgen is het effect van deze factor berekend van 0 tot 4000 W/m<sup>2</sup> met stappen van 500 W/m<sup>2</sup>. Ter illustratie op een mooie zomerdag is de straling van de zon ongeveer 800 W/m<sup>2</sup>.

**Metabolisme:** Voor de warmtebelasting van de mens is de eigen warmteproductie cruciaal, deze hangt af van het inspanningsniveau van de persoon. De waarden in de tabel komen overeen met waarden uit de literatuur en normen (ISO 9886), enigszins aangepast om gelijke stapgrootte (40W/m<sup>2</sup>) tussen de waarden te krijgen.

**Luchttemperatuur:** Voor incidenten in de buitenlucht maakt het bij een langdurige inzet uit wat het buitenklimaat is. Om een goede indruk te krijgen is hier alleen de factor buitenluchttemperatuur meegenomen. Daarnaast is de relatieve vochtigheid ook relevant, maar deze zal het effect van temperatuur alleen enigszins verschuiven.

**Kleding:** De kleding van brandweermensen en anderen verschilt nogal, in paragraaf 2.1 is hier nader aandacht aan besteed.

## 2.1 Kleding

Voor de berekeningen is de isolatie van de kleding van groot belang. Bij de modelberekeningen is gebruikgemaakt van informatie die is opgedaan met de moderne brandweerkleding die bij TNO getest is in diverse projecten (bijvoorbeeld: Heus e.a., 2000, Den Hartog, 2001). Bij de simulatie wordt de brandweerkleding gedragen op normale (korte) katoenen onderkleding. De isolatie van een brandweerpak zelf is gemiddeld 1 tot 1,5 clo (0.155 m<sup>2</sup> K/W tot 0.233 m<sup>2</sup>K/W). Daarbij kunnen de waarden voor de onderkleding verschillen en zijn er verschillen tussen pakken. Al met al zal de totale isolatie van het brandweerkleding pakket liggen tussen de waarden 1,2 clo en 2 clo uit tabel 1.

De isolatie van kleding van BHV'ers in operator's kleding is veel lastiger te bepalen, deze zal afhankelijk van vele factoren liggen in de range van 0,7 clo tot 1,2 clo in tabel 1.

In het model THDYN worden niet de isolaties als inputparameters ingevoerd maar de inverse daarvan: de warmte overdrachtscoëfficiënten. Om wederom op een goed hanteerbare wijze al deze scenario's door te kunnen rekenen is ervoor gekozen om de warmte overdrachtscoëfficiënten van de buitenlaag te variëren van 4 naar 16 W/m<sup>2</sup>K, met stappen van 4 W/m<sup>2</sup>K. Hiermee wordt zowel het bereik van isolaties van brandweerkleding - tussen 4 en 8 W/m<sup>2</sup>K – als dat van 'gewone' kleding – tussen 8 en 16 W/m<sup>2</sup>K – gevat. Voor de volledigheid: bij een berekening van de totale isolatie van een kledingpakket wordt in de praktijk (en in ook THDYN) de isolatie van de omringende luchtlaag meegerekend. De feitelijke isolatie van de kleding in de praktijk is dus groter dan aangegeven in tabel 1. Ter indicatie: een isolatie van 1 tot 1,5 clo (in het model) is ongeveer een typisch pakket brandweerkleding, een isolatie van 0,6 clo zal ongeveer de typische isolatie zijn van de kleding die door BHV'ers in de zomer gedragen wordt.

### 3 Resultaten

In totaal zijn 1296 verschillende condities doorgerekend. Omdat lang niet alle varianten sterk verschillende resultaten geven zijn een aantal relevante condities geselecteerd om de trends in de varianten te tonen. De resultaten van de simulaties voor verschillende relevante varianten uit tabel 1 worden in afzonderlijke figuren getoond voor vier verschillende stralingsniveaus 1 kW/m<sup>2</sup>, 1,5 kW/m<sup>2</sup>, 2 kW/m<sup>2</sup> en 3 kW/m<sup>2</sup>. Per figuur worden de resultaten getoond voor alle luchttemperaturen (10 °C tot 30 °C), voor drie inspanningsniveaus (140 W/m<sup>2</sup> (lichte), 220 W/m<sup>2</sup> (matige) en 300 W/m<sup>2</sup> (zware) arbeid) en vier verschillende typen kleding (0,76 clo tot 2,0 clo). In totaal zijn daarmee de resultaten van 288 van de 1296 condities getoond.

In alle onderstaande figuren geldt het volgende:

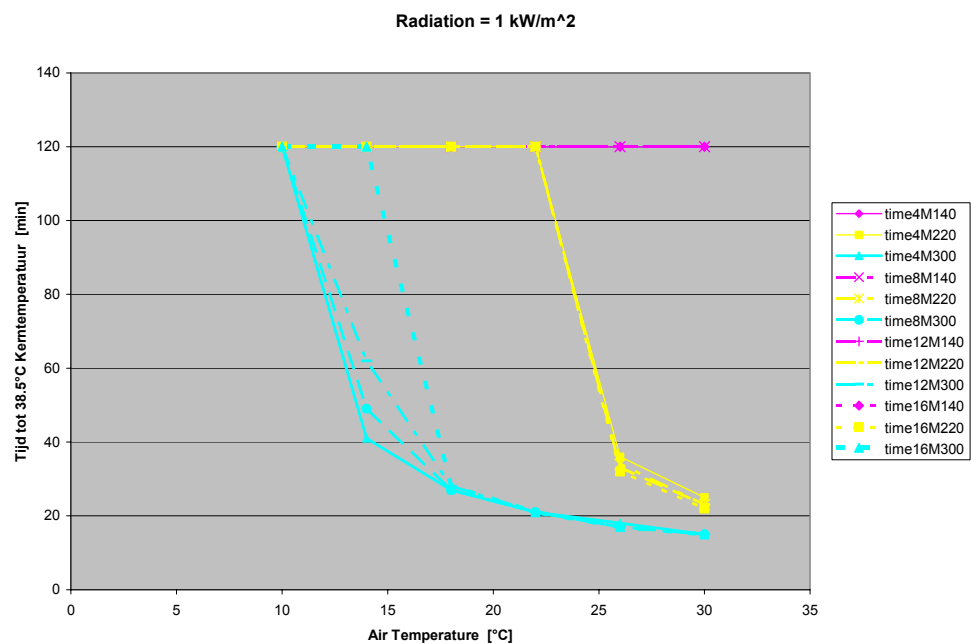
Op de x-as is de luchttemperatuur uitgezet [in °C] en op de y-as is de tijd aangegeven tot dat de kerntemperatuur in het specifieke scenario 38,5 °C heeft bereikt, zoals berekend door THDYN. In iedere figuur zijn nog de variaties met de kleding en de inspanning gegeven als volgt:

KLEUR:

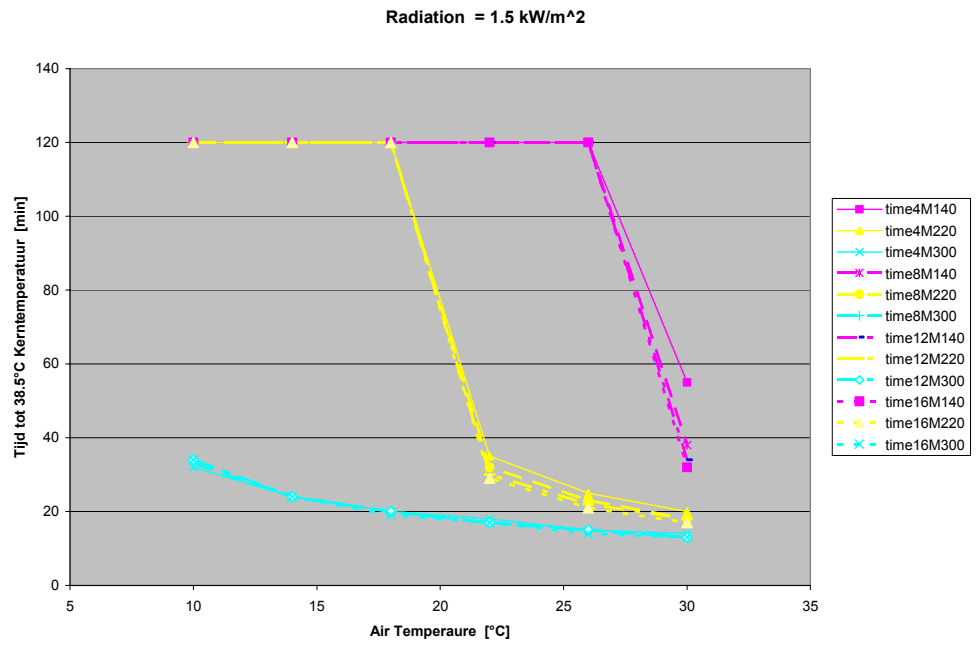
Magenta: Lichte inspanning (140 W/m<sup>2</sup>)  
 Geel: Matige inspanning (220 W/m<sup>2</sup>)  
 Turquoise: Zware inspanning (300 W/m<sup>2</sup>)

LIJNEN:

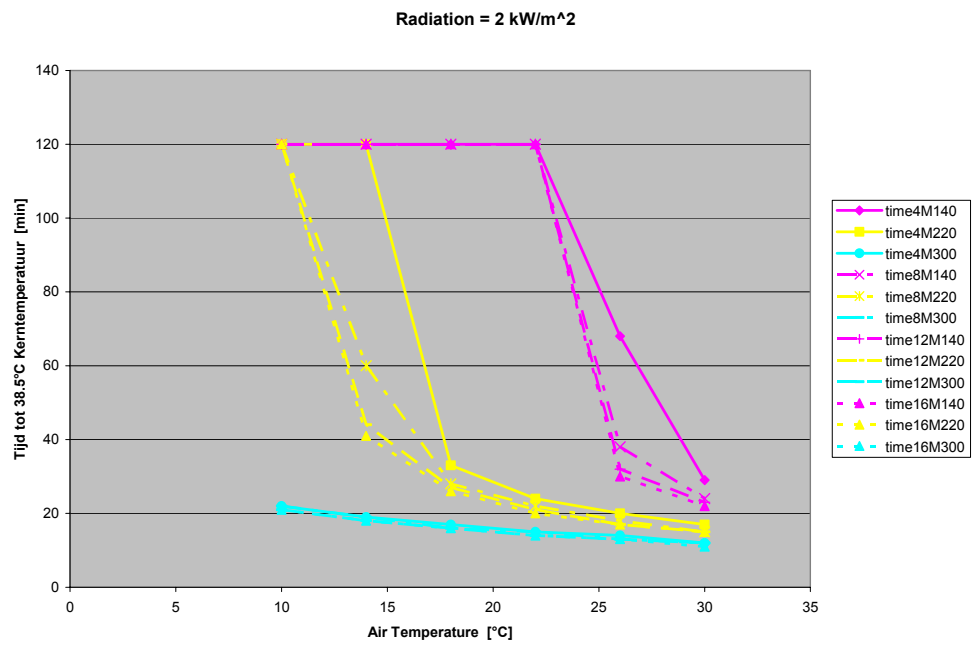
Doorgetrokken: Hoge isolatie (brandweerkleding)  
 Gestreept: Minder isolatie (operator's kleding met extra bescherming)  
 Kort gestreept: Lage isolatie (standaard operator's kleding)  
 Gestippeld: Zeer lage isolatie (operator's kleding in de zomer)



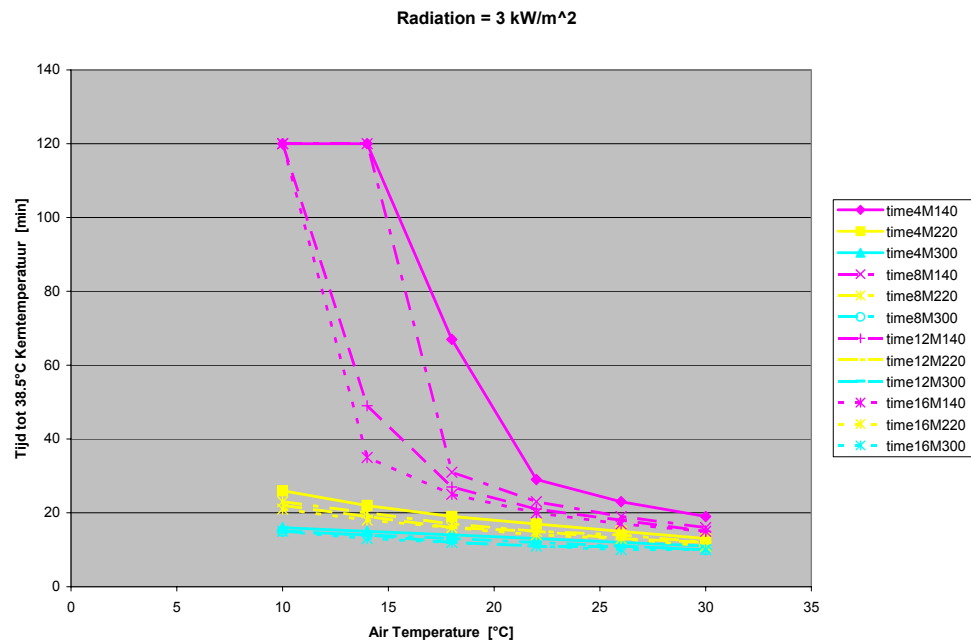
Figuur 1 Inzettijden bij stralingsbelasting 1 kW/m<sup>2</sup>.



Figuur 2 Inzettijden bij stralingsbelasting 1,5 kW/m<sup>2</sup>.



Figuur 3 Inzettijden bij stralingsbelasting 2 kW/m<sup>2</sup>.



Figuur 4 Inzettijden bij stralingsbelasting 3 kW/m<sup>2</sup>.

Bij een stralingscontour van 1 kW/m<sup>2</sup> geeft het model bij geringe inspanning geen beperking voor de inzetduur, bij toenemende inspanning komt er een beperking. Op het hoogste niveau (300 W/m<sup>2</sup>) begint de beperking te komen vanaf circa 15 °C, wat normaal is voor deze zware inspanning, die mensen niet een hele dag (kunnen) volhouden. In feite komt dit niveau overeen met warmtestraling op een warme zomerdag en dit kan in principe onder normale veilige warmtebelasting geschaard worden, mits de mensen bij zware en langdurige inzet medisch en fysiologisch bewaakt worden. Er is weinig effect van de kleding. Bij grote inspanning is het voordelig weinig kleding aan te hebben, wat goed is voor mensen in niet-brandweerkleding.

Bij een stralingscontour van 1,5 kW/m<sup>2</sup> zien we grotendeels hetzelfde beeld, maar de maximale inzet wordt dan verder beperkt door de inspanning. Al bij matige inspanning komt er in de zomer (boven de 20 °C) een beperking en moeten mensen bewaakt worden. Met andere woorden, deze contour is veilig, mits in de zomer medische aandacht aan de hulpverleners wordt gegeven bij langdurige inzet en/of hoge inspanning. Onder dergelijke omstandigheden moeten de hulpverleners medisch-fysiologisch bewaakt gaan worden om problemen met warmtebelasting te voorkomen. Er is nog steeds weinig effect van de kleding. Kleding met de lagere isolatie bij grote inspanning wordt negatief gecompenseerd door de hogere warmtestraling dan bij scenario 1.

Bij 2 kW/m<sup>2</sup> beginnen we een duidelijk voordeel te zien van isolerende (brandweer)kleding. In dit gebied lijkt het niet verstandig om nog mensen toe te laten die dergelijk kleding niet dragen. Ook zal dit stralingsniveau bij onbedekte huid een waarschijnlijk risico gaan geven op huidschade (Hoschke, 1981). Het THDYN model in zijn huidige vorm geeft over lokale huidverbranding zonder aanpassingen geen uitsluitel en daarom is huidverbranding in deze studie buiten beschouwing gelaten.

Bij 3 kW/m<sup>2</sup> is het duidelijk dat beschermende kleding noodzaak is. In dit stralingsgebied is inzet zonder beschermende brandweerkleding onmogelijk. Bij toenemende

inspanningsniveaus wordt inzetijd beperkt tot ongeveer 20 minuten. Dat wil zeggen ongeveer het verbruik van één fles ademlucht van 200 bar bij matige inspanning. Daarmee lijkt het niet verstandig langdurige inzetten uit te voeren voorbij dit stralingsniveau. De inzet wordt daarmee verder beperkt, ook bij lagere inspanning en de responstijd voor mensen om weg te komen bij oververhitting wordt daarmee ook kleiner.

## 4 Discussie

### 4.1 De contouren

Voor het niet-brandweerpersoneel lijkt de  $1 \text{ kW/m}^2$  contour een veilige contour. Er kunnen mogelijkheden zijn om dit op te rekken naar  $1,5 \text{ kW/m}^2$  maar dan moet er goed aandacht besteed worden aan problemen met warmtebelasting bij langdurige zwaar inspannende inzetten, vooral in de zomer. De huidige contour geeft veel minder zorgen voor de specifieke omstandigheden en kan daarmee eenvoudiger toegepast worden. Het stralingsniveau van  $1 \text{ kW/m}^2$  is maar weinig hoger dan de maximale zonnestraling (afhankelijk van de lokatie) die op aarde gevonden wordt, maar dit geeft wel meteen aan dat dergelijke omstandigheden als 'warm' gekenmerkt worden, met bijbehorende richtlijnen voor het werken in de warmte.

De  $3 \text{ kW/m}^2$  contour voor de brandweer is volgens deze modelstudie een goed gekozen contour. Daarbuiten moet langer durende inzetten voor brandweermensen mogelijk zijn. Daarbinnen wordt de inzetduur ernstig beperkt en moeten extra maatregelen genomen worden, rond bewaking van de brandweermensen, koeling, vochthuishouding en afwisseling. Houd er rekening mee dat het toepassen van preventieve maatregelen, zoals extra koeling voor brandweermensen, toch een mogelijkheid zou kunnen geven om het inzetgebied te verleggen. Dergelijke maatregelen dienen wel met zorg en aangepast op de (brandweer) omstandigheden toegepast te worden.

### 4.2 Huidtemperatuur

Het THDYN model is voor het bestuderen van de huidtemperatuur niet zonder wijzigingen geschikt, omdat het voor de bestudering van warmtebelasting alleen een gemiddelde huidtemperatuur geeft. Toch geeft die gemiddelde waarde aan dat bij een stralingsniveau van  $3 \text{ kW/m}^2$  de huidtemperatuur na 20 minuten in de buurt van de  $38 \text{ °C}$  tot  $39 \text{ °C}$  ligt. Dat wil zeggen dat de lokale delen van de huid die aan de hittestraling zijn blootgesteld nog hogere waarden zullen hebben, die zelfs in de buurt van huidverbranding ( $> 42 \text{ °C}$ ) kunnen komen. Hoe snel de huid in de praktijk zal opwarmen hangt af van vele lokale factoren, zoals de wind, lokale kledingisolatie en de hoeveelheid vocht onder de beschermende kleding. De THDYN berekeningen geven een indicatie dat hogere waarden voor de straling de kans doen toenemen dat de huidtemperatuur binnen 20 minuten (de duur van een 200 bar ademlucht fles) te hoog kan oplopen. Daarmee lijkt de  $3 \text{ kW/m}^2$  contour ook een geschikt niveau voor bescherming tegen huidverbranding. Hoschke (1981) geeft aan dat bij  $2 \text{ kW/m}^2$  de onbedekte huid al verbrandt na 30s. Dat geeft tevens aan dat zelfs bij dit lagere stralingsniveau hulpverleners voldoende bescherming dienen te hebben om lokale huidverbranding te voorkomen.

### 4.3 Individuele verschillen

Een van de vragen kan zijn dat in hoeverre individuele verschillen tussen mensen problemen kunnen geven. In deze studie zijn we er van uit gegaan dat de gemiddelde brandweermens in betere conditie verkeert dan de gemiddelde werknemer in de industrie. Hierin ligt een mogelijk gevaar voor een te optimistische kijk op de voorspelde waarden, omdat ook de operators als hulpverlenende BHV'ers optreden. De berekeningen uit dit onderzoek refereren aan een gemiddeld persoon (lengte  $1,80 \text{ m}$ , gewicht  $80 \text{ kg}$ ). Dat betekent dat mensen met een andere lichaamssamenstelling, getraindheid of



acclimatisatieniveau (gewenning aan de warmte) enigszins anders zullen reageren (Havenith, 1997). Met andere woorden: als onze gemiddelde persoon een kerntemperatuur van 39,0 °C heeft bereikt zullen er mensen met een hogere en met een lagere kerntemperatuur zijn. Om de inzettijden aan de veilige kant te houden, ook voor mensen met ongunstige lichaamseigenschappen, is het verstandig de limieten af te stemmen op een stijging tot een berekende (gemiddelde) kerntemperatuur van 38,5 °C. In dit verband is mede van belang dat boven een kerntemperatuur van 38,0 °C de menselijke prestatie niet alleen op fysiek maar ook op cognitief gebied af gaat nemen, bij het waarnemen, nadenken en het oplossen van probleem (Parsons, 1993). In het bijzonder in crisissituaties, zoals bij een incident op een industrieel complex, kan dit problemen geven.

#### 4.4 Aanbevelingen

Alle uitspraken zijn gebaseerd op een modelstudie met THDYN. Met dit gevalideerde model is het mogelijk algemene uitspraken te doen over de warmtebelastingsproblematiek. Binnen de verleende opdracht was het niet mogelijk deze uitkomsten te valideren met experimenteel onderzoek. Toch willen wij benadrukken dat voor de volledigheid van onderbouwing van de gestelde stralingscontouren experimentele studies aanbevolen worden.

Dergelijke experimenten verhogen het inzicht in de betrouwbaarheid van het model. Bovendien is het dan mogelijk om het risico van huidverbranding mee te wegen. Daarnaast kan er dan ook kennis opgebouwd worden over daadwerkelijke veilige inzettijden in dergelijke scenario's, die meer toegespitst zijn op individuele hulpverleners. In dit onderzoek hebben we ons gericht op de rechtvaardiging van de stralingscontouren in algemene zin. De trends uit dit onderzoek geven alleen de generieke rechtvaardiging voor de stralingscontouren. Omdat geen gedetailleerde informatie over personeel, kleding en omgeving bekend is kunnen de resultaten niet gebruikt worden om individuele veilige inzettijden te bepalen, maar kan in het algemeen worden gesteld dat de gekozen stralingscontouren in grote mate van veiligheid met betrekking tot warmtebelasting garanderen.

## 5 Conclusies

Op basis van de berekeningen van het THDYN model van TNO D&V is er geen directe reden om de gebruikte veiligheidscontouren voor brandbestrijding, van  $3 \text{ kW/m}^2$  voor hulpverleners in brandweerkleding en  $1 \text{ kW/m}^2$  voor overige hulpverleners in operators kleding te wijzigen. Deze contouren geven een inzetgebied aan dat verantwoord is voor de hulpverleners. Er zijn mogelijkheden om de contour voor overige hulpverleners te verleggen van  $1 \text{ kW/m}^2$  naar  $1,5 \text{ kW/m}^2$ , mits er onder warme omstandigheden, zoals in de zomer, rekening gehouden wordt met de eisen aan het werken onder warme omstandigheden en extra medische bewaking van het personeel mogelijk is.

## 6 Referenties

- NEN-EN-ISO 9886:2001: Evaluation of the thermal strain by physiological measurements.
- PrEN-ISO 12984:2001: Ergonomics of the thermal environment - Medical supervision of individuals exposed to extreme hot or cold environments, ISO, Geneve, Zwitserland.
- Den Hartog, E.A. & Heus, R. (2001). Inzettijd Brandweerlieden. Rapport TNO-TM-01-C035.
- Havenith, G. (1997). Individual heat stress response. Proefschrift Katholieke Universiteit Nijmegen.
- Heus, R. (1994). Bescherming van de Nederlandse militair tegen hitte en vlammen. Rapport TNO TM A-35, Soesterberg.
- Heus, R., Den Hartog, E.A. & Kistemaker, L. (2000). Evaluatie van brandweerkledij voor het Ministerie van Binnenlandse Zaken in België. Rapport TNO-TM-00-C038.
- Hoschke, B.N. (1981). Standards and specifications for firefighters' clothing. Fire Safety Journal, 4(2), 125-137.
- Lotens, W.A. (1993). Heat transfer from humans wearing clothing. PhD thesis, TNO-Institute for Perception, POBox 23, 3769ZG Soesterberg.
- Parsons, K.C. (1993). Human thermal environments. Taylor & Francis.

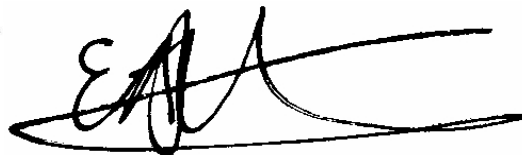
## 7 Ondertekening

Soesterberg, april 2006

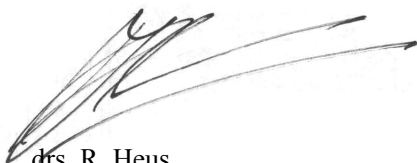
TNO Defensie en Veiligheid



Prof. dr. H.A.M. Daanen  
Groepshoofd



dr. E.A. den Hartog  
Auteur



drs. R. Heus  
Auteur

## A Technische bijlage - Gebruikte invoer voor THDYN

Onderstaand een voorbeeld van de invoerwaarden voor THDYN. De vetgedrukte en onderstreepte waarden zijn gevarieerd volgens tabel 1 uit het rapport. De overige waarden zijn constant gehouden.

<b><u>100</u></b>	<b>= Metabolism</b>
0	= External work
<b><u>10</u></b>	<b>= Air temperature</b>
50	= Relative humidity
<b><u>1000</u></b>	<b>= Radiation [in W/m<sup>2</sup>]</b>
1	= (Effective) wind speed
40	= Heat transfer coefficient underclothing [in W/m <sup>2</sup> K]
1.5	= Air gap between under and outer clothing [in mm]
<b><u>4</u></b>	<b>= Heat transfer coefficient outer clothing</b>
5.5	= Water vapour resistance outer clothing [in mm]
1	= Regain outer clothing
5	= Regain under clothing
25	= ventilation through clothing [in l/min/m <sup>2</sup> ]
0.2	= Fraction of area uncovered (nude)
1.2	= Factor of area increase by clothing
0.3	= Fraction of area irradiated
0.1	= reflection coefficient outer clothing UV
0.1	= transmission coefficient outer clothing UV
0.1	= reflection coefficient under clothing UV
0.1	= transmission coefficient under clothing UV
0.1	= transmission coefficient outer clothing IR
0.1	= reflection coefficient under clothing IR
1	= Print interval [ in min]
83	= Weight [in kg]
185	= Height [in cm]
15	= Fat percentage [%]
30	= Training status (0 to 100)
30	= Acclimation status (0 to 100)

## Distributielijst

**Onderstaande instanties/personen ontvangen een volledig exemplaar van het rapport.**

- 100 ex. Brandweer Rotterdam,  
M. Nijssen
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Algemeen directeur, ir. P.A.O.G. Korting
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,  
Vormgeving en Tekstverwerking, N. Koelhof (daarna reserve archief)
- 3 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,  
Prof. dr. H.A.M. Daanen, dr. E.A. den Hartog, drs. R. Heus
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,  
Archief