

## Hittestress bij gesimuleerde brand- en reddingsactiviteiten in twee typen kleding



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

Auteurs K. Kuklane, R. Heus, L. Kistemaker en R. Weewer  
Met medewerking van K. Levels, I. Tanck, E. Mol, M. Kemmeren  
Contactpersoon K. Kuklane

Datum 8 juni 2026

Foto's L. Kistemaker

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Voorwoord

Het wordt warmer, droger, natter en de zeespiegel stijgt. De gevolgen van klimaatverandering worden steeds meer gevoeld. Ook door brandweermensen die onder die vaak zeer verschillende omstandigheden in beschermende kleding hulp moeten verlenen. Met name in het voorjaar en de zomer kunnen de uitrukpakken, die vooral zijn bedoeld voor binnenbrandbestrijding, hittestress veroorzaken. Hittestress is van alle tijden. We kennen de oorzaken en gevolgen ervan en we weten hoe we hittestress kunnen voorkomen. Maar dat wordt wel steeds lastiger als je tegelijkertijd voldoende beschermd moet zijn en temperaturen toenemen. Reden genoeg om ook op gebied van beschermende kleding klimaatadaptief te zijn. Met name voor technische hulpverlening en natuurbrandbestrijding – werkzaamheden die steeds vaker voorkomen en wellicht niet dezelfde bescherming vereisen als binnenbrandbestrijding – is het goed om eens te kijken naar andere mogelijkheden. Een van die mogelijkheden is een zogenaamd modulair systeem: een kledingpakket waarbij met een toenemende behoefte aan beschermingsgraad steeds een extra laagje wordt toegevoegd.

Dit onderzoek is een stukje van die gehele puzzel. Er is gemeten hoe het huidige operationeel uniform in combinatie met een uitrukpak (zoals het nu is) zich verhoudt tot een meerlaags systeem bij verschillende typen werkzaamheden als het gaat om de hittebelasting van brandweerprofessionals. Het ziet ernaar uit dat klimaatadaptatie voor de brandweer in elk geval in relatie tot kleding niet alleen gaat over de kleding zelf, maar ook over de manier waarop brandweermensen om wensen en kunnen gaan met veranderingen in de toepassing ervan: de cultuur.

Dit rapport is niet eenvoudig. Het onderzoeken van en meten aan brandweerkleding is een expertise die heel schaars is, en ook heel erg specialistisch. Internationaal is er voor dit onderwerp ook erg veel belangstelling vanuit de beroepspraktijk en vanuit de wetenschap. We werken nauw samen met universiteiten en hebben specialistische kennis in huis. De onderzoekers en adviseurs van het NIPV zijn internationaal vooraanstaand in normcommissies waar ze deze kennis inbrengen in combinatie met de kennis uit het lectoraat over toekomstgerichte brandweezorg. Alleen al dit onderzoek heeft geleid tot meerdere publicaties in wetenschappelijke tijdschriften. De kennis opgedaan in dit onderzoek is en blijft beschikbaar in onze groep.

Graag wil ik iedereen bedanken die heeft meegewerkt aan deze studie, met name de proefpersonen, die vrijwillig hun tijd hebben willen steken in dit onderzoek en onder zware omstandigheden fysieke inspanningen hebben verricht.

Veel plezier bij het lezen van dit rapport!

Ricardo Weewer,  
Lector Brandweerkunde

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
	<b>Summary</b>	<b>7</b>
	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Methoden</b>	<b>14</b>
1.1	Gebruikersscenario's	14
1.2	Kleding	16
1.3	Uitrusting en instrumenten	17
1.4	Testomgeving	26
1.5	Stopcriteria	27
1.6	Ethische afwegingen	28
1.7	Procedures	28
1.8	Proefpersonen	30
1.9	Statistiek	31
<b>2</b>	<b>Resultaten en discussie</b>	<b>33</b>
2.1	Omgeving	33
2.2	Kleding	39
2.3	(Psycho)fysiologische data	42
2.4	Bruikbaarheid van modellen	69
<b>3</b>	<b>Conclusies</b>	<b>71</b>
3.1	Gebruik van het kledingsysteem	71
3.2	Bevindingen over fysiologische impact	71
3.3	Gebruik van modellen	72
	<b>Bijlage 1. PHS validation based on Lund University version</b>	<b>73</b>
	<b>Bijlage 2. PHS validation based on FAME Lab version</b>	<b>74</b>
	<b>Bijlage 3. A study in structural firefighting scenario with different clothing and without radiation</b>	<b>75</b>
	<b>Bijlage 4. A study in wildland firefighting scenario with different clothing and without radiation</b>	<b>76</b>
	<b>Bijlage 5. PHS validation based on the conditions without radiation</b>	<b>78</b>
	<b>Publicaties en presentaties gerelateerd aan het modulair beschermingsconcept</b>	<b>80</b>
	<b>Referenties</b>	<b>84</b>

# Samenvatting

In dit onderzoek zijn twee verschillende kledingsystemen onderzocht onder drie verschillende omstandigheden. De kledingsystemen bestonden uit het standaard uitrukpak met daaronder het operationeel uniform (het traditionele systeem Trad) en een modulair systeem dat bestond uit het operationeel uniform met daaroverheen een tweetal lagen waarvan de eerste gebruikt zou kunnen worden voor natuurbrandbestrijding en technische hulpverlening, en het tweede dat daaroverheen gedragen wordt voor binnenbrandbestrijding (het modulaire systeem Mod). Met deze twee systemen zijn werkzaamheden uitgevoerd onder gesimuleerde omstandigheden, namelijk technische hulpverlening, een natuurbrandscenario en een binnenbrandscenario. Onder deze omstandigheden werden voor beide systemen objectieve fysiologische parameters en subjectieve reacties gemeten.

Alle relevante fysiologische parameters zijn gemeten, namelijk de kerntemperatuur (rectaal gemeten), de gemiddelde huidtemperatuur, de hartslag en het zuurstofverbruik. We hebben verschillende kledingconfiguraties vergeleken binnen de verschillende scenario's. In alle gevallen droegen de brandweerlieden het nieuwe operationele uniform onder de uitrukkleding. De metingen zijn uitgevoerd met tien mannelijke proefpersonen, die ofwel de traditionele uitrukkleding (5 personen) ofwel de modulaire uitrukkleding (5 personen) droegen. Ze zijn in alle drie de scenario's getest in willekeurige volgorde. Door ziekte bleven uiteindelijk acht proefpersonen met een volledige dataset over (vier per kledingconfiguratie). In dit rapport ligt de nadruk op beschrijvende statistiek (zoals gemiddelden en standaardafwijkingen) en op de geschiktheid van bestaande voorspellende modellen voor hittestress.

Door sterk variërende omgevingscondities tijdens de testperiode was de klimaattent minder stabiel dan verwacht. Toch zijn alle relevante fysiologische parameters gemeten. De werkbelasting, huidtemperaturen en rectale temperatuur bleken lager bij het modulaire kledingtype. De lagere rectale temperatuur suggereert een langere mogelijke inzetduur voordat kritische kerntemperaturen worden bereikt. Ook de hersteltijd bij het modulaire kledingtype was korter.

Er werden bij deze experimenten geen statistisch significante verschillen in de fysiologische parameters gemeten tussen de twee kledingsystemen. Dat betekent dat in dit onderzoek geen verschil in hittebelasting werd gemeten tussen een traditioneel pak en een modulair opgebouwd kledingstelsel bij deze drie scenario's. Daar kunnen wel een paar kanttekeningen bij worden geplaatst, waardoor we per saldo kunnen zeggen dat het modulaire systeem toch beter presteert, en daarenboven de mogelijkheid biedt om afhankelijk van het incident op of af te schalen in lagen. Zo bleek tijdens de experimenten dat de omgevingstemperatuur tijdens het bemenen van het modulaire systeem in de klimaatkamer onbedoeld 6°C hoger was dan bij de experimenten met het traditionele systeem. Verder is het onderzoek door omstandigheden onbedoeld met minder proefpersonen (8 in plaats van 10) uitgevoerd, waardoor de spreiding in de resultaten groter is, en daarom waren de verschillen niet altijd statistisch significant.

De huidige dataset helpt bij het verbeteren van bestaande thermo-fysiologische modellen voor extreme omstandigheden zoals bij brandbestrijding. Op dit moment zijn de bestaande

modellen nog niet geschikt om fysiologische reacties onder brandbestrijdingsomstandigheden betrouwbaar te voorspellen. Verdere en diepgaandere analyses van deze gegevens maken een goede evaluatie van de modellen en van leeftijdseffecten op de fysiologische belasting van brandweerlieden mogelijk. Dit draagt bij aan het vaststellen van veilige werklomieten voor brandweerlieden.

# Summary

In this study, two different clothing systems were examined under three different conditions. The clothing systems consisted of the standard turnout garment worn over the operational uniform (the traditional Trad system) and a modular system consisting of the operational uniform covered by two layers. The first could be used for wildfire fighting and technical rescue, and the second worn over that for indoor firefighting (the modular Mod system). Work was carried out using these two systems under simulated conditions, namely technical rescue, a wildfire scenario, and an indoor fire scenario. Under these conditions, objective physiological parameters and subjective responses were recorded for both systems.

All relevant physiological parameters were measured, namely core temperature (measured rectally), average skin temperature, heart rate and oxygen consumption. Different clothing configurations within the different scenarios were compared. In all cases, the firefighters wore the new operational uniform under their turnout gear. The measurements were carried out with ten male subjects, who wore either the traditional turnout gear (5 test persons) or the modular turnout gear (5 test persons). They were tested in all three scenarios in random order. Due to illness, eight participants with a complete dataset remained (four per clothing configuration). This report focuses on descriptive statistics (such as means and standard deviations) and the suitability of existing predictive models for heat stress.

Due to the highly variable environmental conditions during the test period, the climate tent was less stable than expected. Nevertheless, all relevant physiological parameters were measured. Workload, skin temperatures and rectal temperature were found to be lower with the modular clothing type. The lower rectal temperature suggests a longer possible deployment time before critical core temperatures are reached. The recovery time with the modular clothing type was also significantly shorter.

No statistically significant differences in these parameters were measured between the two clothing systems. This means that in this study no difference in heat strain was measured between the traditional suit and the modular clothing system in these three scenarios. However, a few caveats should be noted, which allow us to conclude that the modular system performs better overall and, moreover, offers the possibility of scaling up or down in layers depending on the incident. For instance, it turned out that the ambient temperature during the testing of the modular system in the climate chamber was unintentionally 6°C higher than during the experiments with the traditional system. Furthermore, due to circumstances, the study was inadvertently conducted with fewer subjects (8 instead of 10), resulting in a wider spread in the results, and therefore, the differences were not always statistically significant.

The current dataset helps to improve existing thermo-physiological models for extreme conditions such as those encountered during firefighting. Currently, the existing models are not yet capable of reliably predicting physiological responses under firefighting conditions. Further and more in-depth analyses of these data will allow for a proper evaluation of the

models and of the effects of age on the physiological strain experienced by firefighters. This will contribute to establishing safe working limits for firefighters.

# Inleiding

In het kader van klimaatadaptatie is het noodzakelijk om te onderzoeken hoe brandweerpersoneel in de toekomst binnen het volledige risicospectrum optimaal kan worden beschermd tijdens laag-, midden- en hoog-risicotaken. Momenteel is er onvoldoende afstemming tussen de (beschermende) kledingpakketten die tijdens operationele inzet worden gebruikt. Bijna bij elke inzet van beroepsbrandweerlieden wordt de 'bluskleding' gedragen, met daaronder het operationeel uniform. Voor vrijwillige brandweerlieden is momenteel alleen de 'bluskleding' beschikbaar, die over de dagelijkse kleding wordt gedragen.

In de RBC<sup>1</sup>-vergadering van 22 september 2019 werd met betrekking tot beschermende kleding voor de brandweer het onderwerp 'Meer gezamenlijke aanpak (inzet)kleding voor de brandweer in Nederland' op de agenda geplaatst, met verwijzing naar het besluit van 21 juni van dat jaar ('Besluit implementatie operationele kleding'). Destijds werd voorgesteld om een visie te ontwikkelen voor een geïntegreerd (modulair) kledingsysteem voor de brandweer op de langere termijn. Het Nederlands Instituut voor Publieke Veiligheid (NIPV)<sup>2</sup> kreeg de opdracht om de visie te ontwikkelen en te beschrijven, en kennishiaten over beschermende kleding voor de brandweer in te vullen. Hierbij heeft de 'Klantenraad Brandweerkleding' opgetreden als gedelegeerd opdrachtgever namens de Raad van Commandanten en Directeuren Veiligheidsregio's (RCDV). Op verzoek van de voorzitter van de Klantenraad Brandweerkleding is gestart met de ontwikkeling van een toekomstvisie voor beschermende brandweerkleding, waarbij het huidige OU als uitgangspunt is genomen.

De achterliggende gedachte hierbij was dat de brandweer, met het oog op toekomstige ontwikkelingen (zoals klimaatverandering en duurzame inzetbaarheid van brandweerpersoneel), behoefte heeft aan een meer geïntegreerde visie op het volledige systeem van beschermende kleding. Risicoprofielen, beschermingsbehoeften, prestaties en draagcomfort spelen hierbij een belangrijke rol om tot een beschermingsconcept te komen dat het beste aansluit bij de uit te voeren taken.

Deze brede benadering vereist dat regionale uitgangspunten, werkwijzen en details in kaart worden gebracht en waar mogelijk worden geharmoniseerd. Wat betreft functionaliteit en bescherming is het minimumniveau vastgesteld in de Europese Verordening 2016/425 inzake persoonlijke beschermingsmiddelen<sup>3</sup> en formeel vastgelegd via normen (NEN-EN en NEN-EN-ISO).

---

<sup>1</sup> Raad Brandweercommandanten.

<sup>2</sup> Destijds nog Instituut Fysieke Veiligheid (IFV).

<sup>3</sup> Verordening (EU) 2016/425 van het Europees Parlement en de Raad van 9 maart 2016 betreffende persoonlijke beschermingsmiddelen en tot intrekking van Richtlijn 89/686/EEG van de Raad (voor de EER relevante tekst).

## Achtergrond

Zoals hierboven aangegeven, heeft de RCDV<sup>4</sup> op 21 juni 2019 besloten dat alle veiligheidsregio's in Nederland moeten beschikken over een operationeel uniform (OU) voor beroepsbrandweerlieden. Het OU vervangt de eerdere kazernekleding en wordt, naast werkkleding, ook ingezet als beschermende kleding bij operationele laagrisicotaken van de brandweer. Dit betekent dat er, naast de huidige uitrukkleding, een breder scala aan beschermende kleding beschikbaar is voor de dagelijkse werkzaamheden van de beroepsbrandweer.

Hoewel beide kledingpakketten voldoen aan de minimale gebruiksnormen, is er geen onderzoek gedaan naar het functioneren en de impact van de combinatie van beide kledingpakketten, terwijl dit wel de dagelijkse praktijk zal zijn. Om die reden is tijdens de RCDV-vergadering ook besloten dat er een integrale langetermijnvisie op beschermende kleding moet worden ontwikkeld. Het uiteindelijke doel op de lange termijn is te komen tot een modulair pakket van beschermende kleding, waarmee het mogelijk wordt om per taak de juiste (= optimaal beschermende) kleding te dragen. De situatie voor vrijwillige brandweerlieden is op dit moment anders dan die voor beroepskrachten, maar ook voor hen zal moeten worden overwogen of en hoe een modulair beschermend kledingconcept in de toekomst toepasbaar kan zijn.

## Probleemstelling

Er vinden momenteel veranderingen plaats in het brandweeroptreden (zo is er onder andere sprake van meer natuurbrandbestrijding) en de omstandigheden waaronder brandweerpersoneel moet optreden (bijvoorbeeld door klimaatverandering). Daarnaast zijn er tal van ontwikkelingen op het gebied van beschermende kleding (onder meer wat betreft het gebruik van het operationeel uniform). Door deze ontwikkelingen ontstaan er nu afzonderlijke initiatieven om de beschermende kleding aan te passen en nieuwe beschermende kleding aan te schaffen. Er is echter op dit moment geen duidelijke visie op een integraal (modulair) beschermingsconcept voor de brandweer in de toekomst.

Omdat de brandweer vrijwel altijd opereert in beschermende kleding voor (gebouw)brandbestrijding, ook bij niet-brandgerelateerde incidenten, is de fysieke belasting als gevolg van de gedragen kleding hoog (Dorman & Havenith, 2009; Holmér et al., 2006; Taylor et al., 2012). Deze extra belasting kan leiden tot overbelasting en staat op gespannen voet met de huidige ideeën over duurzaam inzetbare brandweermensen. Met de introductie van het OU ontstaan er meer mogelijkheden op het gebied van differentiatie van de bescherming voor de brandweer, waardoor de fysieke belasting bij bepaalde (laag-risico) taken kan worden verminderd.

Er is voor zover bekend echter nog geen onderzoek uitgevoerd naar de combinatie van verschillende beschermende kledingpakketten voor risico's die hoger zijn dan laag-risico. Ook is er binnen de Nederlandse brandweer geen duidelijke afstemming over het al dan niet dragen van het OU in combinatie met bluskleding.

---

<sup>4</sup> Raad Commandanten en Directeuren Veiligheidsregio's, hiervoor RBC (Raad Brandweercommandanten).

Dit project onderzoekt of het nieuwe OU in combinatie met bluskleiding kan worden ingezet bij brandweertaken met een risicoclassificatie hoger dan laag-risico, en wat de extra belasting is voor de drager. Aangezien beide kledingpakketten niet in samenhang met elkaar zijn ontwikkeld, is het bovendien zinvol om te onderzoeken of de beschermende kleding in de toekomst geoptimaliseerd kan worden door bepaalde kledingstukken met elkaar te combineren en eventueel 'slimme' elementen aan de kleding toe te voegen.

## Wetenschappelijke achtergrond

Brandweerlieden worden vaak blootgesteld aan gevaarlijke situaties die een negatieve impact hebben op hun gezondheid en veiligheid (Fullagar et al., 2021; Sandsund et al., 2024). Lee et al. (2017) rapporteerden dat 404 van de 794 brandweerlieden tijdens gevaarlijke operationele taken met hoge risico's te maken kregen. Tijdens hun meestal fysiek zware werkzaamheden worden brandweerlieden blootgesteld aan hoge omgevings-temperaturen, warmtestraling van vlammen en hitte via contact met hete oppervlakken. Thermische energie wordt daarbij overgedragen op de huid door straling, geleiding en convectie (Lei et al., 2023). Naast extreme temperaturen spelen ook het inspanningsniveau en het type kleding een cruciale rol (McLellan et al., 2023; Périard et al., 2021). Zware en semipermeabele beschermende kleding wordt vaak gebruikt als bescherming tegen de eerdergenoemde (hitte)gevaaren (Holmér et al., 2006; Rathour et al., 2021). Het totale gewicht van de bescherming, inclusief ademluchttoestel, kan oplopen tot 20 kg of meer, wat leidt tot een verhoogde metabole belasting en dus ook een verhoogde interne warmteproductie (Holmér et al., 2006; Sköldström, 1987; Tochiara et al., 2022).

Verhoging van het beschermingsniveau van de kleding leidt tot extra volume en gewicht, wat resulteert in een lagere fysieke prestatie, hogere metabole belasting en een toename van de interne productie van lichaamswarmte (Dorman, 2007; Dorman & Havenith, 2009; Teitlebaum & Goldman, 1972). Bij hoge temperaturen en zware fysieke inspanning leidt het dragen van zware kleding snel tot een dusdanige hoge hittebelasting, dat negatieve fysiologische en psychologische reacties worden veroorzaakt (heat strain) en het tot hittegerelateerde aandoeningen kan leiden (Moran et al., 2003; Petruzzello et al., 2009). Fysiologische reacties zoals een verhoogde huid- en kerntemperatuur verhogen het risico op hitteletsel (Carballo-Leyenda et al., 2022; Eggenberger et al., 2018; Færevik & Reinertsen, 2003; Renberg et al., 2022). Verminderde mobiliteit, flexibiliteit en fijne motoriek kunnen het vermogen om taken succesvol uit te voeren belemmeren (Aljaroudi et al., 2022; Son et al., 2022; Tochiara et al., 2005; Wang et al., 2021). Psychologische reacties zoals slaapproblemen, emotionele vermoeidheid en burn-out dragen bij aan het uitvalpercentage onder brandweerlieden (Yung et al., 2022). Het beperken van deze risico's is essentieel voor de veiligheid van brandweermensen in gevaarlijke omgevingen.

Het is dan ook belangrijk dat brandweerorganisaties per taak en incidentscenario de *optimale* bescherming kunnen selecteren. Risicoprofielen, beschermingsbehoeften en draagcomfort spelen hierbij een belangrijke rol om tot het best passende beschermingsconcept te komen. Een dergelijk concept moet bij voorkeur ruimte laten voor toekomstige (technologische) ontwikkelingen.

Met betrekking tot functionaliteit en bescherming is het minimumniveau vastgelegd in (inter)nationale normen (zoals NEN-EN en NEN-(EN)-ISO), bijvoorbeeld NEN-EN 469:2020, de NEN-ISO 11999-serie, NEN-EN-ISO 15384:2018 en NEN-ISO 21942:2019. De meeste

eisen richten zich echter op materialen en materiaalcombinaties en niet op functionele eisen van volledige kledingstukken of kledingsystemen.

Om het effect van kleding op thermisch comfort en warmtebelasting in verschillende omgevingen te onderzoeken, moeten de thermische isolatie en verdampingsweerstand van kleding in beschouwing worden genomen (Xu et al., 2014). Deze parameters zijn belangrijk voor thermisch comfort en het voorspellen van warmtebelasting bij werken onder warme omstandigheden (Parsons, 2014). Kuklane et al. (2022) hebben met een thermische manikin de thermische isolatiewaarden van afzonderlijke Nederlandse brandweerkledingstukken gemeten, evenals combinaties daarvan. NEN-EN-ISO 15831 (2004) biedt richtlijnen voor het meten van kledingisolatie met behulp van een thermische manikin en NEN-EN 17528 (2022) voor het meten van verdampingsweerstand.

Hoewel de studie van Kuklane et al. (2022) het nieuwe Nederlandse OU (operationeel uniform) en prototypes van scenariogebaseerde kledingsystemen onderzocht, was het huidige Nederlandse brandweerkledingsysteem daar niet in meegenomen. Daarom is een vervolgstudie uitgevoerd op een op dit moment in gebruik zijnde bluskledingsysteem (Kuklane et al., 2024a). Gedetailleerde informatie over zowel toekomstige als huidige uitrukkleding maakt het mogelijk de prestaties van het OU in combinatie met deze sets objectief te evalueren en om thermofysiologische modellen en slimme draagbare technologieën te beoordelen die beschikbaar komen voor hulpdiensten om hun inzet beter te plannen of waarschuwingssystemen te gebruiken. Een rapport over deze metingen is recent verschenen (Heus et al., 2025).

Geavanceerde modellen voor het inschatten van warmtebelasting van werkenden worden steeds vaker ontwikkeld (De Freitas & Grigorieva, 2014; Havenith & Fiala, 2016). Het Predicted Heat Strain (PHS)-model is een van de weinige modellen die zowel externe als interne factoren meenemen (Ioannou et al., 2019) en is als standaard vastgelegd in NEN-EN-ISO 7933. Het voorspelt de fysiologische reacties van werknemers in warme omgevingen en houdt rekening met kleding eigenschappen (Malchaire et al., 2001). Het model is echter gevalideerd tot een maximum kledingisolatie van 1,2 clo (Malchaire, 2006), terwijl uitrukkleding van de brandweer boven de 2,5 clo kan uitkomen (Holmér et al., 2006; Kuklane et al., 2022; 2024a). Daarnaast is de standaard nog niet gevalideerd voor arbeid met een afwisselende intensiteit in extreem warme omgevingen en bij zeer zware fysieke belasting.

## Doel en doelstellingen

Om tot een langetermijnvisie op beschermende kleding te komen, is het noodzakelijk om kennis te hebben over (toekomstige) taken van de brandweer en ontwikkelingen op het gebied van (modulaire) bescherming. Als doel voor de langetermijnvisie zijn wij uitgegaan van het volgende:

*Brandweermensen zijn altijd adequaat beschermd voor de taken die zij moeten uitvoeren, waarbij elke taak zijn eigen optimale bescherming heeft en de beschermende kleding modulair kan worden opgebouwd tot een integraal beschermingsconcept.*

In hoeverre bovenstaand doel haalbaar is, moet worden onderzocht. Het doel van dit specifieke project is om inzicht te krijgen in de hittebelasting van verschillende kledingconfiguraties en kennis en onderbouwing te ontwikkelen die nodig zijn om een visie

op integrale (modulaire) beschermingsconcepten voor de brandweer te kunnen formuleren. Als basis voor deze onderbouwing wordt onderzocht in hoeverre de huidige beschermende kleding van de brandweer voldoende is voor taken met een risicoprofiel hoger dan laag-risico. Daarnaast wordt onderzocht of het gebruik van beschermende kleding tijdens deze taken hinder veroorzaakt en waar mogelijke knelpunten liggen in de beschermende kleding voor hoog-risicotaken van de brandweer.

De onderzoeksresultaten moeten uiteindelijk leiden tot een onderbouwde visie op een optimaal beschermingsconcept voor de brandweer, waarbij bij elke taak de juiste (optimale) bescherming wordt gedragen. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met de verschillende uitgangssituaties van beroeps- en vrijwillige brandweermensen. In het voorliggende onderzoek wordt alleen gekeken naar de combinatie van OU en twee varianten uitrukkleding. Er worden voorstellen gedaan over de manier waarop eventuele knelpunten en hinder van de beschermende kleding kunnen worden aangepakt om de belasting voor brandweermensen te minimaliseren.

De resultaten van dit proefpersoononderzoek kunnen worden gebruikt om diverse thermofysiologische modellen te valideren. Deze modellen kunnen de brandweer in staat stellen om blootstelling in hulpverleningsscenario's te evalueren of ondersteunen bij de ontwikkeling van gespecialiseerde beslisondersteunende hulpmiddelen en betrouwbare waarschuwingssystemen op basis van voorspellingen. Daarom is in dit onderzoek een eerste poging gedaan om bestaande modellen te valideren met deze resultaten.

## Afbakening

Dit verkennend onderzoek gaat alleen over de fysieke belasting, hinder en (dis)comfort van de momenteel in gebruik zijnde kledingcombinaties in verschillende brandweerscenario's. Noch de productie, noch de implementatie van een nieuw integraal (modulair) beschermingssysteem voor de brandweer maken deel uit van dit onderzoek. Ook worden in dit project geen slimme elementen, zoals wearables of sensoren, toegevoegd aan de huidige beschermingsmiddelen van de brandweer.

## Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt de gebruikte methode toegelicht. Hoofdstuk 2 bespreekt de resultaten; een discussie van die resultaten is ook opgenomen in dit hoofdstuk. Hoofdstuk 3 bevat de conclusie.

# 1 Methoden

Het verkennend onderzoek omvatte het opstellen van een lijst van brandweertaken in Nederland met mogelijke (beschermende) kledingconfiguraties en eventuele aanvullende behoeften bij brandweeractiviteiten, een selectie van de meest relevante blootstellingsscenario's en de uitvoering van een onderzoeksprotocol met proefpersonen.

De thermische eigenschappen van brandweerkledingsets die fysiologische reacties en de ontwikkeling van hittestress beïnvloeden, zullen worden gemeten volgens beschikbare standaardmethoden en in relatie worden gebracht met gegevens van proefpersoon-onderzoek.

Analyse van de warmteoverdracht van kleding maakt het mogelijk te evalueren of de kleding overeenkomt met de vereiste bescherming voor het uitvoeren van brandweertaken. Daarnaast zullen eerste modelberekeningen worden uitgevoerd om de minimaal vereiste bescherming te bepalen voor de geselecteerde brandweerscenario's.

## 1.1 Gebruikersscenario's

Er is een eerste lijst met incidentscenario's en andere beroepsmatige activiteiten van brandweerpersoneel opgesteld (Tabel 1.1).

**Tabel 1.1 Brandweertaken en activiteiten**

<b>Binnenbrandbestrijding (GBB)</b>	<b>Branden in transportsector</b>
Woningen	Zeeschepen (open water, havengebied)
Meerlaagse woongebouwen	Vliegtuigen (vliegveld, natuur)
Hoogbouw	Treinen (bevolkt gebied, natuur)
Parkeergarages	Auto's, elektrische voertuigen, vrachtwagens (bevolkt gebied, snelwegen)
Ondergrondse structuren (bv. tunnels)	<b>Technische hulpverlening (THV)</b>
<b>Industriële brandbestrijding</b>	Werken met hoogteverschillen
Productiefaciliteit	Gebruik van hydraulisch gereedschap
Procesindustrie	<b>Overige activiteiten</b>
Chemische industrie	Activiteiten op kazernes: <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Gereedschap reinigen</li> <li>&gt; Onderhoud voertuigen en gereedschap</li> <li>&gt; Kantoorwerk</li> <li>&gt; Wachten</li> </ul>
Pakhuizen	Brandonderzoek
Boerenbedrijven	Preventie
Distributiecentra	Vuil werk, bv. dieren redden uit het riool
<b>Buitenbrandbestrijding</b>	Chemische incidenten
Afvalbrand enz.	Water redding
<b>Natuurbrandbestrijding (NBB)</b>	'Search and rescue'
Open veld	Training: <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Instructeurs</li> <li>&gt; Manschappen</li> </ul>
Bos	
Bermbrand	
Heuvels	
Veenbrand	

Uit deze taken zijn de drie meest voorkomende incidentscenario's gekozen om gesimuleerd te worden in een onderzoek in een klimaattent met proefpersonen (Tabel 1.2). Dit zijn de volgende scenario's: technische hulpverlening tijdens de zomer (THV), natuurbrandbestrijding (NBB) en offensieve binnenbrandbestrijding in gebouwen (GBB).

**Tabel 1.2 Parameters incidentscenario's**

Scenario's	Binnenbrandbestrijding binneninzet		Binnenbrandbestrijding buiteninzet		Buitenbrandbestrijding	Natuurbrandbestrijding	Technische hulpverlening	Overige taken
	Offensief	Defensief	Offensief	Defensief				
<b>Arbeidsduur</b>	Kort, gewoonlijk <30 min	Kort, gewoonlijk <45 min	Gemiddeld, gewoonlijk <90 min	Gemiddeld, gewoonlijk <90 min	Kort, <30 min	Lang, 8u	Gemiddeld, tot lang, 1-3u	Lang, tot 8u
<b>Werk-intensiteit</b>	Hoog, >500 W	Matig tot hoog, ≈400 W	Matig tot hoog, ≈400 W	Matig, ≈300 W	Matig, ≈300 W	Matig, ≈300 W	Matig, ≈300 W	Licht tot matig ≈200 W
<b>Lucht-temperatuur</b>	Tot 100 °C met korte pieken tot 200 °C	Tot 50 °C	Boven de 30 °C	Boven de 30 °C	Boven de 30 °C	Tot 40 °C	Van -10 tot 35 °C	Van -10 tot 35 °C
<b>Relatieve vochtigheid</b>	Ca. 50 %	Ca. 50 %	Ca. 70 %	Ca. 70 %	Ca. 70 %	Ca. 60 %	10-90 %	10-90 %
<b>Warmte-straling</b>	Tot 10 kW/m <sup>2</sup>	Tot 3 kW/m <sup>2</sup>	Tot 10 kW/m <sup>2</sup>	Tot 1 kW/m <sup>2</sup>	Tot 1-2 kW/m <sup>2</sup>	Tot 4 kW/m <sup>2</sup>	Tot 1 kW/m <sup>2</sup>	Tot 1 kW/m <sup>2</sup>

## 1.2 Kleding

Gedetailleerde informatie over de gebruikte kleding (Tabel 1.3) is beschikbaar in Kuklane et al. (2022, 2024a) en Heus et al. (2025). Effecten van maat en pasvorm en de invloed van accessoires op de thermische bescherming van de gebruikte kledingstukken worden beschreven in Kuklane et al. (2023, 2024a).

Het in deze studie gebruikte beschermende kledingsysteem voor brandweerlieden is ergonomisch getest en beschreven door Van Harten (2023) en Van Harten et al. (2023), waarbij testprocedures en aanbevelingen volgens EN 17528 (2023), Havenith en Heus (2004) en ISO 20141 (2022) zijn gevolgd.

In alle drie de scenario's droegen de brandweerlieden het Nederlandse operationeel uniform, (OU) onder het brandweerpak. Alle kledingstukken zijn voorafgaand aan de experimenten minstens vijf keer gewassen.

Tabel 1.3 Afbeeldingen van de geteste kleding die in deze studie is gebruikt

Trad_THW	Trad_NBB (GBB-Pre)	Trad_GBB	REC
			
$I_{cl}=1.92$ clo; $R_{ecl}=61.7$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.28$	$I_{cl}=2.17$ clo; $R_{ecl}=74.2$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.25$	$I_{cl}=2.39$ clo; $R_{ecl}=78.7$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.27$	$I_{cl}=1.12$ clo; $R_{ecl}=33.0$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.32$
Mod_C9A_THW	Mod_C8_NBB	Mod_C4_GBB	Mod_C7_GBB-Pre
			
$I_{cl}=2.09$ clo; $R_{ecl}=54.0$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.38$	$I_{cl}=2.33$ clo; $R_{ecl}=67.4$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.33$	$I_{cl}=2.69$ clo; $R_{ecl}=76.7$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.34$	$I_{cl}=2.60$ clo; $R_{ecl}=74.0$ m <sup>2</sup> Pa/W; $i_{m,cl}=0.32$

Mod – modulair kledingset (voor details van de kledingsets, zie kledingsets C4, C7, C8 en C9A in Kuklane et al., 2022); Trad – traditioneel kledingset (voor details van de kledingsets, zie kledingsets TRW, WLF-L en SIF in Kuklane et al., 2024a); REC – kledingset gebruikt tijdens het herstel (zie REC in Kuklane et al., 2024a); THW – kledingset gebruikt voor technische hulpverlening; NBB – kledingset voor natuurbrandbestrijding; GBB – kledingset voor binnenbrandbestrijding in gebouwen.

## 1.3 Uitrusting en instrumenten

### 1.3.1 Klimaatgecontroleerde ruimte

De metingen werden uitgevoerd in de klimaattent op het defensie terrein in Soesterberg tussen december 2023 en januari 2024. De drie brandweerscenario's hadden de volgende temperaturen en luchtvochtigheden:

- > technische hulpverlening bij warm weer (THW, 25 °C en 60 % relatieve luchtvochtigheid (RV)),
- > natuurbrandbestrijding bij heet weer (NBB, 30 °C en 50 % RV),
- > binnenbrandbestrijding (GBB, 45 °C en 40 % RV).

### 1.3.2 Stralingspaneel

Er is ook gebruikgemaakt van een stralingspaneel (Figuur 1.1). Het stralingspaneel is vervaardigd door Jac. de Vries INFRAROODTECHNIEK (SINUS JEVI ELECTRIC HEATING B.V., Medemblik, Nederland) voor experimentele doeleinden om blootstelling aan warmtestraling te simuleren. Het is bedoeld om een bewegende persoon gelijkmatig te bestralen met een warmtestraling tot 4,6 kW/m<sup>2</sup>.<sup>5</sup> Het maximale te verwarmen oppervlak is 700 x 1900 mm (breedte x hoogte). Hiervoor zijn 10 infrarood (IR) stralers met elk een maximaal vermogen van 1300 W (3-fasen 230 V, 22,5 A) gemonteerd op een mobiel frame van aluminium profiel. De regelkast bevindt zich onderaan de achterzijde van het frame.



**Figuur 1.1 Stralingspaneel (a); lopende proefpersoon naast het stralingspaneel (b)**

Voorafgaand aan de testserie werd de werking van het paneel geëvalueerd met de watergekoelde warmtestroomsensor SBG01 van Hukseflux, gekoppeld aan de LI19 handbediende datalogger (Hukseflux Thermal Sensors B.V., Delft, Nederland), en met de Thermal Environment Monitor (QuesTemp° 46, TSI Instruments Ltd., Shoreview, MN, VS). Tijdens de experimenten was het niet mogelijk om deze instrumenten op de positie van de proefpersonen (PP) te plaatsen vanwege de beweging van de PP op die locatie. Tijdens de kalibratietests van het paneel werd het frontpaneel van de QuesTemp afgedekt met aluminiumfolie om schade door hoge warmtestraling te voorkomen, waarbij alleen de sensoren werden blootgesteld aan de straling. Ondanks deze voorzorgsmaatregelen is het

<sup>5</sup> Dit is het maximaal toelaatbare niveau van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs-) brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven in bluskleiding (2016).

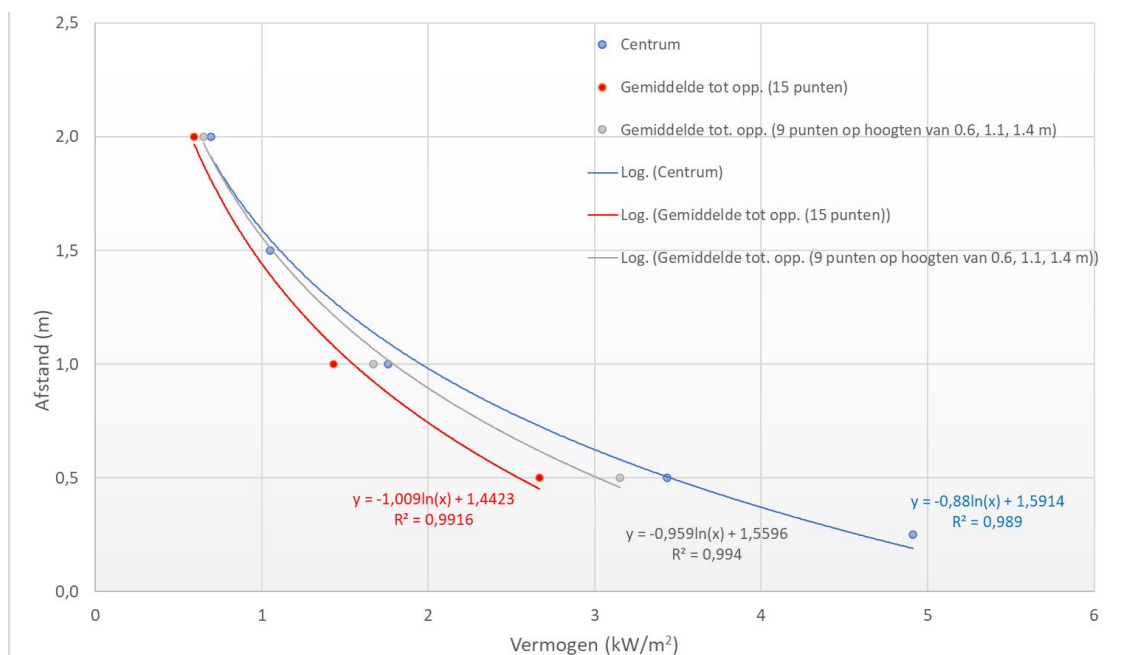
instrument niet op alle meetpunten gebruikt bij de hoogste toegepaste niveaus van infraroodstraling vanwege het risico op schade aan de sensoren bij langdurige infraroodblootstelling.

Om het gewenste verwarmingsvermogen op de proefpersoon (PP) te creëren, werd de warmtestroom (intensiteit in kW/m<sup>2</sup>) gekalibreerd op basis van de afstand tot het paneel (Figuur 1.2). Zowel de warmtestroom als de omgevingsparameters werden op twee locaties gemeten:

1. in een open hal bij een luchttemperatuur van ongeveer 18 °C, en
2. bij 35 °C in de klimaattent.

Het stralingsvermogen op het middelpunt werd ook gemeten bij een luchttemperatuur van 45 °C om inzicht te krijgen in het stralingsgedrag bij deze temperatuur. In alle gevallen werd het paneel op maximaal vermogen ingesteld, en werd het stralingsvermogen geregeld via de afstand tot het stralingspaneel. De warmtestroom werd aanvankelijk gemeten op afstanden van 0,5, 1,0 en 2,0 meter van het stralingspaneel (het middelpunt van het stralingspaneel ook op 1,5 m). Daarna werden de voorspellingen gecontroleerd op afstanden van 1,5, 0,5 en 0,2 meter. Dit waren de aanvankelijk geschatte afstanden tot het kledingoppervlak ter hoogte van de laterale bovenarm van de proefpersoon, oftewel het verwachte dichtstbijzijnde huidpunt ten opzichte van het stralingspaneel.

In tegenstelling tot bij de warmtestroommetingen werden de sensoren van de QuesTemp° 46 bij 35 °C geplaatst in het verwachte centrale vlak van de proefpersoon, dus in het midden van de loopband, en 0,3 meter verder weg van het stralingspaneel.



**Figuur 1.2 Relatie tussen vermogen en afstand bij kamertemperatuur (ca.18 °C) en gevalideerd bij 35 °C op de testlocatie**

De relaties in Figuur 1.2 zijn gebruikt om de afstand van het stralingspaneel tot de bovenarm van de proefpersoon te bepalen. Aangezien de bovenste meetrij (1,7 m) zich ter hoogte van het hoofd bevond (dicht bij de bovenrand van het paneel) en de onderste rij zich op

voetniveau bevond (dicht bij de onderrand van het paneel), werd het gemiddelde van negen meetpunten gebruikt om de afstand tussen het paneel en de bovenarm te bepalen.

Bij beide luchttemperaturen waren het geregistreerde en geschatte stralingsvermogen vergelijkbaar, wat aantoont dat een relatief klein verschil in luchttemperatuur – in vergelijking met het stralingsvermogen – weinig invloed had op het resultaat wanneer de sensor naar het paneel gericht was. De beste voorspelling van het te verwachten vermogen werd verkregen met een logaritmische (ln) functie. De krommen in Figuur 1.2 vertegenwoordigen het stralingsvermogen (gemeten met de Hukseflux SBG01 met LI19) in het midden van het stralingspaneel, gemiddelden gebaseerd op negen meetpunten op drie verticale lijnen (midden en  $\pm 0,2$  m) op hoogtes van 0,6, 1,1 en 1,4 m, en een volledig gemiddelde op basis van 15 punten (de vorige punten plus de overeenkomstige drie punten op 0,1 en 1,7 m hoogte) en de bijbehorende regressielijnen. De punten op 0,1 en 1,7 m hoogte bevonden zich net onder respectievelijk net boven de onder- en bovenrand van het paneel. Daarom werd voor de veiligheid het gemiddelde stralingsvermogen voor de blootstelling van de proefpersonen berekend op basis van het gebied dat werd afgedekt door de negen punten, aangezien de meeste huidsensoren zich binnen dit gebied bevonden. De regressievergelijkingen maakten het mogelijk om de afstand te berekenen die nodig was om het beoogde vermogen te bereiken. Zeer dicht bij het oppervlak van het paneel ( $\sim 1$  cm) was het vermogen in het middelpunt iets boven de  $5 \text{ kW/m}^2$ , maar tijdens de tests mocht een bewegende proefpersoon niet zo dicht bij het paneel komen vanwege het risico op contact.

### 1.3.3 Gemiddelde stralingstemperatuur

Aangezien de onderzoekopstelling een complexe, steeds wisselende omgeving creëerde, de berekening van de gemiddelde stralingstemperatuur op zichzelf al complex was, en meetinstrumenten niet konden worden geplaatst op de plek waar de proefpersoon (PP) liep, hebben we enkele aannames en vereenvoudigingen toegepast. We volgden Gebhardt et al. (1995) en ISO 7726:1998, Bijlage B voor de berekening van de gemiddelde stralingstemperatuur ( $\bar{T}_r$ ).

In de perioden waarin geen IR-straling werd toegepast, zijn de lucht- ( $T_a$ ) en zwarte boltemperatuur<sup>6</sup> ( $T_g$ ) en de ISO 7726-vergelijking voor natuurlijke convectie om  $\bar{T}_r$  te berekenen gebruikt:

$$\bar{T}_r = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{0.25 \times 10^8}{\varepsilon_g} \times \left( \frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{1/4} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (1)$$

waarbij:

$\varepsilon_g$  – de emissiviteit van de zwarte bol (in het onderzoek is 0,99 gebruikt)

$D$  – de diameter van de zwarte bol (in het onderzoek is 0,05 m gebruikt).

Voor de testperiodes buiten de klimaattent, zoals het voorbereidende werk van GBB en de herstelperiode voor alle testcondities, werd aangenomen dat de gemiddelde stralingstemperatuur gelijk was aan de luchttemperatuur, die op haar beurt verondersteld werd gelijk te zijn aan de zwarte boltemperatuur. In de testkamer werd het QuesTemp-instrument altijd buiten de directe IR-straling van het paneel geplaatst. Het werd echter wel beïnvloed door indirecte straling. We zijn ervan uitgegaan dat andere oppervlakken die niet

<sup>6</sup> Globetemperatuur, de temperatuur die men ervaart vanwege warmtestraling

aan directe straling waren blootgesteld of zich ver genoeg van het paneel bevonden, op dezelfde manier werden beïnvloed.

Het stralingspaneel was rechts van de PP geplaatst, loodrecht op het lichaam. Daarom werd volgens ISO 7726 een ratio van 0,23 gebruikt voor het bestraalde deel van het lichaam. Voor de lichaamsdelen in andere richtingen werd aangenomen dat de temperatuur van de omringende oppervlakken gelijk was aan het gemiddelde van de lucht- en zwarte boltemperatuur.

In het geval van de stralingsperiodes werd de gemiddelde stralingstemperatuur berekend op basis van geschatte vlakke stralingstemperaturen ( $T_{pr}$ ) uit zes richtingen, waarbij werd aangenomen dat de  $T_{pr}$  uit vijf richtingen gelijk was aan  $T_r$  berekend volgens vergelijking (1), en de temperatuur van het stralingspaneel werd berekend op basis van het stralingsvermogen volgens Gebhardt et al. (1995). Voor de bestraalde zijde werd  $T_{pr}$  dan:

$$T_{pr} = \sqrt[4]{\left(\frac{I_s}{\sigma \epsilon_s} + (T_a + 273)^4\right)} - 273 \quad (2)$$

waarbij:

$I_s$  – de warmtestroom van het stralingspaneel die de proefpersoon bereikt ( $W/m^2$ ), (in ons geval 1000, 3000 of  $4000 W/m^2$ )

$\sigma$  – de constante van Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ )

$\epsilon_s$  – de emissiviteit van de omringende oppervlakken en algemene textielmaterialen (0,95).

Daarna werd de gemiddelde stralingstemperatuur berekend met behulp van geprojecteerde oppervlaktefactoren voor een staande persoon (0,08 voor boven en onder, 0,23 voor linker- en rechterzijde en 0,35 voor voor- en achterkant, ISO 7726) met de volgende vergelijking:

$$\bar{T}_r = \frac{0,08 \times (T_{pr,boven} + T_{pr,onder}) + 0,23 \times (T_{pr,rechts} + T_{pr,links}) + 0,35 \times (T_{pr,voor} + T_{pr,achter})}{2 \times (0,08 + 0,23 + 0,35)} \quad (3)$$

Volgens onze aannames waarbij  $T_{pr,up} = T_{pr,down} = T_{pr,left} = T_{pr,front} = T_{pr,back}$  ( $^{\circ}C$ ), wordt bovenstaande vergelijking vereenvoudigd tot:

$$\bar{T}_r = \frac{1,09 \times T_{pr,other} + 0,23 \times T_{pr,right}}{1,32} \quad (4)$$

### 1.3.4 Huid- en rectaalsensoren

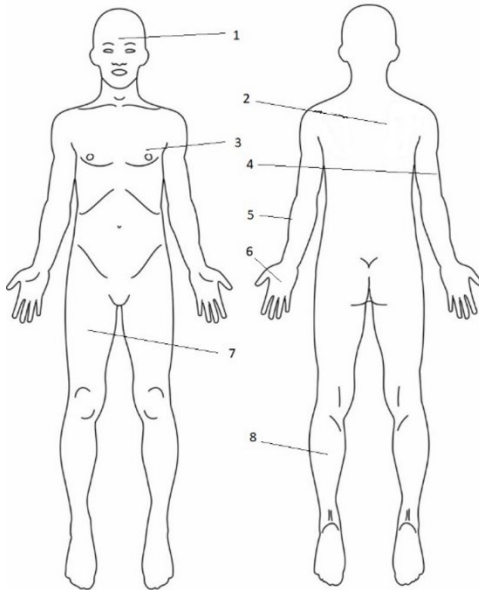
Huidtemperaturen werden gemeten op acht plaatsen op het lichaam (Figuur 1.3) met behulp van twee loggers (MSR145W2D (WiFi) en MSR145WD (Bluetooth), MSR Electronics GmbH, Seuzach, Zwitserland). De sensoren werden met Blenderm chirurgische tape 1525 (3M, VS) op de huid bevestigd. De berekening van de gemiddelde huidtemperatuur ( $\bar{T}_{sk}$ ) werd op twee manieren uitgevoerd:

Volgens Ramanathan (1964), op basis van vier meetpunten op de huid:

$$\bar{T}_{sk} = 0,30 \times T_{borst} + 0,30 \times T_{b.arm} + 0,20 \times T_{dij} + 0,20 \times T_{kuit} \quad (5)$$

En volgens Gagge & Nishi (1977), op basis van acht meetpunten:

$$\bar{T}_{sk} = 0.07 \times T_{voorhoofd} + 0.175 \times T_{rug} + 0.175 \times T_{borst} + 0.07 \times T_{b.arm} + 0.07 \times T_{o.arm} + 0.05 \times T_{hand} + 0.19 \times T_{dij} + 0.2 \times T_{kuit} \quad (6)$$



**Figuur 1.3 Lokale huidtemperaturen**

1 – voorhoofd; 2 – rechter schouderblad; 3 – linkerborst; 4 – rechter laterale bovenarm; 5 – linker laterale onderarm; 6 – linkerhand (rug); 7 – rechterbovenbeen (voorkant) (dij); 8 – linker kuit.

De kerntemperatuur van het lichaam werd gemeten met een rectale sensor ( $T_{rec}$ ), aangesloten op de MSR145W2D WiFi-logger. De gemiddelde lichaamstemperatuur ( $T_b$ ) werd berekend volgens:

$$T_b = 0.2 \times \bar{T}_{sk} + 0.8 \times T_{rec} \quad (7)$$

Op basis van de gemiddelde lichaamstemperatuur konden de warmte-inhoud van het lichaam en de opslag van lichaamswarmte worden berekend:

$$Q = m_s \times c \times (t_b^e - t_b^0) \quad (8)$$

waarbij:

$m_s$  – massa van de (naakte) proefpersoon (kg)

$c$  – soortelijke warmtecapaciteit van het menselijk lichaam (2980 J/(kg·°C))

$t_b^e$  – gemiddelde lichaamstemperatuur aan het einde van de test of geselecteerde periode (°C)

$t_b^0$  – gemiddelde lichaamstemperatuur aan het begin van de test of geselecteerde periode (°C).

De warmteopslag per oppervlakte-eenheid ( $\Delta S$ ) is vervolgens berekend met:

$$\Delta S = \frac{Q/D}{A_{Du}} \quad (9)$$

waarbij:

$\Delta S$  – opslag van lichaamswarmte (W/m<sup>2</sup>)  
 $D$  – duur van de test of geselecteerde periode (s)  
 $A_{Du}$  – lichaamsoppervlakte (m<sup>2</sup>).

De lichaamsoppervlakte werd berekend met:

$$A_{Du} = 0.202 \times m_s^{0.425} \times h^{0.725} \quad (10)$$

waarbij:

$m_s$  – massa van de ontklede persoon (kg)  
 $h$  – lengte van de proefpersoon (m).

### 1.3.5 Omgevings- en kledingmicroklimaatmonitoring

De omgevingsparameters werden gemeten met een Thermal Environment Monitor (QuesTemp° 46, TSI Instruments Ltd., Shoreview, MN, VS) die buiten de directe IR-straling werd geplaatst. Luchttemperatuur, luchtvochtigheid en zwarte boltemperatuur werden gemeten. De luchtsnelheid in de testruimte, inclusief de klimaattent, bleef rond de 0,1 m/s. Daardoor domineerde de activiteit van de proefpersoon (PP) de convectie rondom het lichaam.

Temperatuur en vochtigheid tussen huid en kleding werden gemeten met sensoren die geïntegreerd waren in de behuizing van de MSR145WD- en MSR145W2D-dataloggers. Deze dataloggers waren bevestigd op de borst en de linker bovenarm. Temperatuur en vochtigheid tussen de onderkleding en de buitenste beschermkleding werden gemeten op de rechter bovenarm, in de buurt van de locatie van de huidtemperatuursensor, maar zonder deze te bedekken. Een extra temperatuursensor werd nabij deze locatie geplaatst, op de buitenlaag van de beschermkleding.

Aangezien de kledingoppervlaktetemperatuur op de bovenarm (buitenlaag) tijdens perioden zonder IR-straling ongeveer 1 °C boven de luchttemperatuur bleef in het THW-scenario, en gemiddeld dicht bij de luchttemperatuur lag ( $\pm 4$  °C, afhankelijk van het moment van meting: vóór of na de stralingsperiode) in het GBB-scenario, werden deze waarden aangenomen als de kledingoppervlaktetemperaturen van de niet-bestraalde gebieden tijdens de stralingsperiodes.

In de NBB-conditie, waarin het stralingspaneel continu aanstond, werd – gebaseerd op de resultaten van THW (~25 °C) en GBB (~44,5 °C) – aangenomen dat de gemiddelde kledingoppervlaktetemperatuur in de niet-bestraalde zones dicht bij het gemiddelde van lucht- en zwarte boltemperatuur bleef, aangezien huid-, lucht- en zwarte boltemperaturen in NBB slechts minimaal verschilden van die in de andere condities.

De temperatuur aan de bestraalde zijde werd genomen als het gemiddelde van de begin- en eindtemperaturen van de periode waarin IR-straling werd toegepast. Evenzo werd tijdens de niet-bestraalde periodes binnen het intermitterende stralingsscenario de temperatuur aan de bestraalde zijde genomen als het gemiddelde van de eind- en begintemperaturen van de omliggende stralingsperiode.

Op basis van bovenstaande metingen en aannames kon de gemiddelde kledingoppervlakte-temperatuur ( $T_{clo}$ ) worden geschat met vergelijking 4, als lokale kledingtemperaturen werden gebruikt in plaats van lokale stralingstemperaturen.

### 1.3.6 Zuurstofverbruik, hartslag en metabole snelheid

Het zuurstofverbruik werd gemeten met behulp van de Vyntus CPX (Vyaire Medical GmbH, Hoechberg, Duitsland) en op basis daarvan werd het metabolisme berekend. Hetzelfde apparaat registreerde ook de hartslag, die werd doorgegeven via een Polar H10 hartslagsensor, bevestigd met een borstband (Polar Electro, Finland).

De metabole snelheid werd berekend met de volgende vergelijking:

$$M = \frac{5.873 \times (0.23 \times RQ + 0.77) \times VO_2 \times 60}{A_{Du}} \quad (11)$$

waarbij:

$RQ$  – respiratoire quotiënt (dimensieloos)

$VO_2$  – zuurstofverbruik (l/min)

$A_{Du}$  – lichaamsoppervlakte (m<sup>2</sup>).

### 1.3.7 Antropometrische gegevens

Tijdens het eerste bezoek werden lengte, gewicht, leeftijd en huidploidikte op vier locaties gemeten: scapula (schouderblad), crista iliaca (bekkenkam), triceps en biceps (bovenarm). Op basis hiervan werden de Body Mass Index (BMI) en het vetpercentage berekend volgens Durnin en Womersley (1974).

$$BMI = \frac{m_s}{h^2} \quad (12)$$

In alle drie scenario's werden de brandweelieden meerdere keren gewogen: naakt (met ondergoed en rectale sensor) en met volledige uitrusting aan het begin, na het verlaten van de klimaattent met en zonder jas, handschoenen en helm, en naakt na de herstelfase. Voor het GBB-scenario kwamen daar twee extra weegmomenten bij: na de fietsoefening met en zonder ademluchtfles en handschoenen. Deze weeggegevens maakten het mogelijk om het totale gewichtsverlies van het lichaam, de verdamping tijdens specifieke perioden van het experiment en de vochtopname in de kleding te schatten.

### 1.3.8 Subjectieve waarnemingen

Afhankelijk van het scenario en de duur van de activiteit gaven de proefpersonen elke 10 of 15 minuten van de inspannings- en herstelfase hun subjectieve beleving aan, gebaseerd op ISO 10551. De subjectieve beoordelingen omvatten:

- > Thermisch gevoel (9-puntsschaal, met nadruk op warmte): "Hoe voelt je lichaamstemperatuur aan op dit moment?" 5 = ondraaglijk heet; 4 = zeer heet; 3 = heet; 2 = warm; 1 = licht warm; 0 = neutraal; -1 = licht koel; -2 = koel; -3 = koud.
- > Gevoel van huidvochtigheid (4-puntsschaal): "Hoe voelt je huid aan?" 0 = normaal; 1.0 = licht vochtig; 2.0 = vochtig; 3.0 = zeer vochtig.

- > Comfortbeleving (5-puntsschaal): “Hoe comfortabel voel je je op dit moment?” 0 = neutraal; 1 = licht oncomfortabel; 2 = oncomfortabel; 3 = zeer oncomfortabel; 4 = extreem oncomfortabel.
- > Pijngevoel: “Hoe pijnlijk is het op dit moment voor jou?” 0 = geen pijn; 1 = enigszins pijnlijk; 2 = pijnlijk; 3 = zeer pijnlijk; 4 = heel erg pijnlijk; 5 = ondragelijke pijn.
- > Ervaren inspanning (Borg-schaal van 6 tot 20): “Hoe zwaar is de inspanning op dit moment?” 6 = extreem licht (geen inspanning); 7-8 = zeer licht; 9-10 = licht; 11-12 = matig; (je kunt nog praten tijdens het bewegen); 13-15 = zwaar; 16-17 = zeer zwaar; 18-19 = extreem zwaar; 20 = maximale inspanning (Borg, 1982).

### 1.3.9 ‘Predicted heat strain’ (PHS, ISO 7933:2004)

#### Voorspellingen vóór het onderzoek

Voor de uitvoering van de daadwerkelijke metingen werden alle geselecteerde scenario’s gesimuleerd met behulp van het model voor voorspelde hittestuwing (PHS, ISO 7933:2004), aangepast voor een eerder brandweeronderzoek (Holmér et al., 2006). Deze aangepaste versie liet het invoeren van hogere isolatiewaarden, activiteitsniveaus en een breder scala aan omgevingsparameters toe. De algoritmes hielden echter geen rekening met intermitterende omstandigheden, waardoor de tijdsgewogen gemiddelde activiteitsniveaus en omgevingscondities werden gebruikt om de blootstelling te voorspellen.

De werklust tijdens het lopen werd ingeschat volgens Givoni en Goldman (1971) en vervolgens met 20 % verhoogd vanwege de beperkingen van beschermende kleding en uitrusting, gebaseerd op eerdere studies (Dorman & Havenith, 2009; Holmér et al., 2003; Jones et al., 1984; Kuklane et al., 2007; Teitlebaum & Goldman, 1972).

Het doel van deze voorspellingen was om experimentele omstandigheden te selecteren waarin de proefpersoon het hele geplande blootstellingsinterval kon volhouden. Omdat de relevante literatuur geen rekening hield met de effecten van IR-straling, werd de oorspronkelijk geplande luchttemperatuur voor het NBB-scenario (met constante IR-straling) verlaagd van 35 °C naar 30 °C, op basis van Carballo-Leyeda et al. (2017).

De resultaten van deze ruwe voorspellingen worden niet in dit rapport gepresenteerd, maar zijn te vinden in een andere publicatie (Kuklane et al., 2024b).

#### Modelvalidatie na het onderzoek

De eerste evaluaties van het Predicted Heat Strain (PHS)-model (ISO 7933) voor brandweerscenario’s zijn uitgevoerd met de uitrukkleding die momenteel wordt gebruikt door Nederlandse brandweerlieden (conform EN 469). Twee bachelorthesisprojecten hebben zich gericht op de algoritmes van het PHS-model die online beschikbaar zijn.

Een van deze projecten concentreerde zich op de versie ontwikkeld aan de Universiteit van Lund ([https://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk\\_miljoe/PHS/PHS.html](https://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PHS/PHS.html)). Die versie werd aangepast om eenvoudiger tijdstappen en condities buiten het standaard geldigheidsbereik van het PHS-model toe te staan (<https://github.com/Rikuklane/PredictedHeatStrainModel>). Dit project werd uitgevoerd door Jacobs (2024).

Het tweede project richtte zich op de versie van het PHS-model van FAME Lab (<https://www.famelab.gr/research/downloads/>), waarbij het werk is uitgevoerd door Klomp (2024). Omdat de versie van FAME Lab destijds onvoldoende tijdstappen toestond voor alle

geteste scenario's, en er tevens interesse was om beide PHS-versies te vergelijken, werden voor de NBB- en GBB-scenario's in beide gevallen tijdsgewogen gemiddelde waarden van omgevingscondities en activiteitsniveaus gebruikt. Inmiddels is er een nieuwe versie van het FAME Lab PHS-model beschikbaar, conform de laatste PHS-standaard (ISO 7933:2023) (<https://www.habitatscience.org/>), die wel voldoende tijdstappen ondersteunt.

Hoewel beide evaluaties een duidelijke indicatie gaven van de te verwachten prestaties van het PHS-model, is een gedetailleerde validatie aan de hand van de testresultaten uit deze studie noodzakelijk om het model en de norm verder te verbeteren. Daarom verwijst dit rapport uitsluitend naar beide bachelortheses en worden hun samenvattingen opgenomen in Bijlage 1 (Jacobs, 2024) en Bijlage 2 (Klomp, 2024).

## 1.4 Testomgeving

De luchtsnelheid in alle geteste condities bleef onder de 0,2 m/s. Dit betekent dat natuurlijke convectie, activiteitgerelateerde luchtbeweging rond het lichaam en het pompeffect in de kleding de overheersende factoren waren met betrekking tot luchtbeweging. In alle condities werd tijdens de herstelperiode de kledingcombinatie REC (Tabel 1.3) gedragen.

### 1.4.1 Technische hulpverlening – warm (THW)

Er werd gebruikgemaakt van kledingsets Trad\_THW en Mod\_C9A\_THW met een totaalgewicht van ongeveer 10 kg (Tabel 1.3). Elke kledingset werd door vier proefpersonen (PP) gedragen. De voorbereiding, de testen en het herstel werden uitgevoerd bij dezelfde luchttemperatuur. De luchttemperatuur ( $T_a$ ) werd ingesteld op 25 °C en was aanvankelijk gelijk aan de gemiddelde stralingstemperatuur ( $T_r$ ). De relatieve vochtigheid (RV) werd ingesteld op 60 % (de waterdampspanning bij deze temperatuur moest 2,8 kPa zijn).

De taken bestonden uit 30 minuten lichte activiteit, overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 2,1 km/u met beschermende kleding van 10 kg, 60 minuten middelzware activiteit, overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 3,5 km/u met beschermende kleding van 10 kg, en 30 minuten lichte activiteit zittend tijdens het herstel (zie Tabel 1.4 voor gedetailleerde procedures). Tijdens de tweede helft van de middelzware activiteit (lopen met 3,5 km/u) werd een stralingsbelasting van 1 kW/m<sup>2</sup> toegepast (stralingspaneel ingesteld op een afstand van 1,5 meter van de verwachte bovenarmpositie van de PP).

### 1.4.2 Natuurbrandbestrijding (NBB)

De voorbereiding van de PP vond plaats bij 18 °C. Er werd gebruikgemaakt van kledingsets Trad\_NBB en Mod\_C8\_NBB met een totaalgewicht van ongeveer 11 kg (Tabel 1.3). De luchttemperatuur ( $T_a$ ) in de klimaattent werd ingesteld op 30 °C. De stralingsbelasting onder deze omstandigheden werd vanaf het begin ingesteld op 1 kW/m<sup>2</sup>. De relatieve vochtigheid (RV) werd ingesteld op 50 % (de dampspanning bij deze temperatuur moest 2,1 kPa zijn).

De taken bestonden uit 10 minuten lichte activiteit, overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 2,1 km/u met beschermende kleding van 11 kg, 15 minuten middelzware activiteit (overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 3,5 km/u met beschermende kleding van 11 kg), 15 minuten zware activiteit (overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 4,5 km/u met

beschermende kleding van 11 kg), 15 minuten middelzware activiteit (lopen met een snelheid van 3,5 km/u), 15 minuten zware activiteit (lopen met een snelheid van 4,5 km/u), gevolgd door 20 minuten lichte activiteit (lopen met een snelheid van 2,1 km/u). Tijdens de eerste ronde zware activiteit en de tweede ronde van middelzware activiteit kreeg de proefpersoon afwisselende IR-straling van 3 kW/m<sup>2</sup> gedurende 2 minuten en 1 kW/m<sup>2</sup> gedurende 3 minuten (in totaal 30 minuten). De IR-straling werd gecreëerd door het stralingspaneel te verplaatsen van 1,5 naar 0,5 meter vanaf de verwachte bovenarmpositie van de PP. De test eindigde met een hersteltijd van 30 minuten, zittend bij kamertemperatuur (18 °C) zonder stralingsbelasting.

### 1.4.3 Gebouwbrandbestrijding (GBB)

De voorbereiding werd gedaan bij 18 °C. De kledingsets Trad\_GBB en Mod\_C4\_GBB met ademluchttoestel en een gewicht van ongeveer 20 kg werden gebruikt tijdens de hitteblootstelling, en dezelfde set zonder ademluchttoestel en handschoenen (vergelijkbaar met C7 (Kuklane et al., 2022)), Mod\_C7\_GBB-Pre, werd gebruikt tijdens de voorbereiding op de fietsergometer, ingesteld op 50 W en door de proefpersoon op 60 rotaties per minuut gehouden.

De luchttemperatuur ( $T_a$ ) in de klimaattent werd ingesteld op 45 °C en was aanvankelijk gelijk aan de gemiddelde stralingstemperatuur ( $T_r$ ). De relatieve vochtigheid (RV) werd ingesteld op 40 % (de dampspanning bij deze temperatuur moest 3,8 kPa zijn). Het experiment startte bij kamertemperatuur (18 °C) met licht-middelzwaar activiteit op de fietsergometer gedurende 18 minuten. Vervolgens trok de proefpersoon ademluchttoestel en handschoenen aan en betrad de klimaattent. De proefpersoon begon met middelzware activiteit, overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 3,1 km/u, met 20 kg beschermende uitrusting gedurende de eerste 10 minuten. Dit werd gevolgd door een 20 minuten durende afwisseling van zware activiteit (overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 4,0 km/u) gedurende 5 minuten en zeer zware activiteit (overeenkomend met lopen op een loopband met een snelheid van 5,4 km/u) gedurende 5 minuten.

Tijdens de eerste 10 minuten van zware en zeer zware activiteit werd de proefpersoon regelmatig (elke tweede minuut gedurende een minuut) blootgesteld aan IR-straling. Het stralingspaneel werd op een afstand van 0,23 meter van de verwachte bovenarmpositie van de PP geplaatst, waardoor op dat punt een warmtebelasting van 4 kW/m<sup>2</sup> ontstond. IR-straling werd gecreëerd door het stralingspaneel naar de PP toe en van de PP af te draaien. De blootstelling eindigde met een herstelperiode van 30 minuten in zittende houding bij 18 °C.

## 1.5 Stopcriteria

De deelnemers mochten de test op elk gewenst moment en zonder opgaaf van reden beëindigen. Zij waren verplicht de test te beëindigen als de rectale temperatuur ( $T_{rec}$ ) 39,0 °C bereikte, of als de huidtemperatuur op een van de meetpunten 43,0 °C bereikte.

Indien de onderzoeksleider onveilige situaties constateerde, zoals onduidelijke communicatie of afwijkingen in het looppatroon, had deze ook het gezag om de test onmiddellijk stop te zetten.

## 1.6 Ethische afwegingen

De studie werd opgezet in overeenstemming met de Verklaring van Helsinki (<https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki/>). De onderzoeksprocedures werden goedgekeurd door de Wetenschappelijke en Ethische Toetsingscommissie (VCWE) van de Vrije Universiteit Amsterdam (VCWE-2023-134R1).

Na een mondelinge toelichting kregen de proefpersonen de tijd om na te denken over hun deelname. Zij vulden een anamneseformulier in en stuurden dit ter beoordeling naar een onafhankelijke arts. Voorafgaand aan het eerste experiment ondertekenden zij een schriftelijk toestemmingsformulier.

## 1.7 Procedures

De studie werd opgezet volgens een 'Latijns-vierkant-ontwerp'<sup>7</sup>, maar vanwege de beschikbaarheid van de proefpersonen (PP) op de dagen dat de klimaattent beschikbaar was, waren enige aanpassingen in de volgorde van blootstelling noodzakelijk. Tabel 1.4 toont de activiteiten binnen de drie gesimuleerde incidentscenario's. De voorbereidingen begonnen ongeveer een uur vóór de start van het experiment en de procedures na afloop duurden ongeveer 30 minuten.

De deelnemers werd gevraagd om gedurende 24 uur vóór de testsessie geen zware inspanning te verrichten en alcohol of cafeïne te vermijden. Na aankomst werd de PP naar de voorbereidingsruimte geleid en kreeg hij informatie over de test van die dag. Hij kreeg ongeveer 30 minuten om tot rust te komen, waarbij hij 0,5 liter water kreeg om vooraf te drinken. In deze periode werd een passend gezichtsmasker gekozen voor het meten van zuurstofverbruik (VO<sub>2</sub>).

Ongeveer 30 minuten na aankomst kreeg de PP de rectale sensor uitgereikt, waarbij werd uitgelegd hoe deze moest worden ingebracht. Er werd geadviseerd om eerst naar het toilet te gaan om te plassen en zich te ontlasten vóór het inbrengen van de rectale sensor. Bij terugkomst werd de kabel van de rectale sensor met een huidvriendelijke chirurgische tape (3M™ Blenderm™ Surgical Tape 1525) op de rug bevestigd.

Bij het eerste bezoek werden de lichaamslengte en de huidploidiktes op vier plaatsen (biceps, triceps, subscapulaire regio en bekkenkam) gemeten om het lichaamsvetpercentage te berekenen volgens Durnin en Womersley (1974). Daarna werd de PP in ondergoed (boxershort) gewogen.

Na het wegen werden de huidtemperatuursensoren, aangesloten op één MSR145W2D- (WiFi) en één MSR145WD- (Bluetooth) logger (MSR Electronics GmbH, Seuzach, Zwitserland), met tape op de huid bevestigd op acht meetpunten (zie Figuur 1.3). Vervolgens werd een borstband met de Polar H10-hartslagzender bevestigd, waarna de PP de testkleding kon aantrekken.

---

<sup>7</sup> Een Latijns vierkant-ontwerp is een experimentele methode die een  $n \times n$  raster gebruikt om experimentele eenheden te organiseren, met  $n$  verschillende behandelingen, zodat elke behandeling precies één keer voorkomt in elke rij en elke kolom. Dit ontwerp wordt vaak gebruikt in experimenten waar het weer, omgevingscondities, locaties of proefpersonen een rol spelen.

Tabel 1.4 Inspanningsprotocollen voor THW, NBB en GBB

Tijd vanaf start	THW Vorbereiding, testen en herstel bij 25 °C en 60 % RV	Tijd vanaf start	NBB Vorbereiding en herstel bij ~18 °C, testen bij 30 °C en 50 % RV	Tijd vanaf start	GBB Vorbereiding, warming-up en herstel bij ~18 °C, testen bij 45 °C en 40 % RV
00:00	Lichte werkzaamheden, lopen 2.1 km/u	00:00	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup> aan; Lichte werkzaamheden, lopen 2.1 km/u	00:00	Lichte-middelzware werkzaamheden, lopen 2.7 km/u bij kamertemperatuur
		00:10	Middelzware werkzaamheden, lopen 3.5 km/u	00:18	Ademluchttoestel omhangen, persoon wegen en naar klimaattent
		00:25	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup> ; Zware werkzaamheden, lopen 4.5 km/u	00:20	Middelzware werkzaamheden, lopen 3.1 km/u
		00:27	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup>		
00:30	Middelzware werkzaamheden, lopen 3.5 km/u	00:30	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup>	00:30	Zware werkzaamheden, lopen 4,0 km/u
		00:32	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup>	00:31	IR straling 4 kW/m <sup>2</sup> aan
				00:32	Geen straling
		00:35	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup>	00:33	IR straling 4 kW/m <sup>2</sup>
				00:34	Geen straling
		00:37	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup>	00:35	IR straling 4 kW/m <sup>2</sup> ; Zeer zware werkzaamheden, lopen 5,4 km/u
				00:36	Geen straling
		00:40	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup> ; Middelzware werkzaamheden, lopen 3.5 km/u	00:37	IR straling 4 kW/m <sup>2</sup>
				00:38	Geen straling
		00:42	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup>	00:39	IR straling 4 kW/m <sup>2</sup>
				00:40	IR straling uit; Zware werkzaamheden, lopen 4,0 km/u
		00:45	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup>	00:45	Zeer zware werkzaamheden, lopen 5,4 km/u
		00:50	IR straling 3 kW/m <sup>2</sup>	00:50	Herstel, zittend rusten handschoenen, helm en jas uit
00:52	IR straling 1 kW/m <sup>2</sup>				
01:00	IR straling aan, 1 kW/m <sup>2</sup>	00:55	Zware werkzaamheden, lopen 4.5 km/u		
		01:10	Lichte werkzaamheden, lopen 2.1 km/u		
01:30	IR straling uit; Herstel, zittend rusten handschoenen, helm en jas uit	01:30	IR straling uit; Herstel, zittend rusten handschoenen, helm en jas uit	01:20	Einde test, dataverzameling stoppen
02:00	Einde test, dataverzameling stoppen	02:00	Einde test, dataverzameling stoppen		

Het operationeel uniform (OU; het standaard kazernetenu van Nederlandse brandweerlieden, set C2 in Kuklane et al., 2022) werd onder alle combinaties van buitenlagen gedragen. Na het aantrekken van het OU en de schoenen werd een temperatuursensor op

de laterale bovenarm, boven op het OU, bevestigd. Na het aantrekken van de buitenlaag werd er ook een sensor op de buitenlaag ter hoogte van de laterale bovenarm geplaatst. Vervolgens werd het gezichtsmasker voor VO<sub>2</sub>-metingen aangebracht en tot slot werden de helm en handschoenen aangetrokken. Voordat verdere stappen werden ondernomen, werd gecontroleerd of de signalen van de meetinstrumenten binnenkwamen en correct werden geregistreerd. Voor de start van het experiment, en telkens vóór of na het wisselen van omgeving of kleding, werd de PP opnieuw gewogen om de verdamping tijdens de taakperiodes (voorbereidende werkzaamheden, inspanning en herstel) en het totale lichaamsvochtverlies te kunnen schatten. Tijdens inspanning en herstel mocht er niet gedronken worden. Direct na de laatste weging werd water aangeboden.

## 1.8 Proefpersonen

Op basis van eerdere studies werd aangenomen dat acht proefpersonen (PP) voldoende zouden moeten zijn voor dit type experimenten, waarbij de PP tot een relatief homogene groep behoren. De PP werden geworven onder operationeel actieve brandweerlieden via directe contacten met vertegenwoordigers van de veiligheidsregio's. De PP waren gezonde en fitte mannelijke brandweerlieden, in het bezit van een geldig PPMO (Periodiek Preventief Medisch Onderzoek), die actief in dienst waren en vertrouwd met de werkzaamheden en gebruikte uitrusting. De beoogde leeftijdscategorie was van 18 tot (bij voorkeur) onder de 45 jaar. Op hogere leeftijd worden namelijk meer gezondheidseffecten verwacht. In verband met een beperkt aantal proefpersonen werd de genoemde bovengrens echter afhankelijk gesteld van de individuele gezondheidstoestand, en niet van de leeftijd. Als iemand het PPMO met goed gevolg had doorlopen – en dus goedgekeurd was voor actieve dienst – en tijdens het gesprek met de studiebegeleiders geen gezondheidsproblemen naar voren kwamen (in het bijzonder geen die de normale thermoregulatie zouden beïnvloeden), dan werd aangenomen dat de experimentele omstandigheden van deze studie ook voor oudere deelnemers goed te doen waren.

Uitsluitingscriteria voor deelname aan het onderzoek waren roken en een leeftijd onder de 18 jaar. Alle proefpersonen waren man, omdat de temperatuurvariatie bij vrouwen groter is, wat het vergelijken van resultaten complexer maakt – zeker in een kleine steekproef.

Er waren 10 PP beschikbaar voor de studie. De helft van hen was ouder dan 40 jaar (zie Tabel 1.5). Eén PP viel uit wegens ziekte aan het begin van het onderzoek, en een andere miste de laatste geplande test door griep. Uiteindelijk konden we de tests uitvoeren met acht PP in alle gesimuleerde scenario's: vier met het momenteel gebruikte (traditionele, Trad) en vier met het prototype van het modulaire (Mod, met dubbele jaslagen) kledingpakket. In de gesimuleerde NBB- en GBB-scenario's deed een extra persoon (PP6) de test met set Mod (zie Tabel 1.5).

De antropometrische gegevens van de proefpersonen zijn weergegeven in Tabel 1.5. Elke deelnemer nam deel aan drie sessies met telkens minstens één volledige dag ertussen; elke sessie duurde ongeveer 3 à 4 uur, inclusief voorbereiding en afronding.

**Tabel 1.5 Proefpersoongegevens testcondities**

Proefpersoon	Leeftijd	Gewicht	Lengte	BMI	A <sub>Du</sub>	Vet	Kleding
	<i>jaar</i>	<i>kg</i>	<i>m</i>		<i>m<sup>2</sup></i>	<i>%</i>	
1	29	98.1	1.84	29.1	2.21	18.5	Mod
3	19	66.7	1.87	19.0	1.89	12.9	Trad
4	48	96.6	1.83	28.9	2.19	26.9	Trad
5	58	93.4	1.83	28.0	2.16	28.9	Mod
6*	47	88.9	1.85	25.8	2.12	16.6	Mod
7	31	104.7	1.83	31.1	2.26	23.6	Mod
8	51	105.8	1.94	28.1	2.37	26.7	Trad
9	38	74.7	1.83	22.3	1.96	16.1	Trad
10	53	71.2	1.71	24.1	1.82	15.1	Mod
Gemiddelde tot	41.6	88.9	1.84	26.3	2.11	20.6	
SD tot	13.0	14.6	0.06	3.8	0.18	6.0	
Gemiddelde Mod	43.6	91.3	1.81	27.6	2.11	20.5	
SD Mod	13.0	12.7	0.06	2.7	0.17	5.7	
Gemiddelde Trad	39.0	86.0	1.87	24.6	2.10	20.6	
SD Trad	14.4	18.3	0.05	4.7	0.22	7.2	
Gemiddelde <40 jaar	29.3	86.1	1.84	25.4	2.08	17.8	
SD <40 jaar	7.8	18.2	0.02	5.7	0.18	4.5	
Gemiddelde >40 jaar	51.4	91.2	1.83	27.0	2.13	22.8	
SD >40 jaar	4.4	12.8	0.08	2.0	0.20	6.5	

\* PP nam vanwege ziekte niet deel aan het THW-scenario

Mod – modulaair kledingsysteem; Trad – traditioneel kledingsysteem; BMI – body mass index; A<sub>Du</sub> – lichaamsoppervlak, vetpercentage lichaam % berekend op basis van huidplooidikte (Durnin en Womersley (1974)).

## 1.9 Statistiek

Bij het plannen van de tests zijn de aanbevelingen uit EN 17558:2023, Bijlage A over experimenteel ontwerp en statistische toetsing gevolgd. De studie werd opgezet als een vergelijkend onderzoek, gericht op het in kaart brengen van de verschillen bij het gebruik van

verschillende soorten brandweeruitrusting en het valideren van thermofysiologische modellen. Door de invloed van een instabiele omgeving tijdens verschillende tests nam de variatie in afhankelijke variabelen toe. Daarom werd er sterk gefocust op de ontwikkelingstrends in de fysiologische gegevens, zoals factoren gerelateerd aan thermische belasting. In dit rapport ligt de nadruk dan ook op beschrijvende statistiek (gemiddelden, standaarddeviatie).

# 2 Resultaten en discussie

## 2.1 Omgeving

Tijdens de testperiode in december 2023 was het weer buiten relatief stabiel rond +10 °C. In januari 2024 werd het echter kouder, met buitentemperaturen rond de -10 °C. Aangezien de ruimte rondom de klimaattent niet verwarmd was, beïnvloedde het buitenklimaat de temperatuur tijdens de voorbereiding en herstelperioden van de NBB- en GBB-condities, evenals de gesimuleerde voorbereidende activiteiten van GBB tijdens de laatste tests. Voor THW werd dit effect vermeden, omdat voorbereiding en herstel in de gecontroleerde klimaattent plaatsvonden.

Gedurende enkele van de laatste testdagen functioneerde de vochtigheidsregeling van de klimaattent niet goed, waardoor de luchtvochtigheid volledig afhankelijk werd van de buitenlucht. Dit effect was duidelijk zichtbaar in de lager gemeten luchtvochtigheid. Hierdoor werd de verdampingswarmteafvoer beïnvloed, aangezien deze wordt bepaald door het verschil in waterdampdruk tussen de huid en de omgevingslucht (Tabellen 2.1 t/m 2.3). In THW en GBB was de waterdampdruk in de lucht tijdens de getroffen tests tot wel twee keer zo laag als bij andere tests, en in NBB zelfs ongeveer drie keer zo laag. Helaas konden de tests niet worden uitgesteld of herhaald.

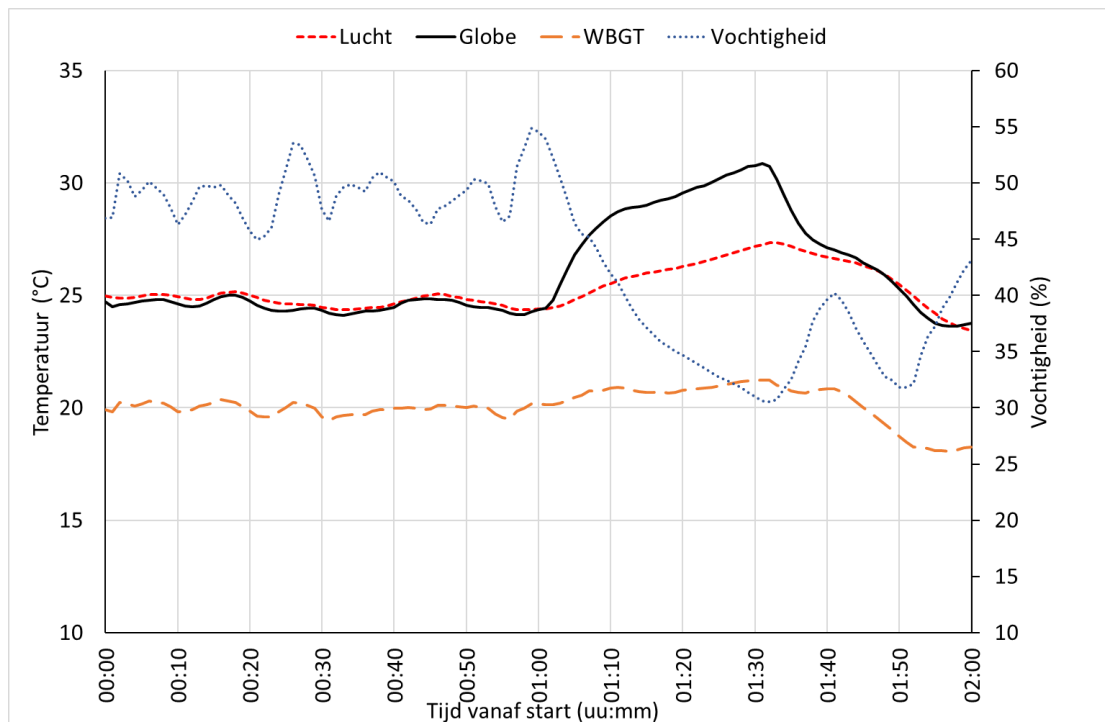
Wat betreft de klimaatregeling in de testruimte trad er altijd enige vertraging op bij het regelen van het binnenklimaat in verband met het aan- of uitzetten van het stralingspaneel (figuren 2.1 t/m 2.3). Het effect van het inschakelen van de stroombron had een groter effect op de omgeving bij lagere testtemperaturen (THW) en een kleiner effect bij hogere temperaturen (GBB). Bij NBB begon de temperatuurstijging al direct bij aanvang, omdat het paneel toen werd ingeschakeld en de stralingskracht die de proefpersoon bereikte werd aangepast door de afstand van het paneel te veranderen. De temperatuurstijging stabiliseerde pas na ongeveer één uur.

### 2.1.1 THW

De luchtsnelheid in de klimaattent bleef bij alle tests steeds rond de 0,10 m/s. Figuur 2.1 toont de gemiddelde temperatuur- en vochtigheidstrends voor alle THW-blootstellingen. Tabel 2.1 geeft de gemiddelde lucht- en zwarte boltemperaturen en de relatieve luchtvochtigheid weer voor verschillende periodes van de oefening en het herstel bij THW. De temperaturen konden verschillen tussen tests, en daarom worden de gemiddelde waarden per individuele test weergegeven, hoewel de omstandigheden over het algemeen relatief stabiel bleven.

De relatieve luchtvochtigheid voor PP7 en PP9 week meer af, omdat de vochtigheidsregeling van de testruimte toen een storing had. Hoewel dit de variatie in de testresultaten vergrootte, was een vergelijking van de kledingsets nog steeds mogelijk, aangezien PP7 kledingset Mod droeg en PP9 kledingset Trad, en de gemiddelden en veranderingen in fysiologische parameters op dezelfde manier werden beïnvloed. Bij een vergelijking van leeftijdgerelateerde verschillen kan er echter sprake zijn van een lichte vertekening in het

voordeel van jongere deelnemers, aangezien zowel PP7 als PP9 tot deze leeftijdsgroep behoorden.



Globe – zwarte bol temperatuur; WBGT – ‘wet bulb globe temperatuur’ (natte bol-zwarte boltemperatuur)

**Figuur 2.1 Curves van gemiddelde omgevingsparameters van alle proefpersonen tijdens het THW-scenario**

**Tabel 2.1 Gemiddelde luchttemperatuur ( $T_a$ ) en zwarte boltemperatuur ( $T_g$ ) en relatieve vochtigheid ( $RV$ ) tijdens de inspannings- en herstelperiodes van THW**

Activiteit Tijd		Lopen 2.1 km/u 0-30 min			Lopen 3.5 km/u 30-60 min			Lopen 3.5 km/u, 1 kW/m <sup>2</sup> , 60-90 min			Zitten herstel 90-120 min		
Parameter		$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)
PP	Kleding												
1	Mod	25.2	25.2	56.8	24.6	24.5	56.8	25.8	28.9	51.3	27.3	27.8	43.2
3	Trad	25.2	25.1	57.7	24.2	24.2	58.6	26.2	29.5	47.8	27.1	27.4	41.9
4	Trad	24.9	24.7	48.8	24.9	24.7	49.0	26.2	29.2	36.4	24.7	25.2	39.6
5	Mod	24.7	24.5	49.3	24.7	24.6	48.9	25.9	29.7	36.1	27.0	27.6	39.9
7	Mod	24.9	24.6	32.6	24.6	24.4	33.5	25.3	27.5	23.4	24.6	25.5	18.7
8	Trad	24.7	24.4	62.1	24.7	24.4	60.8	25.8	28.6	48.6	26.5	26.8	47.3
9	Trad	25.3	24.6	32.7	25.2	24.6	33.4	26.3	29.1	23.1	25.2	25.9	18.1
10	Mod	24.1	24.0	51.5	24.3	24.1	54.1	25.5	27.0	45.5	24.3	24.8	38.3
<b>Gemiddelde tot</b>		<b>24.9</b>	<b>24.6</b>	<b>48.9</b>	<b>24.6</b>	<b>24.5</b>	<b>49.4</b>	<b>25.9</b>	<b>28.7</b>	<b>39.0</b>	<b>25.8</b>	<b>26.4</b>	<b>35.9</b>
<i>SD tot</i>		<i>0.4</i>	<i>0.4</i>	<i>11.0</i>	<i>0.3</i>	<i>0.2</i>	<i>10.7</i>	<i>0.3</i>	<i>0.9</i>	<i>11.2</i>	<i>1.3</i>	<i>1.2</i>	<i>11.1</i>
<b>Gemiddelde Mod</b>		<b>24.7</b>	<b>24.5</b>	<b>47.6</b>	<b>24.5</b>	<b>24.4</b>	<b>48.3</b>	<b>25.6</b>	<b>28.3</b>	<b>39.1</b>	<b>25.8</b>	<b>26.4</b>	<b>35.0</b>
<i>SD Mod</i>		<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>10.5</i>	<i>0.2</i>	<i>0.2</i>	<i>10.4</i>	<i>0.3</i>	<i>1.2</i>	<i>12.2</i>	<i>1.6</i>	<i>1.5</i>	<i>11.1</i>
<b>Gemiddelde Trad</b>		<b>25.0</b>	<b>24.7</b>	<b>50.3</b>	<b>24.7</b>	<b>24.5</b>	<b>50.5</b>	<b>26.1</b>	<b>29.1</b>	<b>39.0</b>	<b>25.8</b>	<b>26.3</b>	<b>36.7</b>
<i>SD Trad</i>		<i>0.3</i>	<i>0.3</i>	<i>13.0</i>	<i>0.4</i>	<i>0.2</i>	<i>12.5</i>	<i>0.2</i>	<i>0.4</i>	<i>12.0</i>	<i>1.1</i>	<i>1.0</i>	<i>12.8</i>
<b>Gemiddelde &lt;40 jaar</b>		<b>25.1</b>	<b>24.8</b>	<b>45.0</b>	<b>24.6</b>	<b>24.4</b>	<b>45.6</b>	<b>25.9</b>	<b>28.7</b>	<b>36.4</b>	<b>26.0</b>	<b>26.6</b>	<b>30.5</b>
<i>SD &lt;40 jaar</i>		<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	<i>14.2</i>	<i>0.4</i>	<i>0.2</i>	<i>14.0</i>	<i>0.4</i>	<i>0.9</i>	<i>15.3</i>	<i>1.3</i>	<i>1.1</i>	<i>14.0</i>
<b>Gemiddelde &gt;40 jaar</b>		<b>24.6</b>	<b>24.4</b>	<b>52.9</b>	<b>24.6</b>	<b>24.5</b>	<b>53.2</b>	<b>25.8</b>	<b>28.6</b>	<b>41.6</b>	<b>25.6</b>	<b>26.1</b>	<b>41.3</b>
<i>SD &gt;40 jaar</i>		<i>0.3</i>	<i>0.3</i>	<i>6.2</i>	<i>0.3</i>	<i>0.3</i>	<i>5.6</i>	<i>0.3</i>	<i>1.1</i>	<i>6.3</i>	<i>1.3</i>	<i>1.3</i>	<i>4.1</i>

Geel gemarkeerde cellen met vochtigheidsgegevens duiden op experimenten waarbij de luchtvochtigheidsregeling in de klimaattent faalde. Het herstel vond plaats in de klimaattent.

### 2.1.2 NBB

De luchtsnelheid in de klimaattent bleef tijdens alle tests steeds rond de 0,10 m/s. Tabel 2.2 toont de lucht- en zwarte boltemperaturen en de relatieve vochtigheid voor verschillende periodes van de inspanning en het herstel tijdens NBB. Alle proefpersonen beëindigden deze scenario-simulatie vóór 90 minuten blootstelling, meestal tussen de 60 en 70 minuten (van 58 tot 83 minuten). Alleen PP9 hield het vol tot 83 minuten, waardoor het mogelijk was om de gemiddelde omgevingsparameters voor het laatste inspanningsniveau van zijn blootstelling (wandelen 2,1 km/u) samen te vatten:  $T_a = 31,6$  °C,  $T_g = 36,5$  °C;  $RV = 11,3$  %.

**Tabel 2.2 Gemiddelde luchttemperatuur ( $T_a$ ) en zwarte boltemperatuur ( $T_g$ ) en relatieve vochtigheid ( $RV$ ) tijdens de inspannings- en herstelperiodes van NBB**

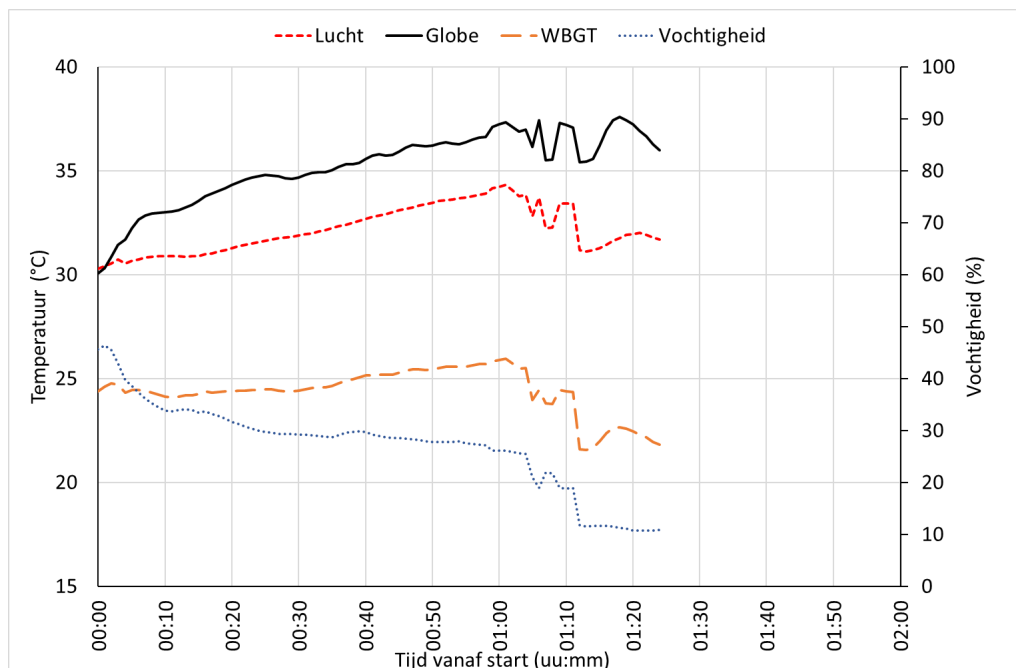
Activiteit Tijd	Parameter	Lopen 2.1 km/u, 1 kW/m <sup>2</sup> , 0-10 min			Lopen 3.5 km/u, 1 kW/m <sup>2</sup> , 10-25 min			Lopen 4.5 km/u, 1 en 3 kW/m <sup>2</sup> , 25-40 min			Lopen 3.5 km/u, 1 en 3 kW/m <sup>2</sup> , 40-55 min			Lopen 3.5 km/u, 1 kW/m <sup>2</sup> , 55-70 min			Zitten herstel 90-120 min	
		$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a=T_g$ (°C)	$RV$ (%)
PP	Kleding																	
1	Mod	29.7	30.2	53.2	31.1	33.0	51.3	34.2	36.7	49.8	37.1	39.3	49.3	38.8	40.7	48.4	21.0	63.6
3	Trad	30.0	30.8	39.0	30.1	31.5	34.3	29.7	31.2	29.3	29.7	31.5	28.2	29.9	31.8	27.6	21.0	63.6
4	Trad	33.1	32.9	39.3	30.6	30.9	37.6	30.7	32.1	37.6	31.7	33.3	36.0	32.3	33.8	35.3	20.2	37.8
5	Mod	30.1	31.3	48.2	31.6	35.4	39.3	32.8	36.3	31.3	34.0	37.2	29.6	35.2	38.2	27.2	19.2	46.1
6	Mod	30.7	34.8	45.1	33.3	37.2	31.0	34.0	37.4	28.6	35.0	38.1	28.0	35.8	39.0	27.0	20.1	38.6
7	Mod	32.1	34.2	42.3	32.7	36.6	31.6	33.9	37.3	29.2	35.3	38.5	28.1	36.3	39.4	27.1	21.3	41.9
8	Trad	30.1	29.8	39.3	29.9	31.0	35.5	29.2	30.1	32.8	29.5	31.0	31.8	29.4	31.1	29.1	19.3	49.2
9	Trad	28.7	32.1	16.7	30.1	34.8	13.4	30.9	34.9	12.1	31.1	35.0	12.0	31.1	35.5	11.9	13.6	27.6
10	Mod	30.8	31.5	21.1	31.0	35.4	16.7	33.7	38.9	12.8	36.2	41.0	10.9	37.7	42.6	10.1	13.4	30.1
<b>Gemiddelde tot</b>		<b>30.6</b>	<b>32.0</b>	<b>38.3</b>	<b>31.2</b>	<b>34.0</b>	<b>32.3</b>	<b>32.1</b>	<b>35.0</b>	<b>29.3</b>	<b>33.3</b>	<b>36.1</b>	<b>28.2</b>	<b>34.0</b>	<b>36.9</b>	<b>27.1</b>	<b>18.8</b>	<b>44.3</b>
<i>SD tot</i>		1.3	1.7	12.0	1.2	2.5	11.5	2.0	3.1	11.6	2.9	3.6	11.6	3.5	4.0	11.4	3.1	12.9
<b>Gemiddelde Mod</b>		<b>30.7</b>	<b>32.4</b>	<b>42.0</b>	<b>32.0</b>	<b>35.5</b>	<b>34.0</b>	<b>33.7</b>	<b>37.3</b>	<b>30.4</b>	<b>35.5</b>	<b>38.8</b>	<b>29.2</b>	<b>36.8</b>	<b>40.0</b>	<b>28.0</b>	<b>19.0</b>	<b>44.1</b>
<i>SD Mod</i>		0.9	2.0	12.3	1.0	1.6	12.7	0.6	1.0	13.2	1.2	1.4	13.6	1.4	1.7	13.6	3.2	12.4
<b>Gemiddelde Trad</b>		<b>30.5</b>	<b>31.4</b>	<b>33.6</b>	<b>30.2</b>	<b>32.0</b>	<b>30.2</b>	<b>30.1</b>	<b>32.1</b>	<b>28.0</b>	<b>30.5</b>	<b>32.7</b>	<b>27.0</b>	<b>30.7</b>	<b>33.0</b>	<b>26.0</b>	<b>18.5</b>	<b>44.6</b>
<i>SD Trad</i>		1.9	1.4	11.2	0.3	1.9	11.3	0.8	2.0	11.1	1.1	1.8	10.5	1.3	2.0	10.0	3.3	15.4
<b>Gemiddelde &lt;40 jaar</b>		<b>30.1</b>	<b>31.8</b>	<b>37.8</b>	<b>31.0</b>	<b>34.0</b>	<b>32.7</b>	<b>32.2</b>	<b>35.0</b>	<b>30.1</b>	<b>33.3</b>	<b>36.1</b>	<b>29.4</b>	<b>34.0</b>	<b>36.9</b>	<b>28.7</b>	<b>19.2</b>	<b>49.2</b>
<i>SD &lt;40 jaar</i>		1.4	1.8	15.3	1.2	2.2	15.5	2.2	2.8	15.5	3.5	3.6	15.3	4.2	4.0	15.0	3.7	17.7
<b>Gemiddelde &gt;40 jaar</b>		<b>31.0</b>	<b>32.1</b>	<b>38.6</b>	<b>31.3</b>	<b>34.0</b>	<b>32.0</b>	<b>32.1</b>	<b>35.0</b>	<b>28.6</b>	<b>33.3</b>	<b>36.1</b>	<b>27.3</b>	<b>34.1</b>	<b>36.9</b>	<b>25.7</b>	<b>18.5</b>	<b>40.4</b>
<i>SD &gt;40 jaar</i>		1.2	1.9	10.5	1.3	2.9	9.1	2.1	3.7	9.4	2.7	4.0	9.7	3.3	4.5	9.4	2.9	7.5

Geel en rood gemarkeerde cellen in Tabel 2.2 duiden op experimenten waarbij het weer en/of de vochtigheidsregeling het binnenklimaat aanzienlijk beïnvloedden in vergelijking met andere tests, of waar de lucht- en zwarte boltemperaturen aanzienlijk hoger of lager waren dan oorspronkelijk bedoeld. Het herstel vond buiten de klimaattent plaats.

Figuur 2.2 toont de gemiddelde temperatuur- en vochtigheidstrends voor alle NBB-blootstellingen in de testruimte. Het begin van grote temperatuursveranderingen rond de 60<sup>e</sup> minuut van de blootstelling weerspiegelt dat PP een voor een de blootstelling beëindigden, voordat de beoogde blootstellingstijd was bereikt. Dit laat ook de invloed van de omgeving op de blootstellingsduur zien, aangezien – naast verschillen die mogelijk afhankelijk zijn van individuele proefpersonen – de algemene trend aangeeft dat proefpersonen het langer volhielden bij lagere temperatuur en luchtvochtigheid.

In het NBB-scenario is er tevens een aanzienlijk verschil in gemeten lucht- en zwarte boltemperaturen tussen de verschillende inspanningsperioden en tussen individuele tests (zie Tabel 2.2). Deze bleken aanzienlijk hoger te zijn voor de Mod-kledingsets en lager voor de Trad-kledingsets, wat leidt tot een systematische bias.

De relatieve luchtvochtigheid was aanzienlijk lager voor PP9 en PP10 als gevolg van een storing in de luchtvochtigheidsregeling van de testruimte en weersomstandigheden. Aan gezien een van deze PP een Mod-kledingset droeg en de andere een Trad-kledingset, zullen deze specifieke factoren minder invloed hebben gehad op de gemiddelden per kledingset dan de temperatuur in de testruimte, die voor PP10 (Mod) gemiddeld tot 6,6 °C hoger lag dan voor PP9. Tegelijkertijd kunnen leeftijdsafhankelijke trends wel worden vergeleken, omdat de gemiddelde omgevingscondities en het aantal kledingtypes in beide groepen vergelijkbaar zijn.



Globe – zwarte bol temperatuur; WBGT – ‘wet bulb globe temperatuur’ (natte bol-zwarte boltemperatuur). De abrupte veranderingen aan het begin van de curves rond de 60e minuut van de blootstelling laten zien dat de proefpersonen de blootstelling op verschillende momenten beëindigden, voordat de beoogde blootstellingstijd werd bereikt.

**Figuur 2.2 Curves van gemiddelde omgevingsparameters van alle PP tijdens de hittestralingsblootstelling in het NBB-scenario**

Het QuesTemp-instrument werd niet verplaatst naar de herstelruimte. De omstandigheden daar bleven stabiel vanwege het grote kameroppervlak. De luchttemperatuur en luchtvochtigheid werden daar geregistreerd met een MSR-logger (Tabel 2.2) en worden niet weergegeven in Figuur 2.2. De zwarte boltemperatuur in de herstelruimte werd aangenomen gelijk te zijn aan de luchttemperatuur.

### 2.1.3 GBB

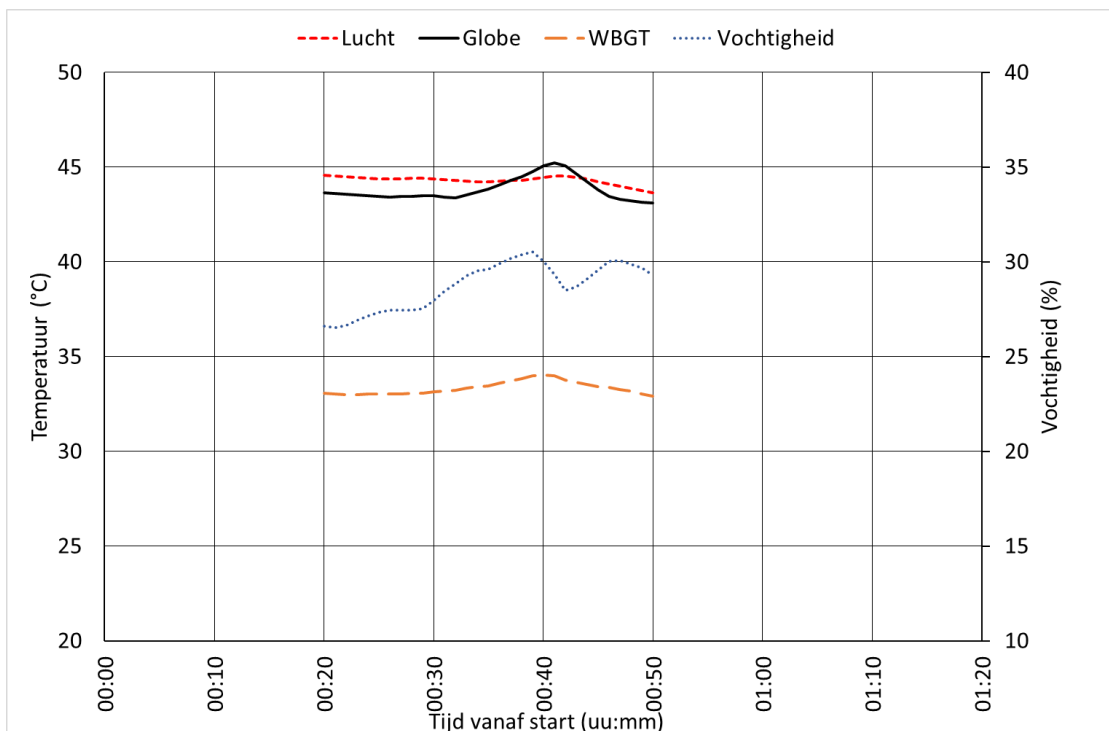
De luchtsnelheid in de klimaattent bleef voor alle testen steeds rond de 0,10 m/s. Tabel 2.3 toont de lucht- en zwarte boletemperaturen en de relatieve luchtvochtigheid voor verschillende periodes van inspanning en herstel tijdens het GBB-scenario, en Figuur 2.3 toont de gemiddelde curves van de omgevingsparameters bij hitte. Het QuesTemp-instrument werd niet geplaatst in de zone voor de gesimuleerde voorbereidende werkzaamheden en herstel. De luchttemperatuur en luchtvochtigheid in deze zones werden geregistreerd met een MSR-logger (Tabel 2.3) en zijn niet weergegeven in Figuur 2.3. De zwarte boltemperatuur buiten de klimaattent werd verondersteld gelijk te zijn aan de luchttemperatuur.

In het GBB-scenario bleven de omgevingsomstandigheden stabielere dan tijdens de andere scenario's, met uitzondering van de vochtigheidsregeling tijdens de laatste tests (Tabel 2.3, PP7, PP9 en PP10). Dit scenario kende ook de kortste blootstelling aan hitte, maar had tegelijk de hoogste temperatuur en de hoogste werkbelasting. Alle proefpersonen voltooiden de volledige beoogde blootstelling. Hierdoor bieden de omgevingsomstandigheden een goede basis voor vergelijking tussen kledingcombinaties en leeftijdsgroepen.

**Tabel 2.3 Gemiddelde lucht ( $T_a$ ) en zwarte bol ( $T_g$ ) temperaturen en relatieve luchtvochtigheid ( $RV$ ) voor de inspannings- en herstelperiodes van het GBB-scenario**

Activiteit Tijd	Fietsen 50 W, aankleden, 0-20 min	Lopen 3.1 km/u, 20-30 min			Lopen 4 km/u, 30-35 min			Lopen 5.4 km/u, 0 en 4 kW/m <sup>2</sup> , 35-40 min			Lopen 4 km/u, 0 en 4 kW/m <sup>2</sup> , 40-45 min			Lopen 5.4 km/u, 45-50 min			Zitten herstel 50-80 min			
		$T_a=T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a$ (°C)	$T_g$ (°C)	$RV$ (%)	$T_a=T_g$ (°C)	$RV$ (%)
<b>PP</b>	<b>PPC</b>																			
1	Mod	16.9	56.5	45.1	44.0	29.8	44.5	43.6	31.6	44.1	44.1	34.2	43.9	44.1	32.5	42.2	40.5	35.5	16.3	56.4
3	Trad	<b>19.5</b>	58.5	44.5	43.6	34.6	44.3	43.8	36.6	44.4	45.2	38.3	44.4	44.4	33.1	42.7	41.0	39.8	20.0	62.7
4	Trad	<b>18.4</b>	58.6	44.0	42.8	32.8	43.9	43.3	34.6	43.9	44.4	36.7	43.8	43.7	34.9	43.9	44.3	35.3	17.1	63.4
5	Mod	<b>19.0</b>	58.0	44.0	42.8	35.6	42.8	42.1	39.5	42.6	43.1	41.6	43.1	44.6	40.3	43.7	44.0	36.2	19.6	60.5
6	Mod	<b>20.2</b>	63.0	44.0	43.1	35.6	43.2	42.7	39.8	43.4	44.4	39.7	43.3	43.1	37.5	43.3	43.8	39.5	20.3	65.6
7	Mod	<b>18.3</b>	42.9	45.0	44.2	16.1	45.6	44.9	16.2	46.0	45.5	15.9	46.2	46.0	16.2	45.8	44.6	16.6	19.7	53.1
8	Trad	<b>16.5</b>	58.7	44.9	44.1	28.8	44.4	43.5	32.2	44.1	44.1	33.8	44.2	45.1	34.8	44.3	44.4	33.1	16.0	55.9
9	Trad	<b>17.1</b>	48.3	44.3	43.4	16.2	45.3	44.5	16.0	45.9	45.5	15.8	46.1	46.0	16.0	45.5	44.3	16.1	17.4	49.0
10	Mod	<b>16.6</b>	45.8	44.0	43.5	15.8	44.4	43.8	15.8	44.8	44.7	15.9	44.7	44.4	16.0	43.6	42.6	16.7	17.0	49.0
<b>Gemiddelde tot</b>		<b>18.0</b>	<b>54.5</b>	<b>44.4</b>	<b>43.5</b>	<b>27.2</b>	<b>44.3</b>	<b>43.6</b>	<b>29.1</b>	<b>44.3</b>	<b>44.5</b>	<b>30.2</b>	<b>44.4</b>	<b>44.6</b>	<b>29.0</b>	<b>43.9</b>	<b>43.3</b>	<b>29.9</b>	<b>18.1</b>	<b>57.3</b>
<i>SD tot</i>		<i>1.3</i>	<i>6.9</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>8.7</i>	<i>0.9</i>	<i>0.8</i>	<i>10.3</i>	<i>1.1</i>	<i>0.8</i>	<i>11.0</i>	<i>1.1</i>	<i>1.0</i>	<i>10.0</i>	<i>1.2</i>	<i>1.5</i>	<i>10.2</i>	<i>1.7</i>	<i>6.2</i>
<b>Gemiddelde Mod</b>		<b>18.2</b>	<b>53.2</b>	<b>44.4</b>	<b>43.5</b>	<b>26.6</b>	<b>44.1</b>	<b>43.4</b>	<b>28.6</b>	<b>44.2</b>	<b>44.3</b>	<b>29.5</b>	<b>44.2</b>	<b>44.4</b>	<b>28.5</b>	<b>43.7</b>	<b>43.1</b>	<b>28.9</b>	<b>18.6</b>	<b>56.9</b>
<i>SD Mod</i>		<i>1.5</i>	<i>8.5</i>	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	<i>10.0</i>	<i>1.1</i>	<i>1.1</i>	<i>11.9</i>	<i>1.3</i>	<i>0.9</i>	<i>12.7</i>	<i>1.3</i>	<i>1.0</i>	<i>11.7</i>	<i>1.3</i>	<i>1.6</i>	<i>11.3</i>	<i>1.8</i>	<i>6.4</i>
<b>Gemiddelde Trad</b>		<b>17.9</b>	<b>56.0</b>	<b>44.4</b>	<b>43.5</b>	<b>28.1</b>	<b>44.5</b>	<b>43.8</b>	<b>29.9</b>	<b>44.5</b>	<b>44.8</b>	<b>31.2</b>	<b>44.6</b>	<b>44.8</b>	<b>29.7</b>	<b>44.1</b>	<b>43.5</b>	<b>31.1</b>	<b>17.6</b>	<b>57.8</b>
<i>SD Trad</i>		<i>1.3</i>	<i>5.1</i>	<i>0.4</i>	<i>0.5</i>	<i>8.3</i>	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	<i>9.4</i>	<i>0.9</i>	<i>0.6</i>	<i>10.4</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>9.2</i>	<i>1.1</i>	<i>1.6</i>	<i>10.4</i>	<i>1.7</i>	<i>6.7</i>
<b>Gemiddelde &lt;40 jaar</b>		<b>17.9</b>	<b>51.6</b>	<b>44.7</b>	<b>43.8</b>	<b>24.2</b>	<b>44.9</b>	<b>44.2</b>	<b>25.1</b>	<b>45.1</b>	<b>45.1</b>	<b>26.1</b>	<b>45.2</b>	<b>45.1</b>	<b>24.5</b>	<b>44.1</b>	<b>42.6</b>	<b>27.0</b>	<b>18.3</b>	<b>55.3</b>
<i>SD &lt;40 jaar</i>		<i>1.2</i>	<i>7.2</i>	<i>0.4</i>	<i>0.3</i>	<i>9.5</i>	<i>0.6</i>	<i>0.6</i>	<i>10.6</i>	<i>1.0</i>	<i>0.7</i>	<i>11.9</i>	<i>1.2</i>	<i>1.0</i>	<i>9.7</i>	<i>1.9</i>	<i>2.1</i>	<i>12.4</i>	<i>1.8</i>	<i>5.8</i>
<b>Gemiddelde &gt;40 jaar</b>		<b>18.1</b>	<b>56.8</b>	<b>44.2</b>	<b>43.3</b>	<b>29.7</b>	<b>43.7</b>	<b>43.1</b>	<b>32.4</b>	<b>43.8</b>	<b>44.1</b>	<b>33.5</b>	<b>43.8</b>	<b>44.2</b>	<b>32.7</b>	<b>43.8</b>	<b>43.8</b>	<b>32.2</b>	<b>18.0</b>	<b>58.9</b>
<i>SD &gt;40 jaar</i>		<i>1.6</i>	<i>6.4</i>	<i>0.4</i>	<i>0.5</i>	<i>8.3</i>	<i>0.7</i>	<i>0.7</i>	<i>9.8</i>	<i>0.8</i>	<i>0.6</i>	<i>10.3</i>	<i>0.7</i>	<i>0.8</i>	<i>9.6</i>	<i>0.4</i>	<i>0.7</i>	<i>8.9</i>	<i>1.8</i>	<i>6.6</i>

Geel gemarkeerde cellen in Tabel 2.3 geven testen aan waarbij weersomstandigheden en/of het falen van de vochtigheidsregeling de omgeving significant beïnvloedden vergeleken met andere testen. Herstel vond plaats buiten de klimaattent.

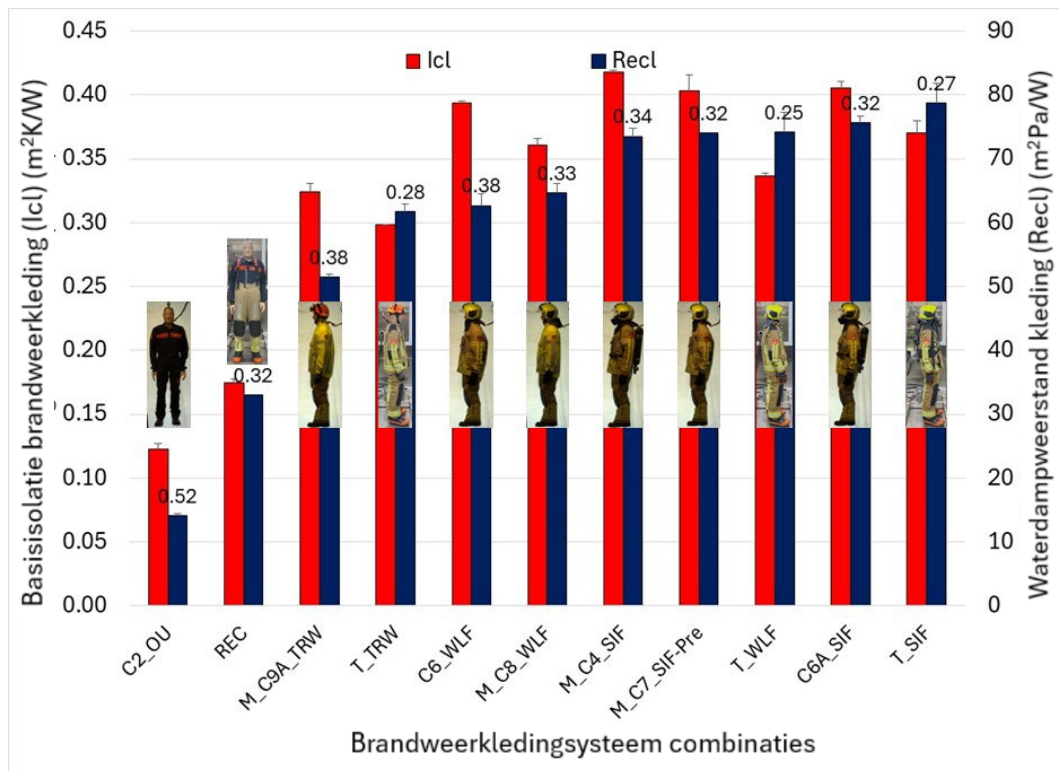


Globe – zwarte bol temperatuur; WBGT – ‘wet bulb globe temperatuur’ (natte bol-zwarte boltemperatuur).

**Figuur 2.3 Gemiddelde curves van de omgevingsparameters van alle proefpersonen tijdens de hitteblootstellingsperiode van het GBB-scenario**

## 2.2 Kleding

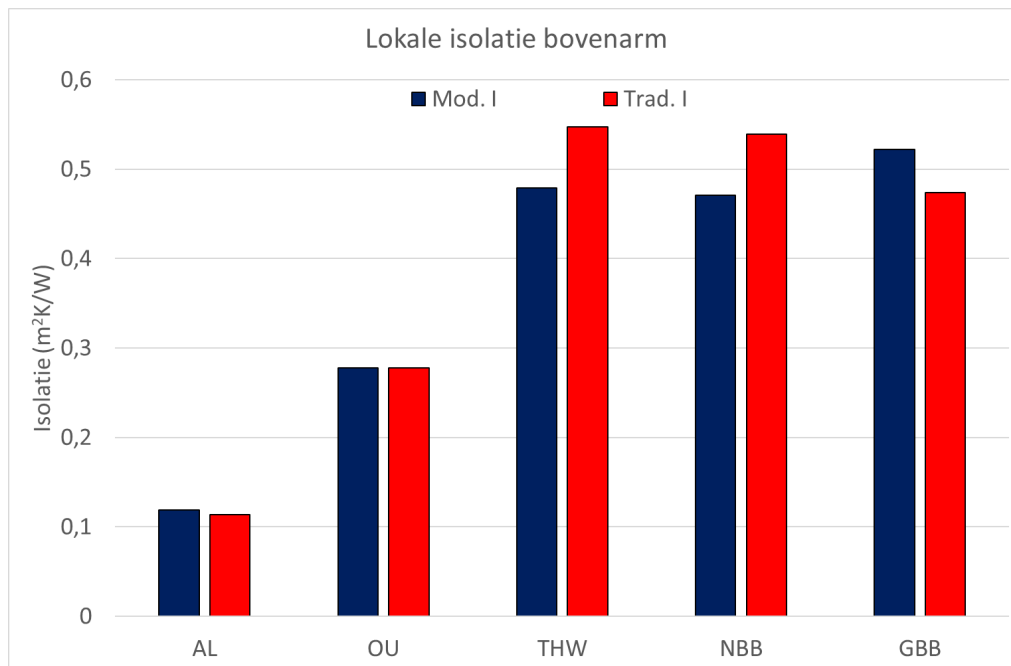
De kledingisolatie, verdampingsweerstand en permeabiliteitsindex van de kleding worden weergegeven in Figuur 2.4. Deze resultaten zijn afkomstig uit eerdere studies met een manikin en zijn afzonderlijk gerapporteerd (Kuklane et al., 2022; Kuklane et al., 2024a). De kledingsets zijn gerangschikt van de laagste naar de hoogste verdampingsweerstand. De standaardkleding (operationeel uniform, C2\_OU) is apart weergegeven, omdat deze als basislaag onder alle andere kledingsets werd gedragen. Ter vergelijking zijn ook alternatieve sets C6\_NBB en C6A\_GBB opgenomen, die vergelijkbare combinaties zijn als Trad\_NBB en Trad\_GBB en een beeld geven van de variatie in de traditioneel gebruikte brandweeruitrusting in Nederland. Om de verschillen in de resultaten te begrijpen, moeten de kleding eigenschappen als referentieparameters worden beschouwd.



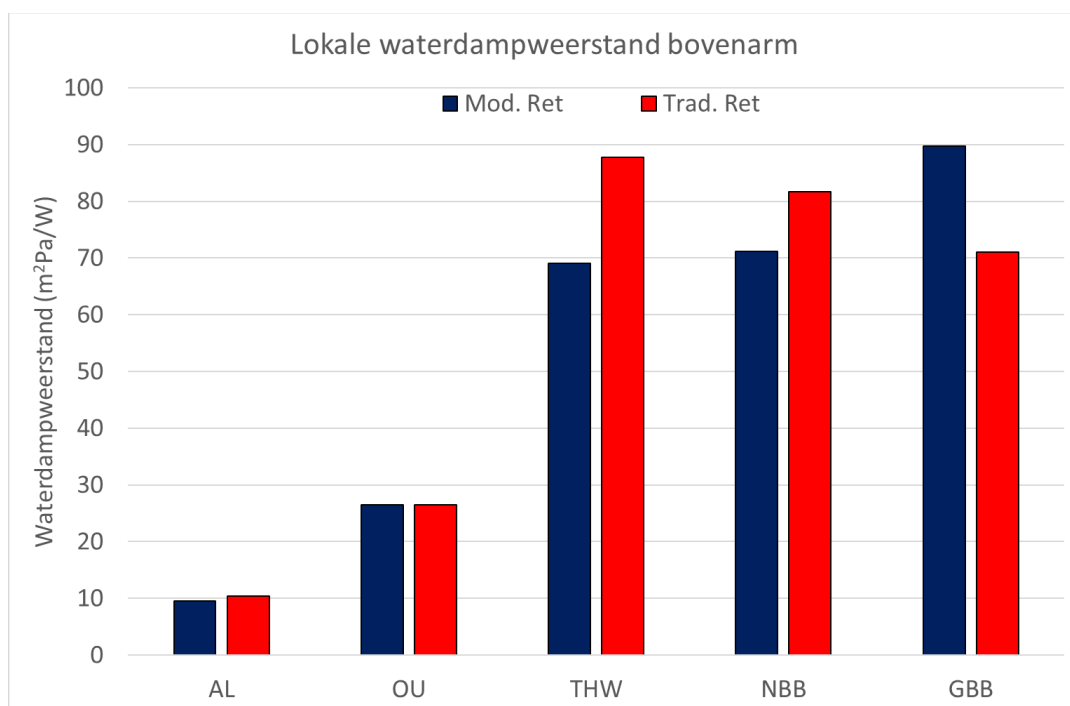
**Figuur 2.4** Basis kledingisolatie ( $I_{cl}$ ,  $m^2K/W$ ) en verdampingsweerstand van kleding ( $R_{ecl}$ ,  $m^2Pa/W$ ) van de gebruikte en vergelijkbare kledingsets; de waarden boven de kolommen geven de permeabiliteitsindex van de kleding weer

Voor details over de eigenschappen van de kledingsets, zie Kuklane et al. (2022) en Kuklane et al. (2024a). Kledingsets C6\_NBB en C6A\_GBB zijn niet gebruikt in de validatiestudie met proefpersonen, maar zijn vergelijkbare combinaties met respectievelijk Trad\_NBB en Trad\_GBB, bestaande uit componenten die eerder zijn getest (Kuklane et al. 2022).

De kleding-permeabiliteitsindex ( $i_{m,cl}$ ) is een dimensieloze gewogen verhouding tussen isolatie en verdampingsweerstand. Hoe hoger de  $i_{m,cl}$ -waarde, hoe beter het ademend vermogen. Een waarde van 0,38 is gebruikelijk voor gewone kleding in binnenomgevingen, terwijl waarden onder 0,32 wijzen op een verminderd ademend vermogen.



**Figuur 2.5 Kledingsisolatie totaal voor bovenarm van de verschillende kledingconfiguraties: AL – isolatie aanhangende luchtlaag aan de manikin**



**Figuur 2.6 Verdampingsweerstand totaal van de verschillende kledingconfiguraties voor bovenarm: AL – waterdampweerstand aanhangende luchtlaag en textiele huid op de manikin**

Tijdens de testen werd IR-straling toegepast vanaf de rechterzijde van de PP. Het dichtstbijzijnde punt ten opzichte van het stralingspaneel was de rechterbovenarm, waar de temperatuur van de buitenlaag (OL), de onderkleding (OU) en de huid werd gemeten. Voor dit punt werd de duur van de stralingsperiode ingeschat op basis van eerdere ervaringen

(Heus & den Hartog 2017, Heus et al. 2022), om te voorkomen dat de huidtemperatuur zou stijgen tot of boven de 43 °C.

Om het effect van straling en beschermende kleding op de ontwikkeling van de huidtemperatuur te beoordelen, zijn de totale kledingsisolatie en verdampingsweerstand van de locatie – dat wil zeggen: de omgeving rond de bovenarm – weergegeven in Figuur 2.5 en 2.6. Deze lokale kleding eigenschappen zijn gemeten en gedetailleerd gerapporteerd in eerdere studies met een thermische manikin (Kuklane et al. 2022, Kuklane et al. 2024a).

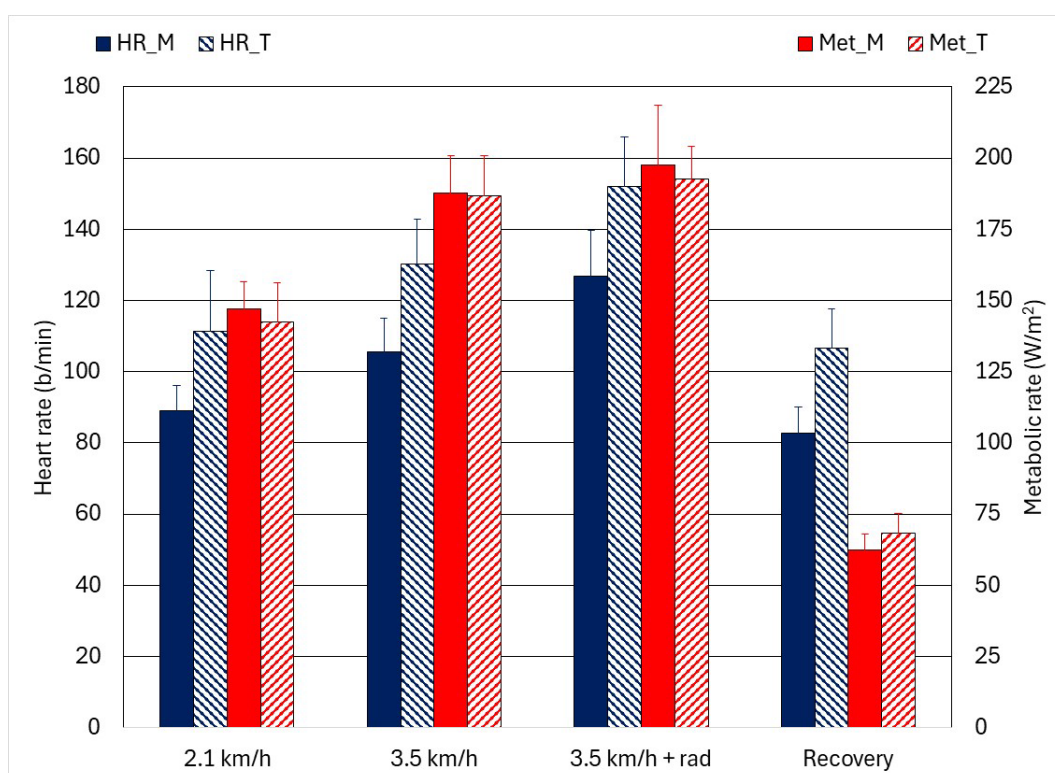
## 2.3 (Psycho)fysiologische data

Dit hoofdstuk geeft de resultaten en discussie weer van de fysiologische en subjectieve reacties van de proefpersonen voor elk gesimuleerd incidentenscenario.

### 2.3.1 THW

#### Hartslag en metabolisme

De hartslag (HR) was voor elk activiteitsniveau in kleding Mod gemiddeld ongeveer 20 slagen per minuut lager dan in kleding Trad (Figuur 2.7). De weergegeven waarden zijn de gemiddelde HR en het metabolisme (Met) voor de laatste minuut van elke activiteit.



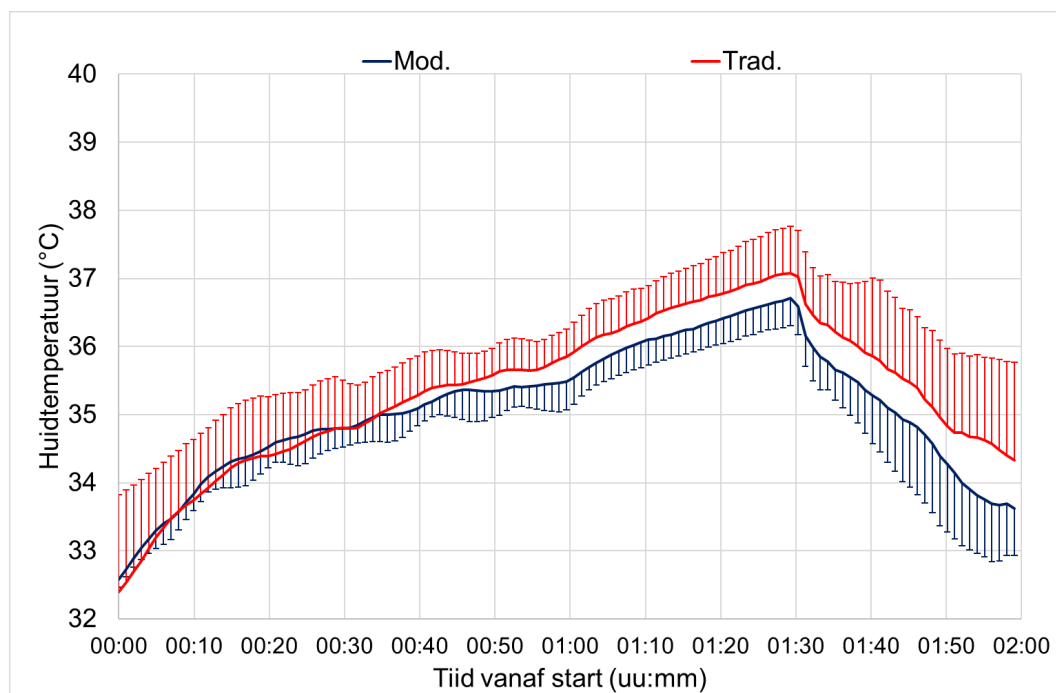
**Figuur 2.7 Hartslag en metabolisme voor Mod en Trad in THW-scenario**

De HR neemt niet alleen toe door de activiteit, maar ook in de loop van de tijd en is bovendien ongeveer 20 slagen per minuut hoger voor elke 30 minuten blootstelling aan hitte. Tijdens zittend herstel daalt de HR weliswaar, maar is na 30 minuten nog steeds slechts iets lager dan aan het einde van het eerste activiteitsniveau. Deze aanhoudende verhoging van de HR weerspiegelt duidelijk de stijging van de lichaamstemperatuur en de toegenomen hittestress.

Er is een lichte toename in metabolisme te zien bij de activiteit van 3,5 km/u, zowel zonder als met stralingsbelasting (Figuur 2.7). Een deel hiervan kan worden veroorzaakt door individuele verschillen tussen de personen in de groepen (verschillende personen droegen kledingset Mod en Trad), door een toename van het vochtgehalte in de kleding, door toegenomen wrijving tussen de lagen door vocht, en door het Q10-effect (Chaui-Berlinck, 2002)<sup>8</sup>. Deze toename is echter klein vergeleken met de veranderingen in HR. Als we in beschouwing nemen dat het metabolisme bij alle activiteiten nauwelijks verschilde tussen Mod en Trad, dan is er een aanzienlijk verschil in HR tussen Mod en Trad, wat het verschil in hittestress en cardiovasculaire belasting weerspiegelt. Dit verschil is des te belangrijker als we bedenken dat in de andere scenario's het verschil in HR tussen Mod en Trad kleiner is (Figuur 2.17 en 2.27).

### Huidtemperatuur

In het THW-scenario waren de gemiddelde huidtemperaturen bij aanvang van de blootstelling zeer vergelijkbaar (Figuur 2.8). Dit maakt het mogelijk om de toenemende verschillen tussen kleding Mod en kleding Trad in de loop van de tijd duidelijk te observeren. De verschillen namen zelfs toe tijdens het herstel, toen de jassen werden uitgedaan en de rest van de kleding vrij vergelijkbaar was (REC in Tabel 1.3). Dit laatste wijst op een hogere warmteopslag in het kledingsysteem Trad dan in Mod. De spreiding in huidtemperaturen is echter groot, waardoor de verschillen statistisch niet significant zijn. Het golvende patroon in de gemiddelde huidtemperatuur weerspiegelt schommelingen in de kamertemperatuur (Figuur 2.1).



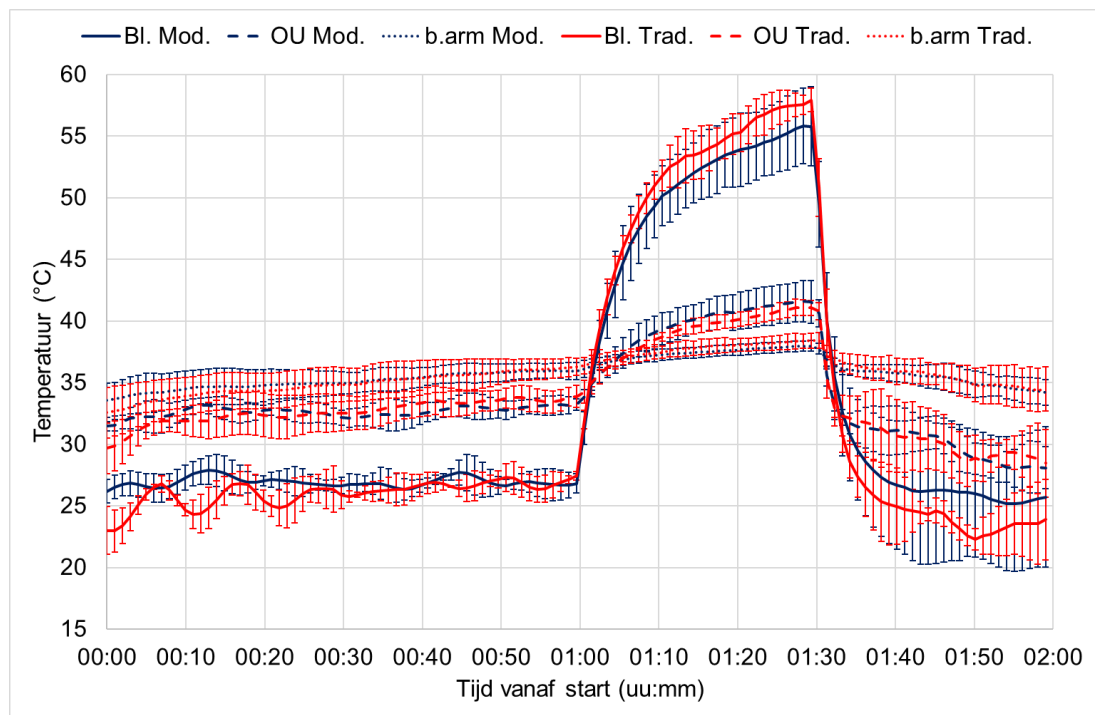
**Figuur 2.8 Gemiddelde huidtemperatuur voor het THW-scenario**

### Bovenarmtemperaturen en luchtvochtigheid van textiellagen en huidoppervlak

Dit golvende patroon is duidelijker waarneembaar in de temperatuur van de buitenste laag op de bovenarm (Figuur 2.9), waar de temperatuur door de hoge kledingisolatie slechts minimaal verschilde van de luchttemperatuur in de perioden zonder straling. Bij het begin

<sup>8</sup>  $Q_{10}$  is een maat voor temperatuurgevoeligheid gebaseerd op chemische reactiesnelheden en is van toepassing op de meeste fysiologische processen.

van een stralingsbelasting van 1 kW/m<sup>2</sup> steeg de oppervlaktetemperatuur van de buitenlaag echter met 15 °C in minder dan 5 minuten. Daarna begon de temperatuurstijging langzamer te verlopen en bereikte in de volgende 25 minuten meer dan 55 °C. De oppervlakte-temperatuur van de buitenlaag van kleding Trad bereikte een paar graden meer dan die van Mod. Dit kan te maken hebben gehad met het feit dat bij kleding Mod de sensor op een reflecterende strip was geplaatst en dat bij de meeste kledingsets Trad (zie het andere ontwerp van de buitenlaag voor Trad in Tabel 1.3) op dat punt op de bovenarm geen reflecterende strip aanwezig was.



Bl. = buitenlaag uitrukpak; OU = Operationeel Uniform; b.arm = bovenarm

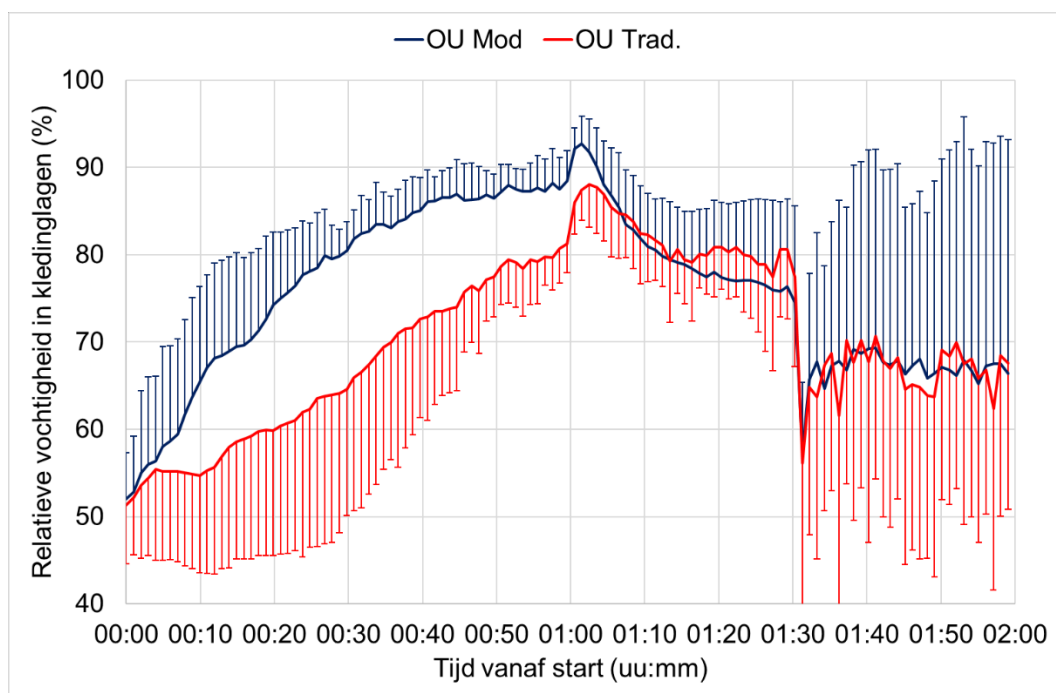
**Figuur 2.9 Huidoppervlakte- en textiellaagtemperaturen van de rechter bovenarm tijdens het THW-scenario**

Vanaf het begin van de herstelfase weerspiegelt de temperatuur van de buitenlaag de luchttemperatuur nabij de proefpersonen, omdat de jas was uitgetrokken en de sensor achter de rugleuning van de zittende proefpersonen bleef hangen.

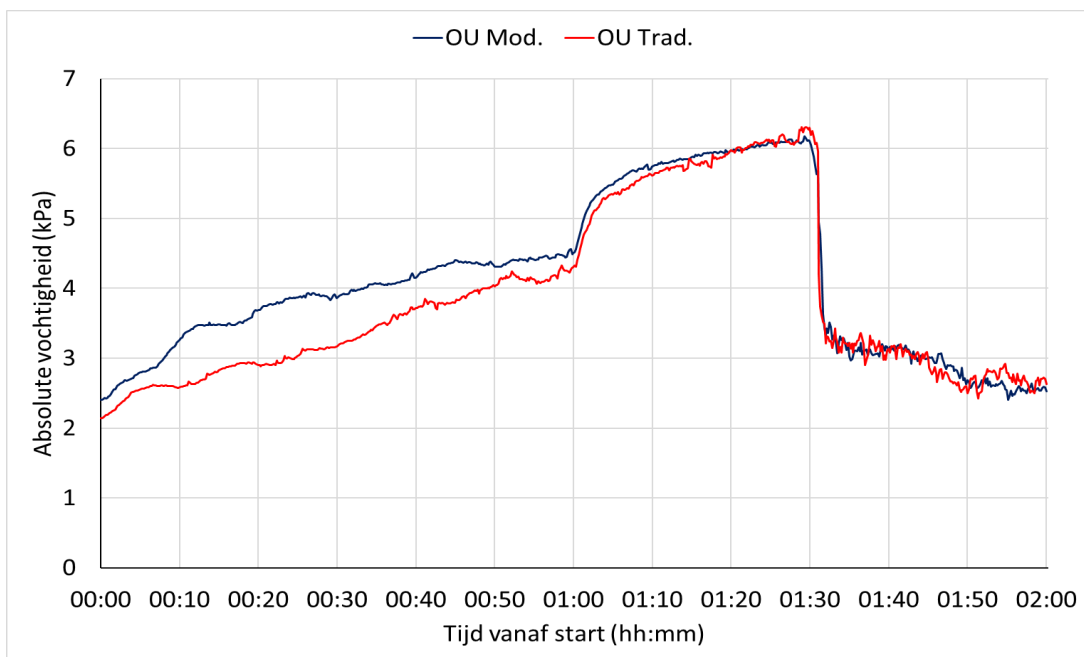
De temperaturen gemeten tussen de lagen, boven op het operationeel uniform (OU), bleven relatief vergelijkbaar bij zowel Mod als Trad, terwijl de lokale huidtemperatuur op de bovenarm tijdens straling ongeveer 0,4 °C hoger werd in Trad dan in Mod (Figuur 2.9). In geen geval bereikte de lokale huidtemperatuur waarden boven de 39 °C.

De relatieve luchtvochtigheid (RV) tussen de lagen begon toe te nemen bij de start van de inspanning en bereikte bij de start van de straling bijna de 90 % bij Trad, en bij Mod zelfs meer (Figuur 2.10). Gezien de lagere verdampingsweerstand (Tabel 1.3) en de grotere transpiratie (=verlies van lichaamsgewicht, Figuur 2.15) bij Mod dan bij Trad, wijzen deze resultaten op een discrepantie die alleen verklaard kan worden door individuele verschillen tussen de proefpersoongroepen voor Mod en Trad.

Een kleine piek in RV na 1 uur lopen en direct na het begin van de straling (2–3 minuten) kan wijzen op extra verdamping uit de buitenlaag die warmer werd, waardoor damp de vochtigheidssensor op het OU bereikte, of op een verminderde vochtafvoer uit het systeem door een toename van de absolute luchtvochtigheid aan de binnenkant van de buitenlaag (Figuur 2.11). Bij een voortdurende stijging van de OU-temperatuur daalde de RV, terwijl de absolute luchtvochtigheid bleef toenemen tot het einde van de inspanning in de hitte en het begin van het herstel, toen de jas werd uitgetrokken (Figuur 2.10 en 2.11). Omdat de absolute luchtvochtigheid bij de huid en tussen de lagen tijdens de stralingsfase beide boven of rond de 6 kPa bleef en in de omgeving rond de 1,5 kPa lag, was er geen dampbeweging richting de huid te verwachten, maar alleen naar buiten, door het kledingsysteem heen richting de omgeving.



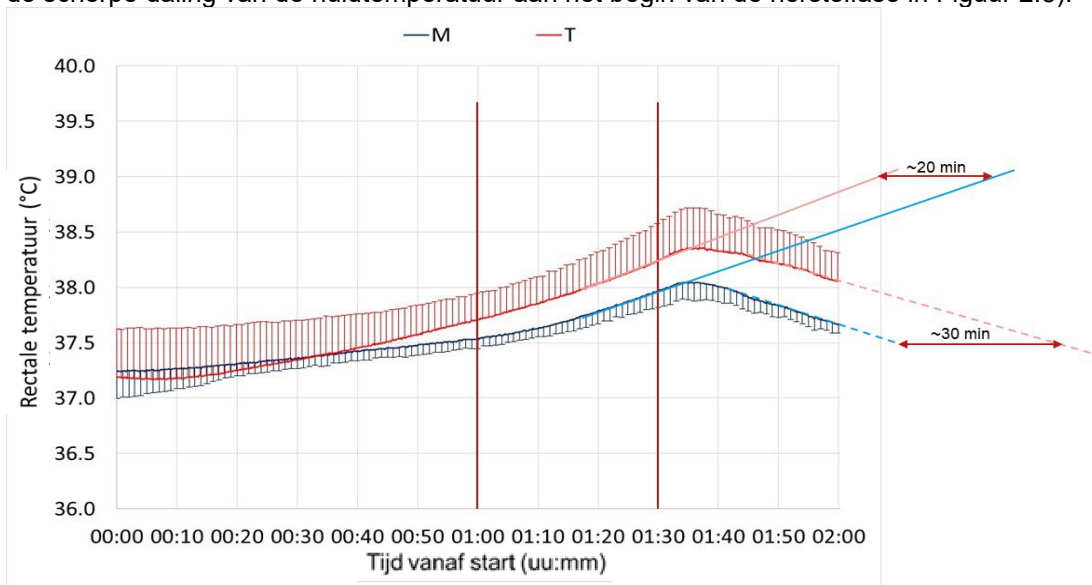
**Figuur 2.10** Relatieve luchtvochtigheid tussen de kledinglagen ter hoogte van rechter bovenarm tijdens THW-scenario



**Figuur 2.11 Absolute vochtigheid weergegeven als waterdampspanning tussen de kledinglagen gemeten op het OU ter hoogte van de rechter bovenarm tijdens het THW-scenario**

#### Rectale en gemiddelde lichaamstemperatuur

Figuur 2.12 toont de dynamiek van de rectale temperatuurontwikkeling en Figuur 2.13 die van de gemiddelde lichaamstemperatuur. Vanuit hetzelfde temperatuurniveau namen de verschillen tussen Mod en Trad in de loop van de tijd toe, waarbij in Trad een snellere stijging zichtbaar is en het verschil aan het einde van de herstelperiode het grootst is. Er is te zien dat de maximale rectale temperatuur pas na ongeveer 5 minuten in de herstelfase wordt bereikt bij beide kledingsets (Figuur 2.12). Dit kan worden verklaard doordat de warmte zich ophoopt in de oppervlakkige lichaamslagen en spieren, en doordat de warmte nog steeds door weefselgeleiding en bloedcirculatie naar de centrale delen van het lichaam blijft stromen, ondanks de toegenomen verdamping van de huid bij het uittrekken van de jas (zie de scherpe daling van de huidtemperatuur aan het begin van de herstelfase in Figuur 2.8).

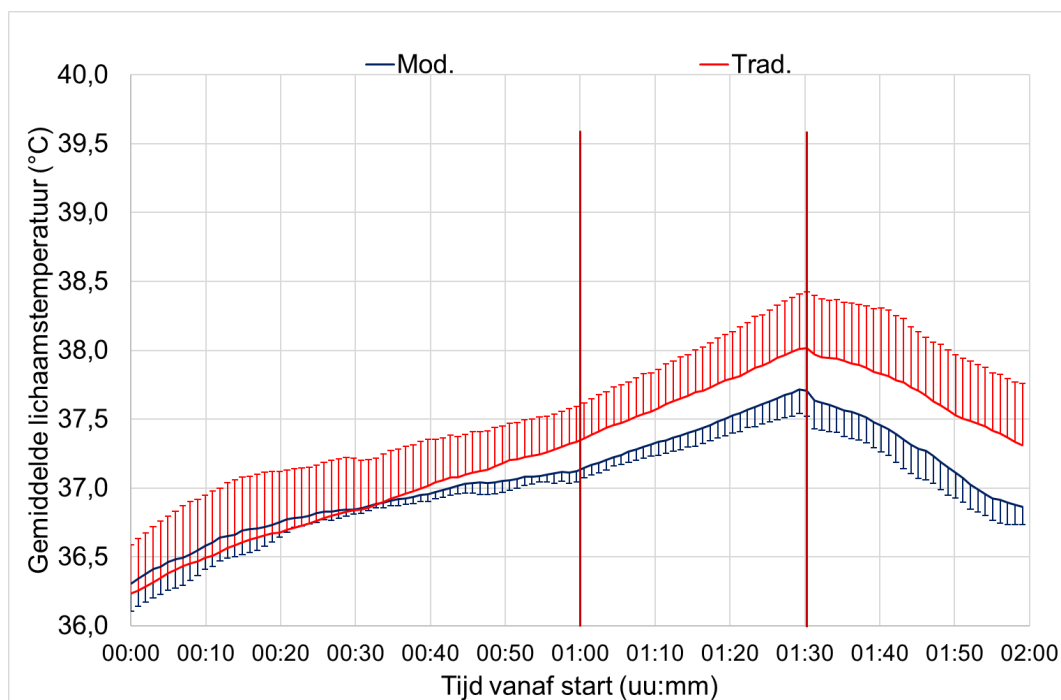


**Figuur 2.12 Rectale temperaturen voor het THW-scenario**

Doorgetrokken trendlijnen voor het einde van de blootstelling en het herstel geven de verwachte ontwikkeling van de rectale temperatuur weer tot het einde van de blootstelling (39 °C) en het herstel van de normale kerntemperatuur, vóór de start van de volgende werkperiode (37,5 °C) (M= Mod en T= Trad).

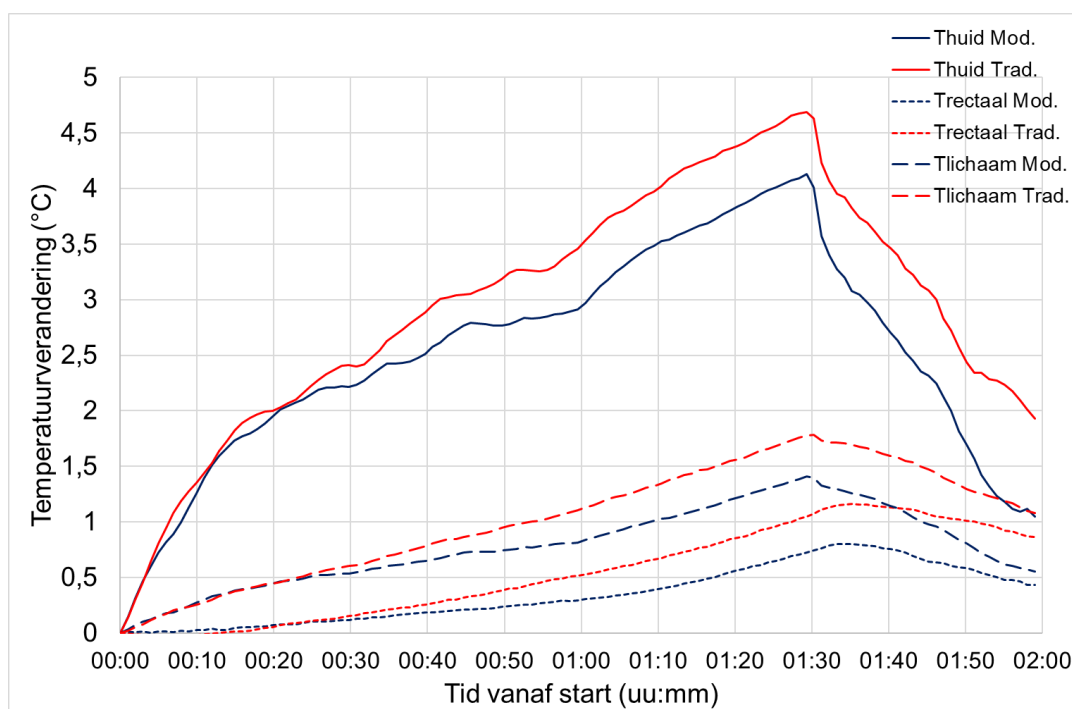
Als een rectale temperatuur van 39 °C wordt gehanteerd als criterium voor het beëindigen van de blootstelling, en aangenomen wordt dat de laatst gemeten werklast en omgevingsomstandigheden hetzelfde blijven, dan zouden de brandweermensen 20 minuten langer kunnen doorwerken in Mod dan in Trad (Figuur 2.12). De geschatte hersteltijd die nodig is om een rectale temperatuur van 37,5 °C te bereiken vóór de volgende werksessie, zou ongeveer 30 minuten korter zijn in Mod dan in Trad. Als bij een noodsituatie een rectale temperatuur van 38 °C zou worden gekozen als beoogde hersteltijd waarna een volgende werkperiode kan worden gestart (bij voorkeur een lichtere ondersteunende taak), dan is in Mod slechts een korte pauze van 10 minuten voor rehydratie nodig, terwijl in Trad de pauze nog steeds minimaal 30 minuten moet zijn.

De stijging van de gemiddelde lichaamstemperatuur (Figuur 2.13) weerspiegelt de toename van de warmte-inhoud van het lichaam. Aan het einde van de inspanning is deze gemiddeld ongeveer 16 % hoger in Trad dan in Mod; ook de warmteopslag snelheid is in Trad ongeveer 14 % hoger dan in Mod. Hoewel de temperaturen kort na de start van de herstelfase beginnen te dalen, nemen deze verschillen tussen de kledingsystemen toe tot respectievelijk ongeveer 45 en 39 %, omdat het herstel in Trad trager verloopt dan in Mod.



**Figuur 2.13 Gemiddelde lichaamstemperaturen voor het THW-scenario**

## Temperatuurveranderingen

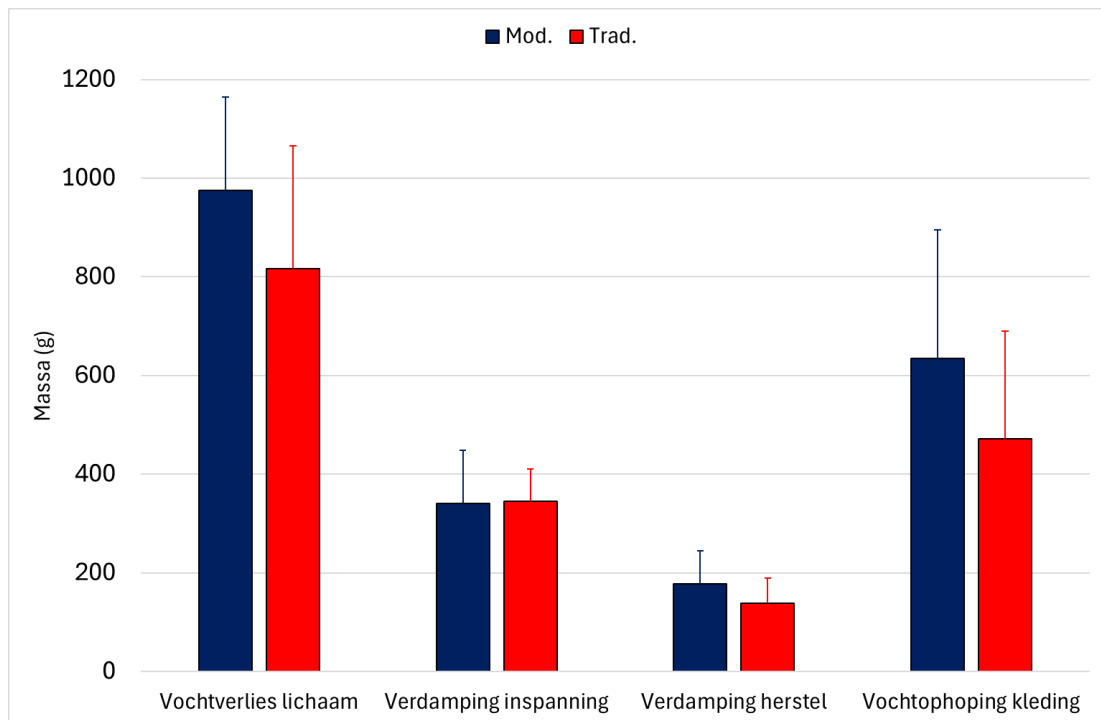


**Figuur 2.14** Verandering in kritieke temperaturen voor het THW-scenario:  $dT_{sk}$  = verandering in gemiddelde huidtemperatuur;  $dT_b$  = verandering in gemiddelde lichaamstemperatuur;  $dT_{rec}$  = verandering in rectale temperatuur

De verschillen tussen Mod en Trad worden nog duidelijker wanneer de temperatuurcurves op hetzelfde startpunt worden uitgelijnd (Figuur 2.14). Tot ongeveer de 25e minuut zijn ze praktisch gelijk en daarna beginnen ze uiteen te lopen, tot ongeveer 0,5, 0,4 en 0,3 °C aan het einde van de inspanning, en tot ongeveer 0,8, 0,6 en 0,5 °C aan het einde van de herstelperiode voor respectievelijk  $T_{sk}$ ,  $T_b$  en  $T_{rec}$ .

### **Verlies lichaamsgewicht, verdamping en geschatte vochtophoping in de kleding**

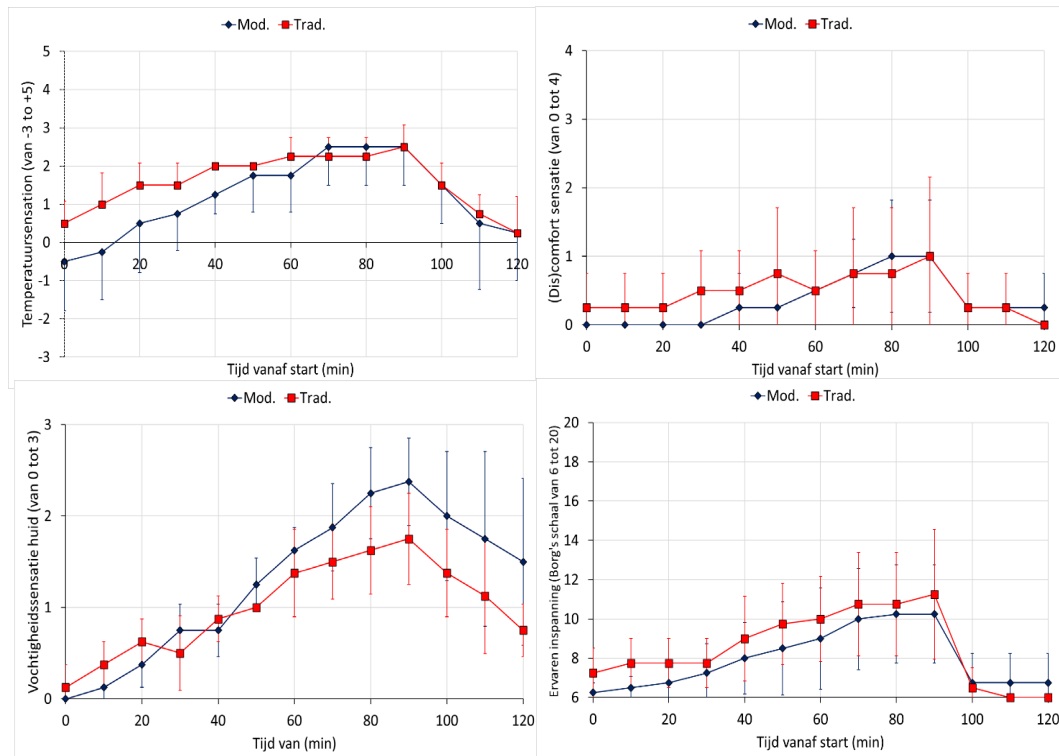
Een hoger gewichtsverlies bij kleding Mod dan bij Trad was niet verwacht (Figuur 2.15), maar zou verband kunnen houden met het transpiratievermogen van de individuen in de groepen kleding Mod en Trad. Factoren die bijdragen aan massaverlies zijn onder andere lichaamsgrootte, dichtheid van zweetklieren en hun transpiratiecapaciteit, maar ook acclimatisatie, fitheid en trainingsgewoonten. Deze factoren zijn in dit onderzoek niet gecontroleerd. Tegelijkertijd bleef de verdamping tijdens de inspanning gelijk bij Mod en Trad. Een hogere verdamping tijdens de herstelfase is logisch, aangezien er na het afzetten van helm, handschoenen en jas meer opgehoopt zweet in het kledingsysteem vrijkomt, vooral wanneer het gewichtsverlies hoger is. Een hogere verdamping in Mod zou ook een snellere verlaging van de gemiddelde huidtemperatuur dan in Trad kunnen verklaren (Figuur 2.8 en 2.14). Om dezelfde reden zou verwacht kunnen worden dat de opgehoopte hoeveelheid zweet in Mod hoger is dan in Trad, vooral omdat de verdamping tijdens de inspanning in beide kledingsets vergelijkbaar was. Toch was dit niet het geval, omdat de verdampingsweerstand in Mod lager was dan in Trad. Deze discrepantie zou nader kunnen worden onderzocht en gevalideerd in vervolgstudies.



**Figuur 2.15 Gewichtsverlies, verdamping en geschatte vochtophoping in de kleding in THW-scenario**

### Subjectieve reacties

De subjectieve reacties volgden de waargenomen fysiologische temperaturen en vochtigheid tot op zekere hoogte, terwijl de afwijkingen deels verklaard kunnen worden (Figuur 2.16). Kleding Mod zorgde voor een lagere thermische sensatie en minder ongemak tot het begin van de stralingsbelasting. Daarna en tijdens het herstel waren de verschillen verwaarloosbaar, waarschijnlijk doordat IR-straling en temperatuurstijging in beide systemen tot een relatief hoge warmtelast en ongemak leidden. Mogelijk heeft de sterkere toename van het vochtgehalte in kleding Mod ten opzichte van Trad deze reacties negatief beïnvloed. De ervaren huidvochtigheid kwam daarentegen goed overeen met de gemeten gewichtsafname en de ontwikkeling van vochtophoping, en toonde een sterkere huidvochtigheid in Mod dan in Trad. De ervaren inspanning in beide kledingsets was vergelijkbaar en kwam overeen met de minimale verschillen in metabolische waarden (Figuur 2.7).

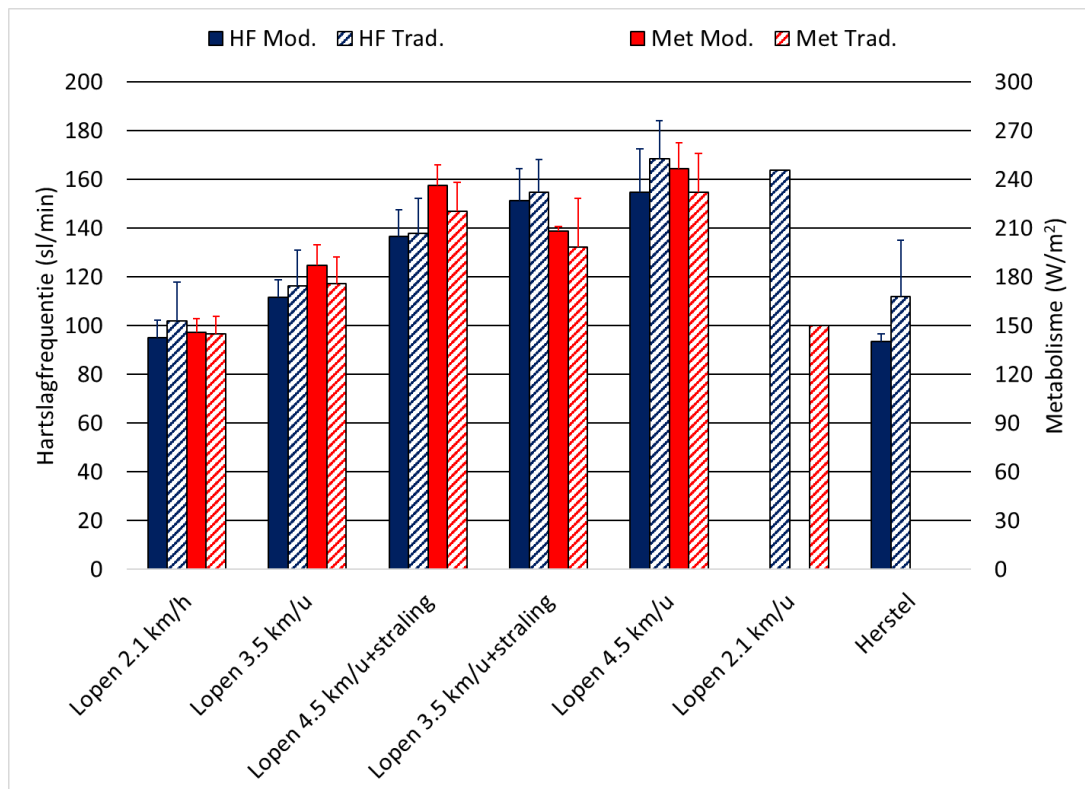


**Figuur 2.16 Subjectieve reacties tijdens THW-scenario met modulaire (Mod) of traditionele (Trad) uitrakkleding**

### 2.3.2 NBB

#### Hartslag en metabolische waarde

De hartslag (HR) was voor elk activiteitsniveau in Mod slechts iets lager dan in Trad (Figuur 2.17). Er waren geen statistisch significante verschillen tussen Mod en Trad, behalve tijdens de herstelfase, waarin het gemiddelde verschil opliep tot bijna 20 slagen/ minuut, en hoger was bij Trad. De weergegeven waarden zijn de gemiddelde HR en de metabolische waarde (Met) voor de laatste minuut van elke activiteit. Daarbij moet in gedachten worden gehouden dat de metabolische waarden niet significant verschilden, hoewel ze iets hoger waren bij personen die Mod droegen. Het is nog belangrijker om op te merken dat de HR in Mod slechts iets lager bleef dan in Trad tijdens de hitteblootstelling en sneller herstelde, ondanks aanzienlijk hogere gemiddelde omgevingstemperaturen voor Mod (tot 4 °C hoger in het midden van de hitteblootstelling en bijna 7 °C hoger tegen het einde van de hitteblootstelling, Tabel 2.2). Dit benadrukt het belang van een lagere verdampingsweerstand (Tabel 1.3) en mogelijk een verbeterd pompeffect (ventilatie) tijdens lichaamsbeweging (invloed van het kledingontwerp).

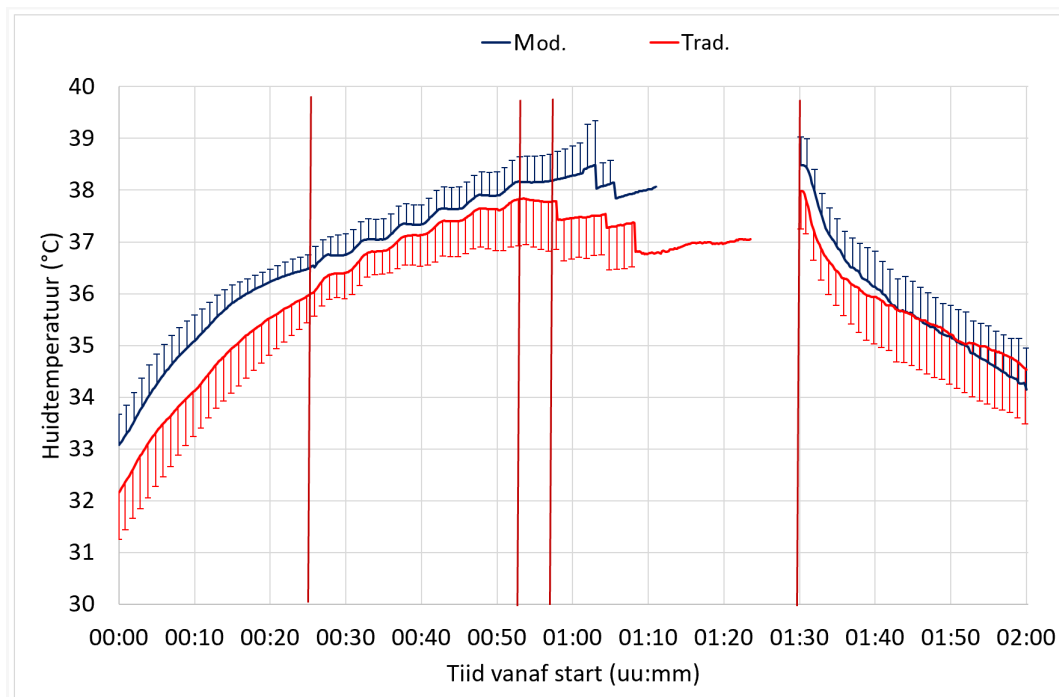


**Figuur 2.17 Hartslag en metabolisme voor het NBB-scenario**

In NBB is nog duidelijker dan in THW te zien dat het metabolisme voor dezelfde activiteit gelijk blijft, onafhankelijk van de blootstellingsduur, terwijl de HR toeneemt met de tijd en de ontwikkeling van hittestress. Tijdens het zittend herstel daalt de HR, maar blijft deze na 30 minuten nog steeds vergelijkbaar met die aan het einde van het eerste activiteitsniveau. Deze blijvende verhoging van de HR weerspiegelt duidelijk de stijging van de lichaams-temperaturen en de toegenomen hittestress.

### Huidtemperatuur

In het NBB-scenario verschilden de gemiddelde huidtemperaturen bij de start van de blootstelling gemiddeld bijna 1 °C, waarbij in kleding Trad een lagere  $T_{\text{huid}}$  is gemeten dan in kleding Mod (Figuur 2.18). Dit kan verband houden met de lagere luchttemperatuur in de voorbereidingsruimte op sommige testdagen met Trad. De stijging van de huidtemperaturen in Mod en Trad verloopt relatief gelijk tot ongeveer de 15<sup>e</sup> minuut van de hitteblootstelling. Daarna vertraagt deze in Mod tot de start van een periode met sterkere straling, waarna de veranderingen opnieuw hetzelfde patroon volgen. Na het einde van de intensieve intermitterende stralingsperiode beginnen de verschillen opnieuw toe te nemen. Aangezien de proefpersonen kort hierna beginnen uit te vallen, zijn de verdere verschillen in gemiddelde huidtemperaturen tot aan de herstelfase moeilijker te verklaren. Ondanks dat de temperaturen in Mod en Trad overlappen tijdens de herstelfase wordt waargenomen dat de verlaging van de temperatuur in Mod iets sneller gaat dan in Trad wanneer de kledingstukken gelijk waren (REC in Tabel 1.3), ondanks de blootstelling aan hogere gemiddelde temperaturen (Table 2.2). Meer zweten en ophoping van vocht in Mod en de verdamping tijdens de herstelfase waren hiervan waarschijnlijk de oorzaak (Figuur 2.25). De spreiding in huidtemperaturen is echter groot, en daarom waren de verschillen niet statistisch significant. Het golvende patroon in de gemiddelde huidtemperatuur weerspiegelt de intermitterende straling tussen 1 en 3 kW/m<sup>2</sup> (Tabel 1.4).



De eerste verticale rode lijn markeert het begin van warmtestraling van 3 kW/m<sup>2</sup>, de tweede het einde van de intermitterende straling, de derde het uitvallen van de eerste proefpersoon en de laatste het begin van de herstelperiode, die voor alle proefpersonen onafhankelijk is van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

**Figuur 2.18 Gemiddelde huidtemperaturen voor het NBB-scenario**

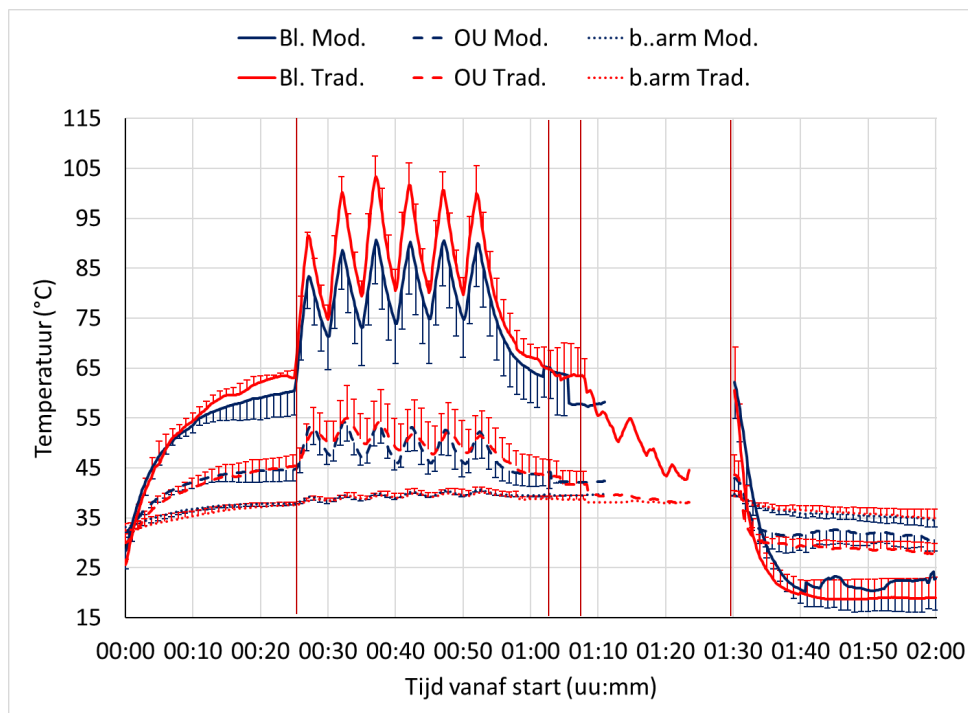
### **Bovenarmtemperaturen en relatieve vochtigheid van textiellagen en huidoppervlak**

Het golvende patroon in de huid- en oppervlaktetemperaturen van de lokale kleding als gevolg van intermitterende straling is duidelijk waarneembaar in de metingen aan de rechterbovenarm (Figuur 2.19). We zien dat bij deze stralingsbelasting de minimale en maximale temperaturen van de buitenlaag en het operationeel uniform (OU) min of meer stabiel blijven of een lichte daling vertonen na de eerste paar fluctuaties, wat erop wijst dat er een stabiele toestand is bereikt.

De gemiddelde temperaturen van de buitenlaag onder een stralingsbelasting van 1 kW/m<sup>2</sup> bereikten binnen de eerste 25 minuten van blootstelling gemiddeld ongeveer 65 °C voor Trad en ongeveer 60 °C voor Mod, en daalden na de periode van intermitterende straling weer tot ongeveer deze niveaus. Tijdens de periode van intermitterende straling (2 minuten 3 kW/m<sup>2</sup> en 3 minuten 1 kW/m<sup>2</sup> gedurende in totaal 30 minuten, dat wil zeggen zes cycli) varieerden de temperaturen bij Mod gemiddeld tussen 72 en 90 °C, en bij Trad tussen 80 en 100 °C tijdens respectievelijk de 1 kW/m<sup>2</sup>- en 3 kW/m<sup>2</sup>-stralingsbelasting (Figuur 2.19). Dit kan worden verklaard doordat de sensor bij Mod op een reflecterende tape was geplaatst, terwijl bij de meeste Trad-kledingsets (zie het verschillende ontwerp van de buitenlaag voor Trad in Tabel 1.3) geen reflecterende tape aanwezig was op dat punt van de bovenarm.

Bij NBB waren de temperaturen van de buitenlaag tijdens 1 kW/m<sup>2</sup> slechts iets hoger dan bij THW-blootstelling, wat kan worden toegeschreven aan de omgevingstemperatuur die bij NBB meer dan 5 °C hoger was (Figuur 2.1 en 2.2, Tabel 2.1 en 2.2). De temperatuurfluctuaties tussen de kledinglagen op het operationeel uniform bereikten gemiddeld waarden

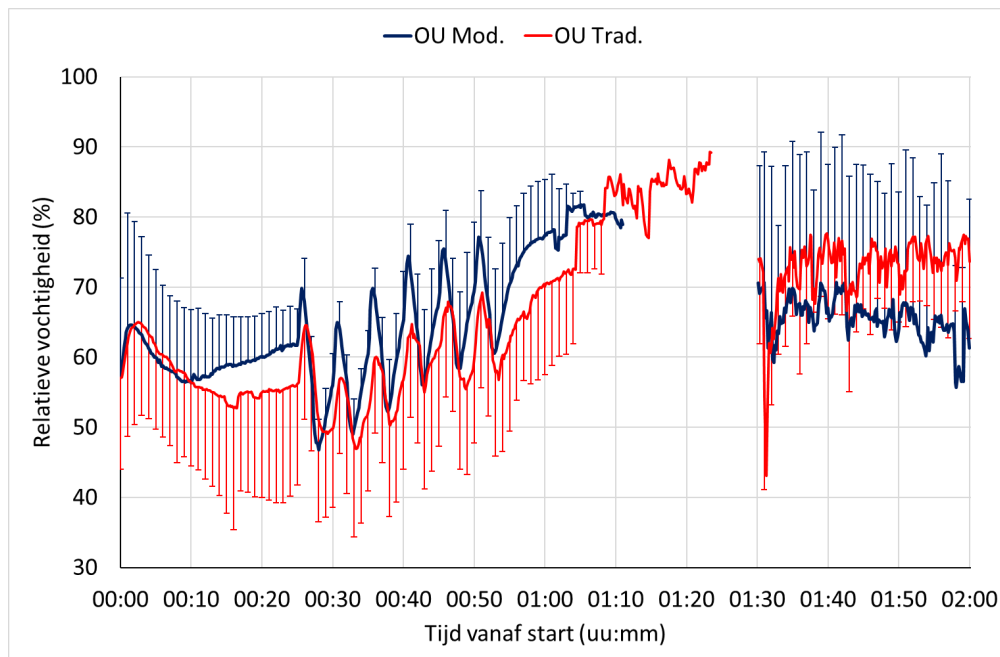
van 46 tot 55 °C voor Mod en van 47 tot 55 °C voor Trad, bij respectievelijk 1 en 3 kW/m<sup>2</sup> (Figuur 2.19). Vanuit dit oogpunt en rekening houdend met de variabiliteit, waren er geen significante verschillen tussen Mod en Trad.



De eerste verticale rode lijn markeert het begin van warmtestraling van 3 kW/m<sup>2</sup>, de tweede het einde van de intermitterende straling, de derde het uitvallen van de eerste proefpersoon en de laatste markeert het begin van de herstelperiode, die voor alle proefpersonen onafhankelijk is van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

**Figuur 2.19 Huidoppervlakte- en textieloppervlaktetemperaturen van de rechter bovenarm tijdens het NBB-scenario**

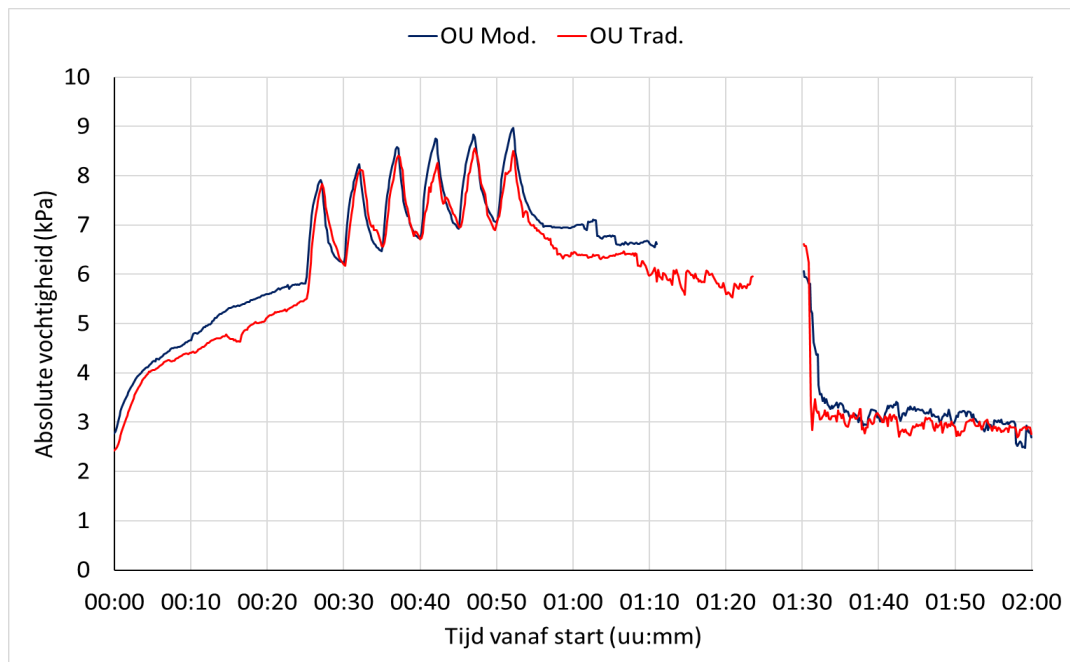
De schommelingen in de huidtemperatuur zijn waarneembaar, terwijl er tegelijkertijd een algemene stijgende trend zichtbaar blijft. De huidtemperaturen bereikten in geen van de blootstellingen 43 °C, maar bleven steeds onder de 42 °C. Wel lagen ze ongeveer 3 °C hoger dan in het THW-scenario. De lichte daling in temperatuur van de kledinglagen kan worden gerelateerd aan toegenomen transpiratie, vochttransport in en verdamping vanuit de lagen (Figuur 2.20).



De herstelperiode begint voor alle proefpersonen onafhankelijk van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

**Figuur 2.20 Relatieve luchtvochtigheid tussen de kledinglagen ter hoogte van de rechter bovenarm aan de buitenzijde van het OU tijdens het NBB-scenario**

Tegelijkertijd nam de verdamping van de huid niet drastisch toe, terwijl de hogere kledingtemperaturen bleven bijdragen aan de stijging van de huidtemperatuur (Figuur 2.19). Aangezien de waterdampdruk tussen de kledinglagen tussen de 6,5 en 9 kPa lag (Figuur 2.21) en de huidtemperaturen in die periode gemiddeld rond de 40 °C bleven met een relatieve luchtvochtigheid van de huid van 100 % en een resulterende waterdampdruk aan het huidoppervlak van ongeveer 7,5 kPa, kunnen we verwachten dat de verdamping vanaf de huid bij de bovenarm minimaal was en alleen maar mogelijk dankzij ventilatie die werd gecreëerd door lucht die door de openingen van de kleding werd gepompt tijdens het lopen. Bij voortzetting van een vergelijkbare intermitterende stralingsbelasting van gelijke intensiteit kan worden verondersteld dat bij sommige proefpersonen de huidtemperatuur binnen 10 tot 15 minuten 43 °C of hoger zou kunnen worden. Vanuit dit oogpunt was er geen groot verschil tussen Mod en Trad. Tijdens de herstelperiode bleven de luchtvochtigheid en waterdampdruk op het operationeel uniform op een vergelijkbaar niveau als in het THW-scenario (Figuur 2.10, 2.11, 2.20 en 2.21).



De herstelperiode begint voor alle proefpersonen onafhankelijk van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

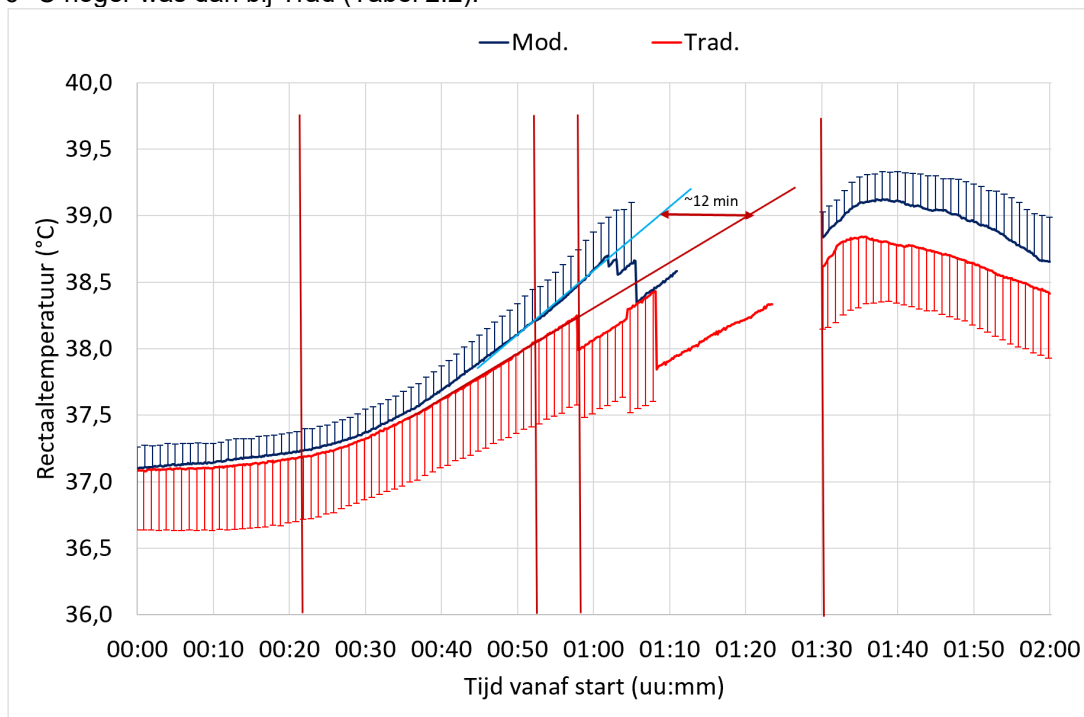
**Figuur 2.21 Absolute vochtigheid weergegeven als waterdampspanning tussen de kledinglagen gemeten op het OU ter hoogte van de rechter bovenarm tijdens het NBB-scenario**

### Rectale en gemiddelde lichaamstemperatuur

In dit scenario beëindigden alle proefpersonen de hitteblootstelling voortijdig, hetzij op eigen verzoek, hetzij omdat hun rectale temperatuur 39,0 °C bereikte (Figuur 2.22). De eerste uitvaller moest al na 58 minuten stoppen. Op dat moment was de luchttemperatuur voor kledingset Mod gemiddeld 3,3 °C hoger dan voor Trad (Tabel 2.2). Tegen de tijd van de laatste uitvallers was de luchttemperatuur in de kamer voor Mod gemiddeld ongeveer 6 °C hoger dan voor Trad (zie Tabel 2.2). Zowel de eerste als de laatste uitvaller droegen de Trad kledingset.

De rectale temperaturen in Mod en Trad begonnen van elkaar te verschillen halverwege de periode (rond minuut 40) van intermitterende straling (Figuur 2.22), maar de verschillen waren niet significant. Aangezien de rectale temperatuur een beperkende parameter is voor hitteblootstelling, en er tot aan de eerste uitvaller geen statistisch significante verschillen waren tussen de kledingsets Mod en Trad, kan worden gesteld dat men met kledingset Mod bij eenzelfde activiteitsniveau ruim 3 °C hogere omgevingstemperaturen aankan dan met Trad. Aangezien de isolatie van Mod iets hoger was en de verdampingsweerstand iets lager dan die van Trad (Figuur 2.4), zou de betere prestatie van Mod kunnen worden toegeschreven aan de lagere verdampingsweerstand (de vochtpermeabiliteitsindex van Mod was 0,33 tegenover 0,25 voor Trad).

Als we echter kijken naar de stijging van de rectale temperatuurcurve vóór de eerste uitvaller bij elke kledingset, en we een rectale temperatuur van 39 °C als bovengrens nemen voor blootstelling, dan blijkt dat onder deze omstandigheden de blootstellingsduur met Trad 12 minuten langer zou kunnen zijn dan met Mod. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de omgevingstemperatuur aan het einde van de blootstelling in de testruimte bij Mod meer dan 6 °C hoger was dan bij Trad (Tabel 2.2).

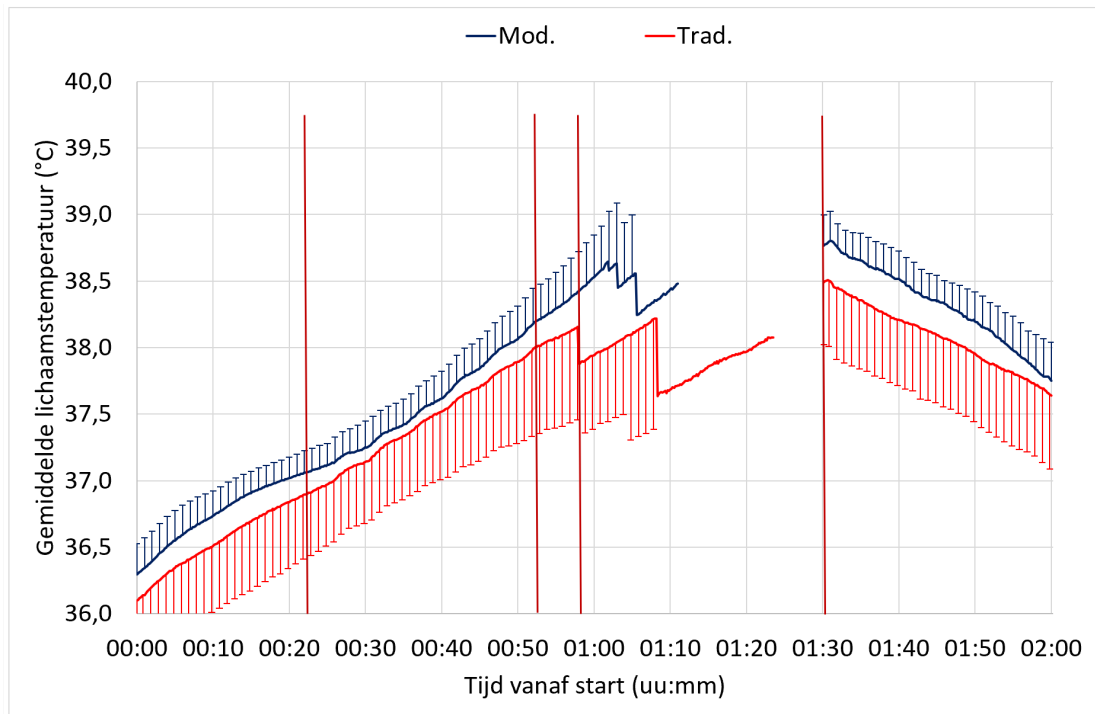


De eerste verticale rode lijn geeft het begin aan van de warmtestraling van 3 kW/m<sup>2</sup>, de tweede het einde van de intermitterende straling, de derde het moment waarop de eerste proefpersoon stopte, en de laatste het begin van de herstelperiode, die voor alle proefpersonen onafhankelijk was van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

### Figuur 2.22 Rectale temperaturen voor het NBB-scenario

Ook tijdens het herstel is opnieuw een typische stijging van de rectale temperatuur zichtbaar gedurende 5–10 minuten voordat deze begint te dalen (Figuur 2.22). Aangezien de hitteblootstelling zwaarder was, is de stijging in NBB iets langer dan die in THW (Figuur 2.12 en 2.22). De iets snellere temperatuuurdaling in Mod vergeleken met Trad kan worden verklaard door een iets groter temperatuurverschil tussen het lichaam en de omgevingstemperatuur, en door de grotere hoeveelheid opgehoopt vocht in kledingset Mod dan in Trad (Figuur 2.25).

De gemiddelde lichaamstemperatuur in Mod bleef gedurende de hele test iets hoger dan die van Trad (Figuur 2.23). De veranderingen in Mod en Trad verliepen echter relatief vergelijkbaar (Figuur 2.24), wat bevestigt dat men in kledingset Mod werkzaamheden kan uitvoeren bij een ruim 3 °C hogere omgevingstemperatuur dan in kledingset Trad.



De eerste verticale rode lijn geeft het begin aan van de warmtestraling van 3 kW/m<sup>2</sup>, de tweede het einde van de intermitterende straling, de derde het moment waarop de eerste proefpersoon stopte, en de laatste het begin van de herstelperiode, die voor alle proefpersonen onafhankelijk is van het tijdstip waarop de hitteblootstelling eindigde.

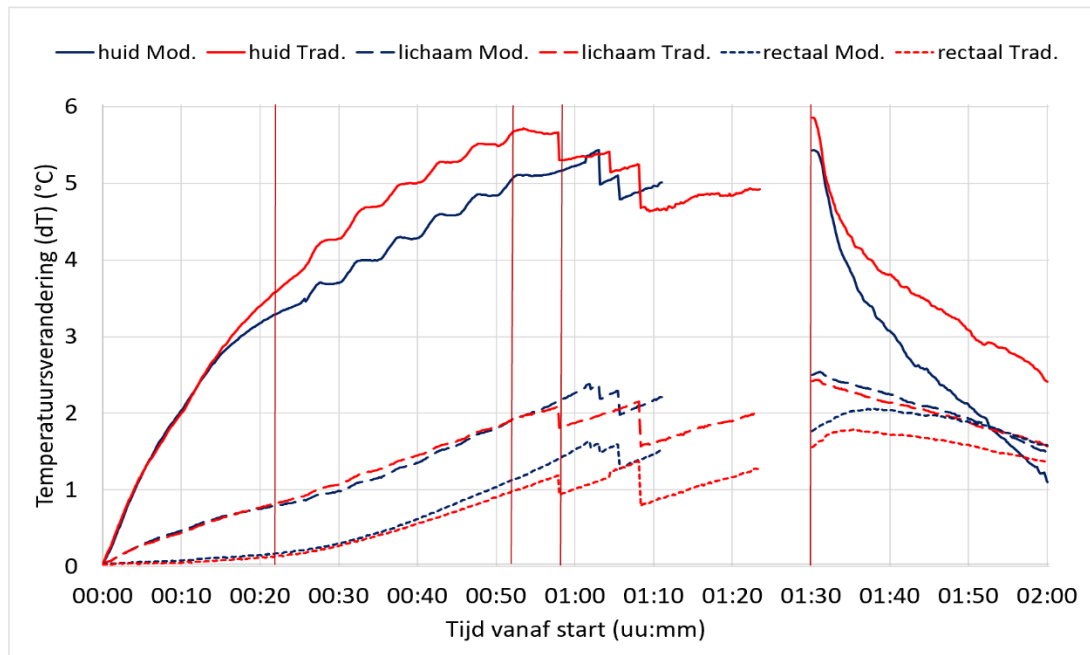
**Figuur 2.23 Gemiddelde lichaamstemperaturen voor het NBB-scenario**

### Temperatuurveranderingen

De verschillen (huidtemperatuur tijdens de hitteblootstelling en het herstel) en overeenkomsten (gemiddelde lichaamstemperatuur als weerspiegeling van de verandering in lichaamswarmte-inhoud) tussen Mod en Trad worden duidelijker weergegeven in Figuur 2.24. Deze figuur illustreert de eerder besproken invloed van kleding op huid-, rectale en gemiddelde lichaamstemperatuur nog beter.

We zien een snellere stijging van de huidtemperatuur tijdens de hitteblootstelling en een tragere daling tijdens het herstel bij Trad in vergelijking met Mod, een sterkere toename van de rectale temperatuur bij Mod vanaf het midden van de blootstellingsperiode, en een vrijwel gelijke verandering van de gemiddelde lichaamstemperatuur in beide kledingsets, ondanks de hogere omgevingstemperatuur tijdens de hitteblootstelling bij Mod (met een toenemend gemiddeld verschil van 3–6 °C, Tabel 2.2) vergeleken met Trad. Dit wijst erop dat men met Mod bij hogere temperaturen kan werken met een gelijk niveau van hittebelasting dan met Trad.

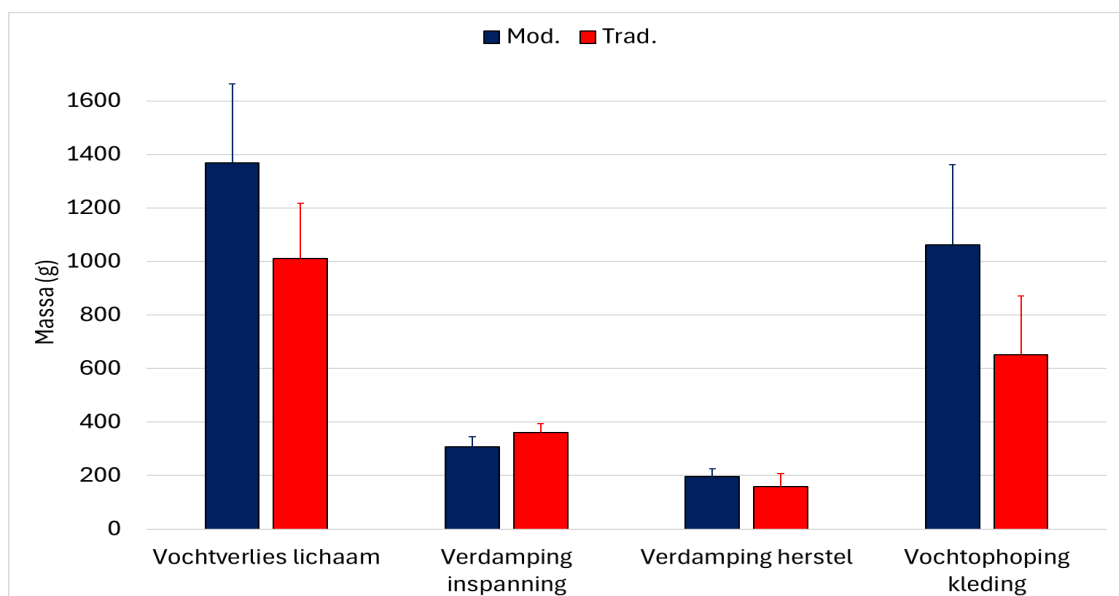
Opnieuw moet worden opgemerkt dat de testgroepen relatief klein waren en dat individuele verschillen, zoals het transpiratievermogen, het resultaat kunnen hebben beïnvloed.



**Figuur 2.24. Verandering in temperaturen voor het NBB-scenario: huid – verandering in gemiddelde huidtemperatuur; rectaal – verandering in rectale temperatuur; lichaam – verandering in gemiddelde lichaamstemperatuur**

#### Verlies lichaamsgewicht, verdamping en geschatte vochtophoping in de kleding

Het zweten was significant hoger in Mod dan in Trad, en aangezien de verdamping in beide gevallen relatief vergelijkbaar was – met iets lagere waarden in Mod dan in Trad – was ook de ophoping van vocht in de kleding significant hoger in Mod dan in Trad (Figuur 2.25). Gezien de hogere omgevingstemperatuur en hogere relatieve luchtvochtigheid – en daarmee ook een aanzienlijk hogere absolute luchtvochtigheid (verschil van 400–600 Pa) – tijdens de Mod-experimenten in vergelijking met die van Trad (Tabel 2.2), kon een dergelijk resultaat worden verwacht.



**Figuur 2.25 Gewichtsverlies, verdamping en geschatte vochtophoping in de kleding in het NBB-scenario**

Daarnaast kunnen er ook individuele verschillen aanwezig zijn, zoals te zien is in het THW-scenario waar de omgevingscondities vergelijkbaarder bleven (Tabel 2.1 en Figuur 2.15). Een ander aspect om rekening mee te houden bij de verschillen in gewichtsverlies is het verschil in beëindigingstijd van de hitteblootstelling. Hoewel één proefpersoon in Trad het 't langst volhield, stopten de meeste proefpersonen in Trad eerder dan in Mod, zie bijvoorbeeld de sprongen in de dThuid-gegevens in Figuur 2.24 vanaf de 58e minuut.

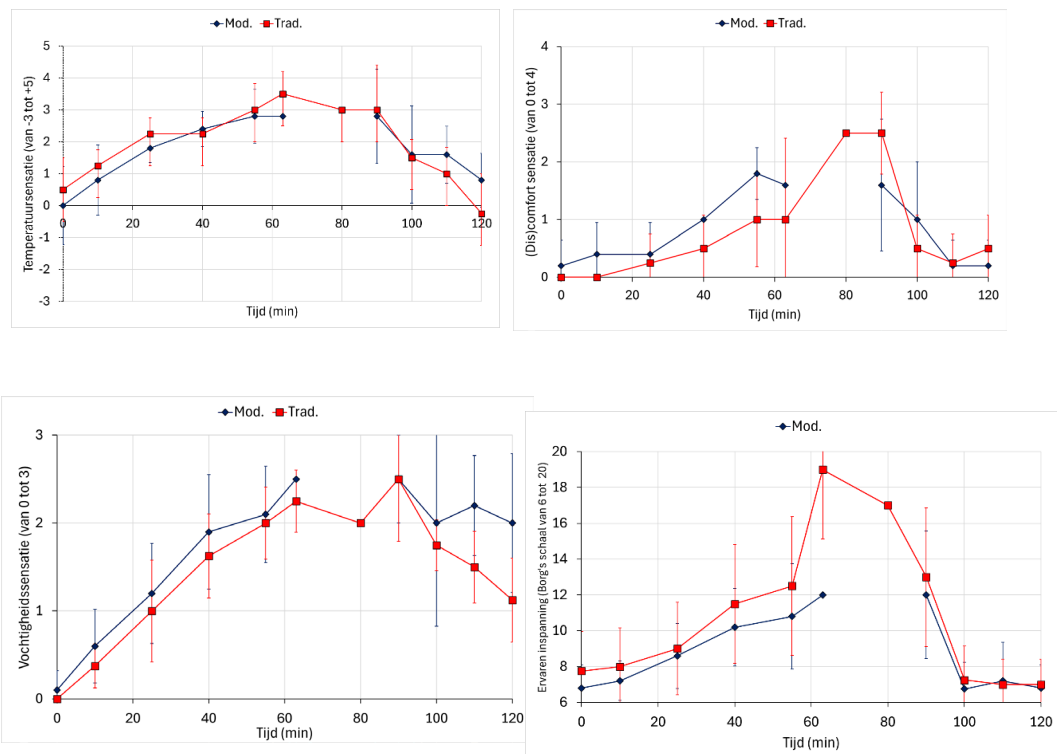
Vanwege de vele ongecontroleerde veranderingen in de onderzochte variabelen is het moeilijk om specifieke conclusies te trekken en kunnen er voor de NBB-conditie enkel bovengenoemde aannames worden gedaan. Deze zouden in vervolgonderzoek nader kunnen worden onderzocht.

### **Subjectieve reacties**

Net als in het THW-scenario volgden ook in NBB de subjectieve reacties (Figuur 2.26) de fysiologische veranderingen redelijk goed. De thermische sensaties waren relatief vergelijkbaar, al nam het verschil toe tijdens het herstel. Dit laatste kan worden verklaard door een grotere vochtophoping in de kleding en enigszins hogere verdamping tijdens het herstel bij Mod in vergelijking met Trad. Dit wordt bevestigd door de gelijke ervaren huidvochtigheid en verandering tijdens het herstel (Figuur 2.26), maar ook door de relatief vergelijkbare absolute luchtvochtigheid tussen de lagen (Figuur 2.21), aangezien de kleding in beide kledingsets na de tests doorweekt was.

Daarom kan worden verwacht dat het iets hogere gevoel van discomfort in Mod vergeleken met Trad (Figuur 2.26) verband houdt met de hogere (en toenemende) hittebelasting in de condities met de Mod-kledingset (Tabel 2.2), in combinatie met hogere huid-, rectale en lichaamstemperaturen (Figuur 2.18, 2.22 en 2.23) en de grotere hoeveelheid vocht in het kledingstelsel (Figuur 2.25).

De ervaren lichamelijke inspanning (Figuur 2.26) was iets hoger bij Trad dan bij Mod, met een toenemend verschil tegen het einde van de hitteblootstelling, hoewel de thermische omstandigheden voor Trad milder waren dan voor Mod (Tabel 2.2). Tegelijkertijd kwamen deze reacties overeen met de iets (maar niet significant) hogere gemeten hartslagen bij Trad vergeleken met Mod (Figuur 2.17), hoewel het metabolisme hoger was in Mod dan in Trad (Figuur 2.17). Daarom kunnen de waargenomen verschillen voornamelijk worden toegeschreven aan individuele variaties. Dit wordt bevestigd door de sterk toenemende verschillen na de 60<sup>e</sup> minuut, toen meerdere proefpersonen de studie hadden beëindigd en de perceptie van individuele deelnemers een steeds dominantere rol ging spelen.



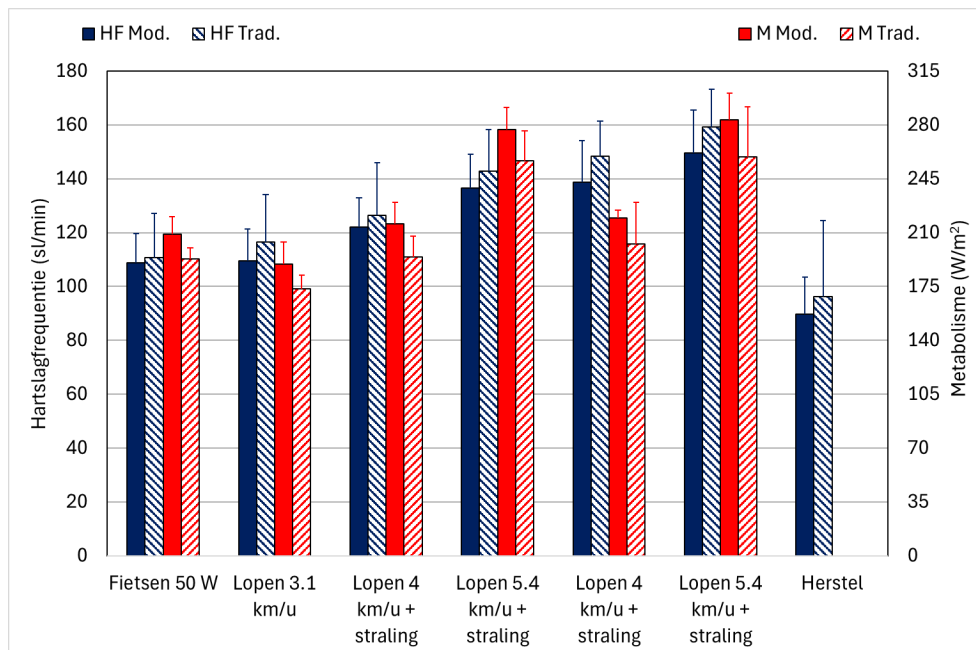
**Figuur 2.26 Subjectieve reacties tijdens het NBB-scenario**

### 2.3.3 GBB

#### Hartslag en metabolisme

De omstandigheden voor GBB waren het extreemst, maar de blootstelling was het kortst, waardoor alle proefpersonen het volledige testprotocol konden voltooien. In dit scenario werd het kledingsysteem Mod gebruikt met dubbele jassen. Dit lijkt van invloed te zijn geweest op het metabolisme, dat hoger bleef in Mod dan in Trad (Figuur 2.27). De verschillen zijn groter dan in THW (Figuur 2.7) en liggen in een vergelijkbaar bereik als in NBB (Figuur 2.17). Tegelijkertijd bleef de gemiddelde hartslag in Mod tot ongeveer 10 slagen/min lager dan in Trad, wat deels op individuele verschillen wijst, maar ook op een hogere hittebelasting. De verschillen in hartslag tussen Mod en Trad waren in scenario THW groter en in NBB vergelijkbaar met scenario GBB.

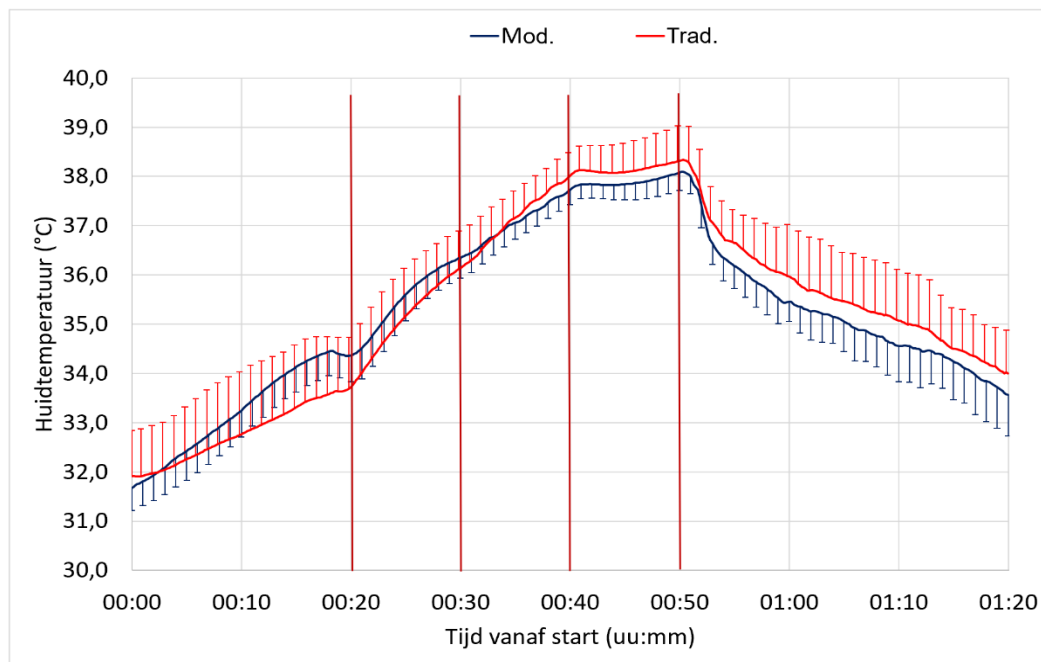
Figuur 2.27 laat duidelijk een toename zien van de invloed van hittebelasting op de hartslag: bij gelijkblijvend metabolisme op verschillende tijdstippen steeg de hartslag met bijna 20 slagen/min, overeenkomend met een stijging van de rectale temperatuur van 0,3–0,5 °C in 10 minuten, afhankelijk van het tijdstip en het gebruikte kledingsysteem (Figuur 2.32). Dit kan worden vergeleken met een rectale temperatuurstijging van ongeveer 0,5 °C en een hartslagtoename van 20 slagen/min binnen 30 minuten in scenario THW (Figuren 2.7 en 2.12), en van ongeveer 1 °C per 30–35 slagen/min hartslagtoename binnen 30 minuten in scenario NBB (Figuren 2.17 en 2.22). Individuele fitheid en tijdsfactoren spelen zeker mee, evenals de invloed van eerdere inspanning op een volgende, maar grofweg kan worden geschat dat een stijging van de kerntemperatuur met 1 °C de cardiovasculaire belasting met minstens 30 slagen/min verhoogt bij deze middelzware tot zware inspanningsniveaus.



**Figuur 2.27 Hartslag en metabolisme voor het GBB-scenario**

### Huidtemperatuur

In het GBB-scenario waren de gemiddelde huidtemperaturen aan het begin van de blootstelling zeer vergelijkbaar (Figuur 2.28), waardoor het fysiologische effect van verschillende kleding op de drager gevolgd kon worden. Tijdens de gesimuleerde voorbereidende activiteiten buiten de klimaattent (fietsen) steeg de huidtemperatuur in Mod (hogere isolatie van het lichaam, zie Tabel 1.3 en Figuur 2.4) sneller dan in Trad. Bij het betreden van de hete omgeving namen de verschillen echter af, en vooral door toevoeging van straling ontwikkelde de huidtemperatuur zich sneller in Trad dan in Mod. Dit toont het positieve effect van thermische isolatie ter bescherming tegen extreme hitte en vlammen. Na het verlaten van de hete kamer en het uittrekken van de jassen verliep het patroon van huidtemperatuurdaling zeer vergelijkbaar in beide kledingsystemen (Figuren 2.28 en 2.34).



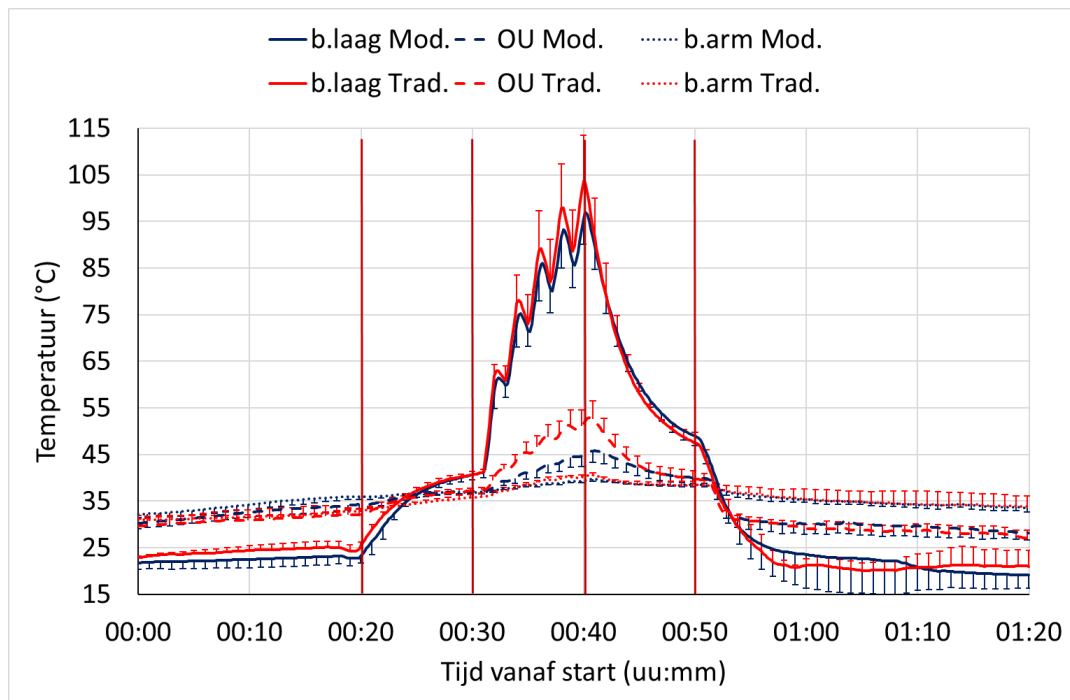
De eerste verticale rode lijn markeert het betreden van de klimaat tent, de tweede het begin van intermitterende warmtestraling met 4 kW/m<sup>2</sup>, de derde het einde van de intermitterende straling en de laatste markeert het einde van de hittestraling en het begin van de herstelperiode.

**Figuur 2.28 Gemiddelde huidtemperaturen voor het GBB-scenario**

### **Bovenarmtemperaturen en relatieve vochtigheid van textiellagen en huidoppervlak**

In tegenstelling tot de stralingsbelasting in NBB (1 kW/m<sup>2</sup> continu aan en gedurende een periode herhaaldelijk verschuivend naar 3 kW/m<sup>2</sup> gedurende 2 minuten, afgewisseld met 1 kW/m<sup>2</sup> gedurende 3 minuten; zie Figuur 2.19, Tabel 1.4), werd in GBB (elke tweede minuut 4 kW/m<sup>2</sup> straling aan en uit gedurende een periode van 10 minuten; zie Figuur 2.29) de hoogste kleding-oppervlaktetemperatuur niet op een specifiek niveau gestabiliseerd, maar bleef deze toenemen bij elke stralingsperiode. Door de kortere blootstelling aan hoge straling in GBB dan in NBB waren de temperatuurschommelingen op het operationeel uniform (OU) en op de huid minder uitgesproken dan in het NBB-scenario, terwijl de temperaturen geen tekenen van stabilisatie vertoonden en bleven stijgen tot het einde van de stralingsperiode. Toch steeg geen enkele huidtemperatuur tot boven de 43 °C, wat bevestigde dat de oorspronkelijke aannames en schattingen voor de studieplanning, gebaseerd op Heus en den Hartog (2017) en Heus et al. (2022), correct waren. Indien de stralingsblootstelling langer had geduurd, zou binnen enkele minuten de eerste proefpersoon een huidtemperatuur van 43 °C op de bovenarm hebben bereikt.

In tegenstelling tot THW en NBB waren de isolatie en de verdampingsweerstand aan de bovenarm in GBB hoger (Figuren 2.5 en 2.6). Hoewel de oppervlaktetemperaturen van de buitenlaag zich relatief vergelijkbaar ontwikkelden, met uiteindelijk een gemiddeld verschil van ongeveer 7 °C waarbij Mod een lagere temperatuur had dan Trad, werd deze warmtelast vertaald naar een vergelijkbaar gemiddeld temperatuurverschil op de OU, waarbij Trad aanzienlijk hogere temperaturen bereikte tussen de lagen dan Mod. Ook de huidtemperaturen aan de bovenarm die aan straling waren blootgesteld, lagen gemiddeld meer dan 1 °C hoger in Trad dan in Mod (Figuur 2.29).

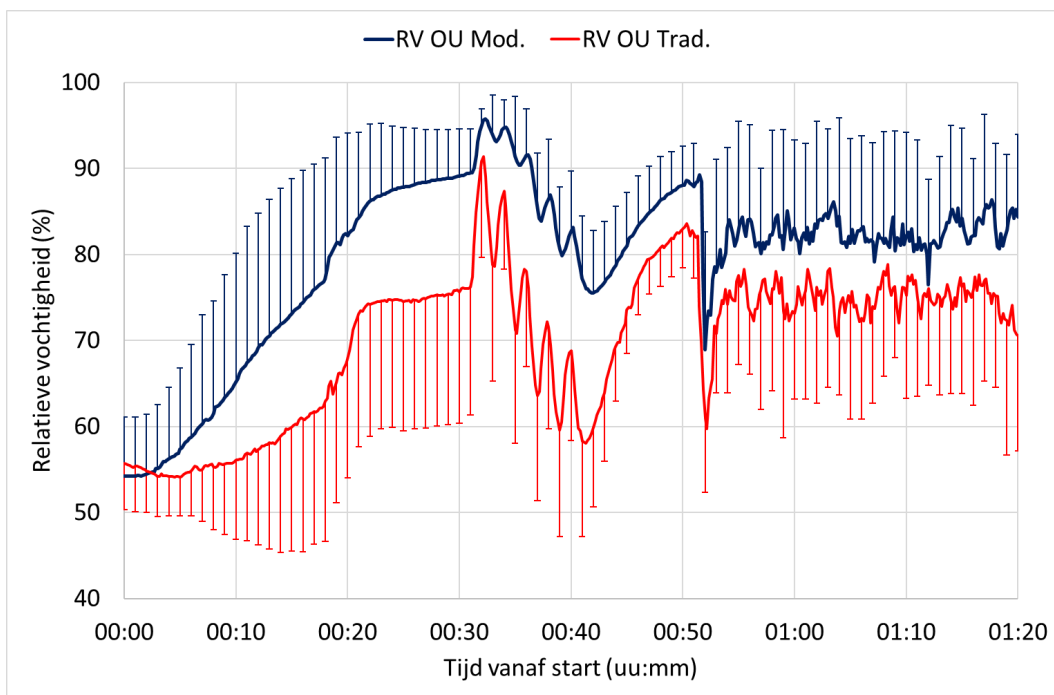


De eerste verticale rode lijn markeert het betreden van de klimaat tent, de tweede het begin van intermitterende warmtestraling met  $4 \text{ kW/m}^2$ , de derde het einde van de intermitterende straling en de laatste markeert het einde van de hittestraling en het begin van de herstelperiode.

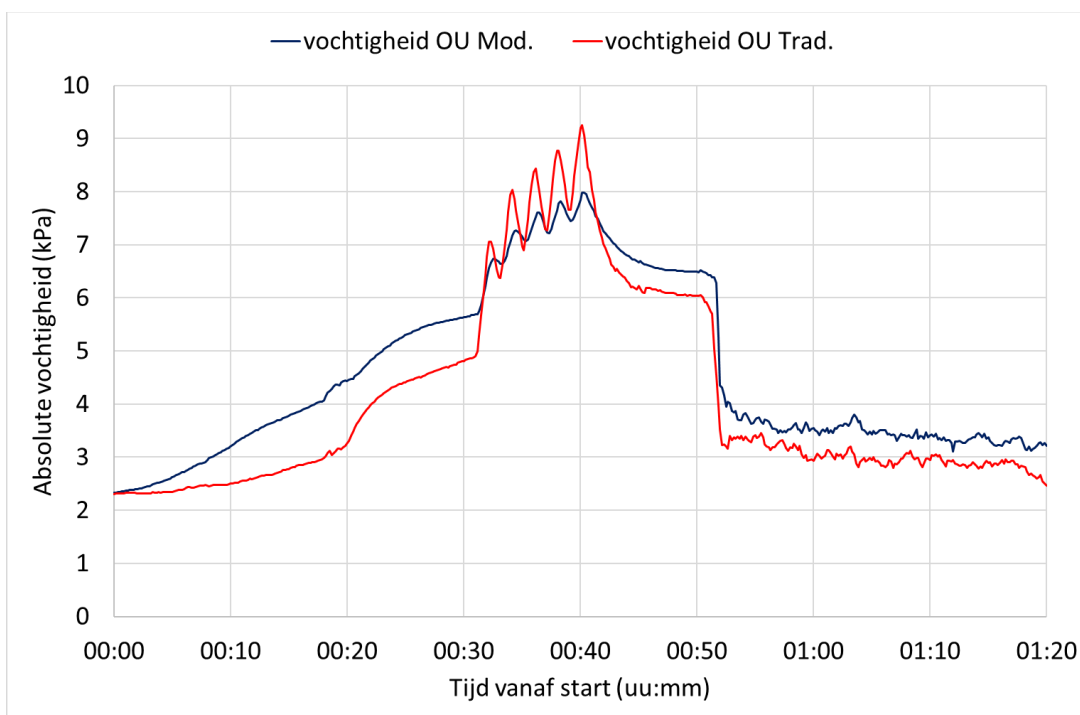
**Figuur 2.29 Temperaturen van de textiellagen en huidoppervlakken op de rechterbovenarm en de relatieve vochtigheid tijdens het GBB-scenario**

De relatieve vochtigheid (RV) tussen de lagen begon toe te nemen bij de start van de inspanning en bereikte bij de start van de stralingsfase waarden dichtbij, en in Mod zelfs boven de 90 % (Figuur 2.30). Wanneer men daarnaast rekening houdt met de hogere totale isolatie en de slechts iets lagere totale verdampingsweerstand van het gehele kledingstelsel (Tabel 1.3), en met het hogere zweten (= verlies van lichaamsgewicht, Figuur 2.35) in Mod dan in Trad gedurende de hele experimentele periode, bevestigen deze resultaten het eerder bij THW genoemde verschil dat grotendeels kan worden verklaard door individuele verschillen tussen de proefpersoongroepen voor Mod en Trad.

De relatieve vochtigheid op het OU was in Trad lager dan in Mod, enkel omdat de OU-temperatuur in Trad aanzienlijk hoger was dan in Mod (Figuur 2.29). Dit betekent dat de absolute vochtigheid tussen de lagen in Trad tijdens de stralingsperioden hoger was dan in Mod (Figuur 2.31). Tijdens de perioden zonder straling daalde de absolute vochtigheid tot vergelijkbare niveaus in beide kledingssystemen, en in andere perioden buiten de intermitterende straling was de absolute vochtigheid in Trad gemiddeld lager dan in Mod. Deze hogere absolute vochtigheid in Trad tijdens de intermitterende stralingsperiode kan een voldoende grote waterdampdrukgradiënt hebben gecreëerd tussen de binnenlagen en de huid ( $\sim 2,5 \text{ kPa}$ ), wat leidde tot extra natte warmtetransfer van de kledinglagen naar de huid. Dit zou de scherpere stijging van zowel de lokale (Figuur 2.29) als de gemiddelde (Figuur 2.28) huidtemperatuur in Trad kunnen verklaren.



**Figuur 2.30** Relatieve vochtigheid tussen de kledinglagen op de rechter bovenarm tijdens het GBB-scenario

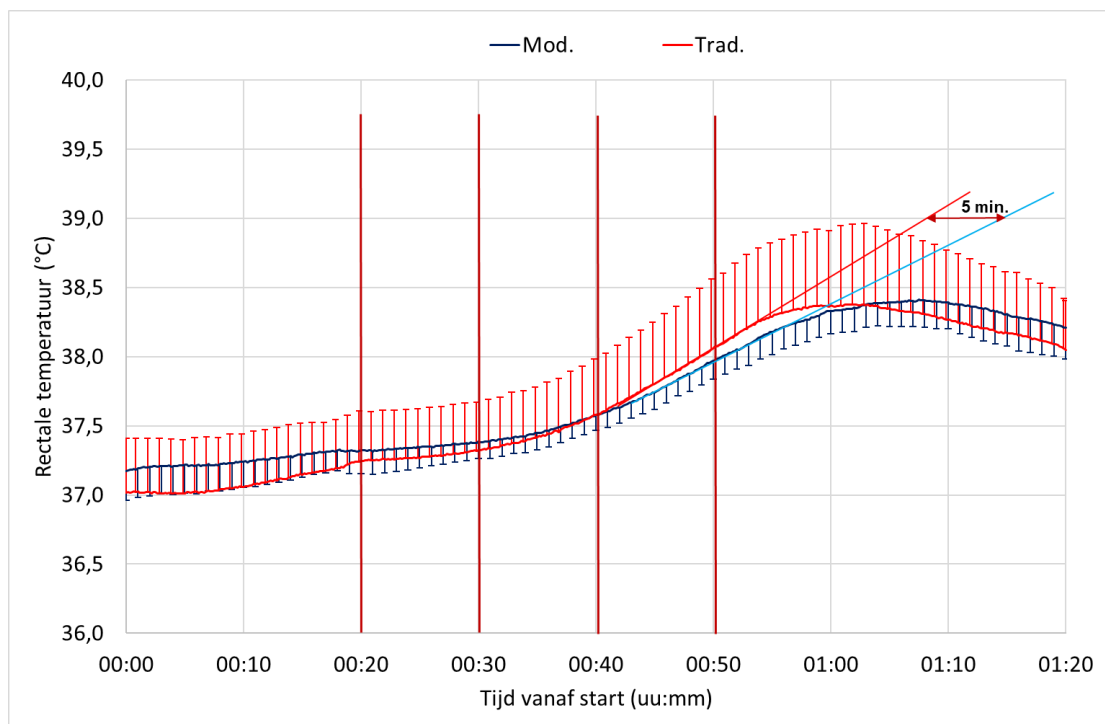


**Figuur 2.31** Absolute vochtigheid weergegeven als waterdampspanning tussen de kledinglagen gemeten op het OU ter hoogte van de rechter bovenarm tijdens het GBB-scenario

### Rectale en gemiddelde lichaamstemperatuur

Figuur 2.32 toont de dynamiek van de temperatuurontwikkeling in de rectale temperatuur en Figuur 2.33 die van de gemiddelde lichaamstemperatuur. De rectale temperatuur in Mod begon gemiddeld ongeveer 0,2 °C hoger dan in Trad, en bleef hoger gedurende de gehele

periode met gesimuleerde voorbereidende activiteiten buiten de kamer (de eerste 20 minuten), hoewel de verschillen vanaf ongeveer de 10<sup>e</sup> minuut begonnen af te nemen. Geen van de verschillen of veranderingen was echter significant. De gemiddelde rectale temperaturen waren zeer vergelijkbaar tijdens de eerste 10 minuten van de hittetesten, waarbij de rectale temperatuur in Trad iets lager bleef dan in Mod. Met de start van de intermitterende straling begon dit te veranderen en nam de rectale temperatuur sneller toe in Trad. Tegen het einde van de hitteblootstelling was de rectale temperatuur in Trad iets hoger dan in Mod.



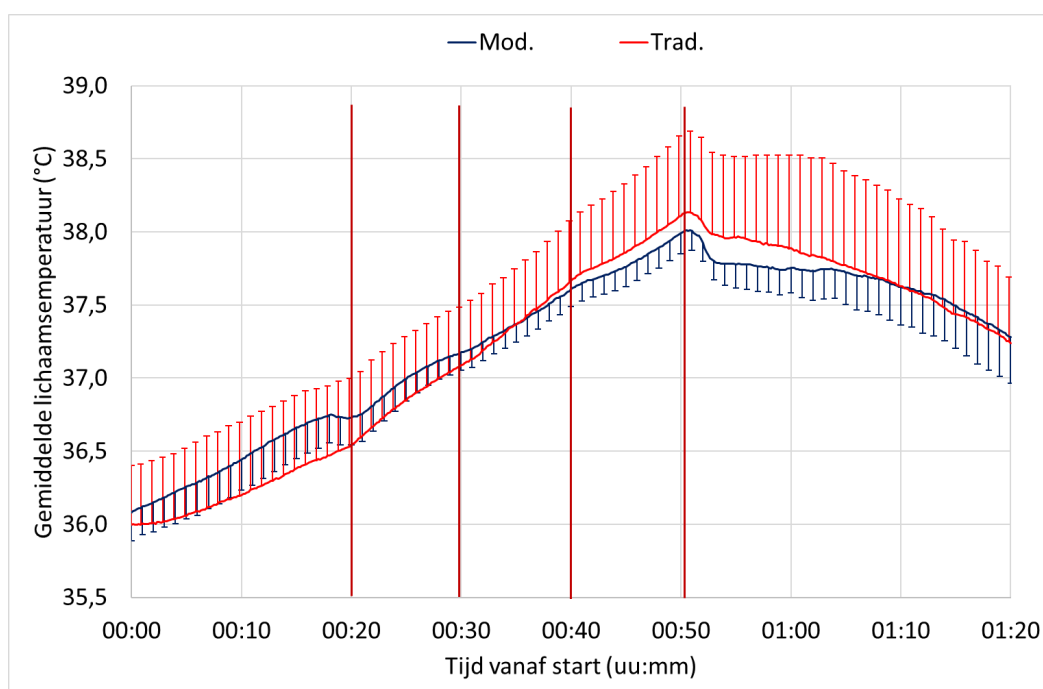
De eerste verticale rode lijn markeert het betreden van de klimaattent, de tweede het begin van intermitterende warmtestraling met 4 kW/m<sup>2</sup>, de derde het einde van de intermitterende straling en de laatste markeert het einde van de hittestraling en het begin van de herstelperiode.

**Figuur 2.32 Rectale temperaturen voor het GBB-scenario**

Wanneer een rectale temperatuur van 39 °C als criterium voor het beëindigen van de blootstelling wordt gehanteerd, en ervan wordt uitgegaan dat de laatste werkbelasting en omgevingscondities gelijk blijven, dan zouden de brandweermensen 5 minuten langer kunnen doorwerken in Mod dan in Trad (Figuur 2.32). Tegelijkertijd is te zien dat de maximale rectale temperatuur in Trad pas na ongeveer 10–12 minuten in de herstelfase wordt bereikt en in Mod pas na ongeveer 18 minuten (Figuur 2.32), voordat deze begon te dalen. Dit wijst erop dat er bij het gebruik van kledingsysteem Mod meer warmte in het lichaam werd opgeslagen. Het verschil hangt deels samen met de al wat hogere temperaturen in Mod bij aanvang van de blootstelling.

Ondanks de kortere hitteblootstelling is deze naloop van de rectale temperatuur tijdens GBB aanzienlijk langer dan in THW (Figuur 2.12) en NBB (Figuur 2.22). Dit kan worden verklaard doordat bij deze extreme blootstelling meer warmte wordt opgeslagen in de oppervlakkige lagen en spieren van het lichaam. Ondanks de toegenomen verdamping via de huid na het uittrekken van de jas (zie de scherpe daling van de huidtemperatuur aan het begin van de herstelfase in Figuur 2.28), blijft warmte door weefselgeleiding en bloedcirculatie naar de centrale lichaamsdelen verplaatst worden. Gemiddeld kan de hersteltijd om een kern-temperatuur van 37,5 °C te bereiken in beide gevallen op meer dan 1 uur worden geschat, terwijl de verwachte hersteltijd tot zowel 37,5 als 38 °C langer lijkt in Mod dan in Trad. Wanneer we echter kijken naar Figuur 2.34 naar temperatuurveranderingen vanaf het begin en waar de invloed van verschillende uitgangsniveaus van de rectale temperatuur is geëlimineerd, dan kan de blootstellingsduur in Mod gemiddeld zelfs tot 10 minuten langer zijn dan in Trad, terwijl de hersteltrend in beide systemen relatief vergelijkbaar blijft. Tegelijkertijd moet in overweging worden genomen dat in de praktijk, wanneer men al meer isolerende kleding draagt op de brandweerkazerne, de lichaamstemperatuur reeds stijgt vóór aankomst op de incidentlocatie.

De stijging van de gemiddelde lichaamstemperatuur (Figuur 2.33) weerspiegelt de toename van de lichaamswarmte-inhoud, en ondanks enkele verschillen tussen Mod en Trad is de gemiddelde verandering vergelijkbaar. Dit wordt ook bevestigd door de verandering van de gemiddelde lichaamstemperatuur (Figuur 2.34).



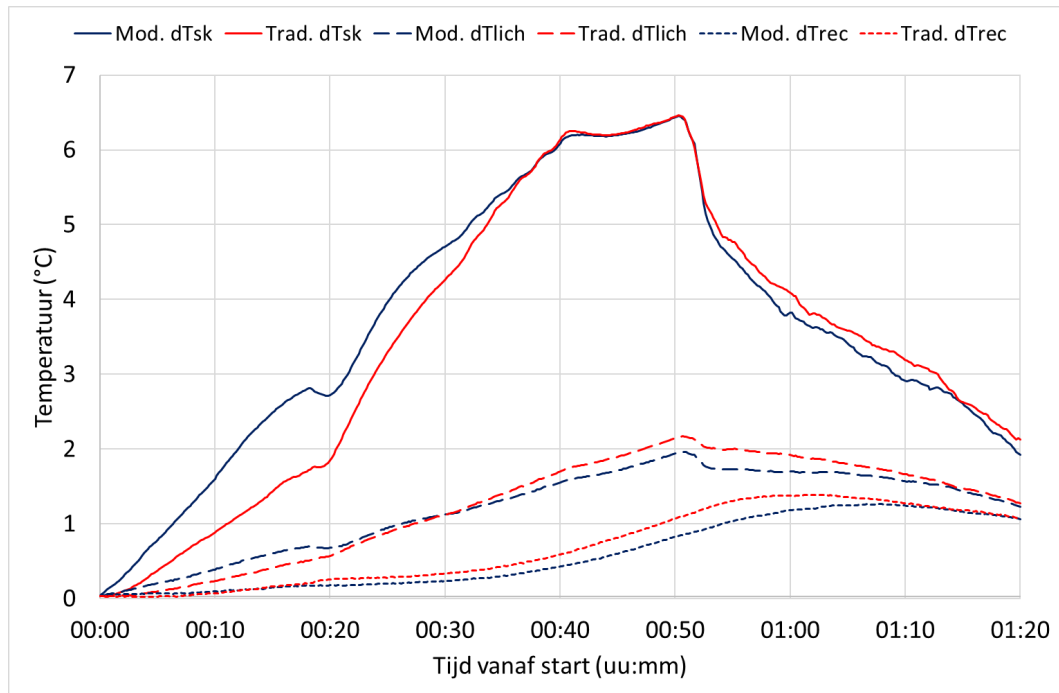
De eerste verticale rode lijn markeert het binnentreden van de hitte, de tweede het begin van intermitterende warmtestraling met 4 kW/m<sup>2</sup>, de derde het einde van de intermitterende straling en de laatste markeert het einde van de hittestraling en het begin van de herstelperiode.

**Figuur 2.33 Gemiddelde lichaamstemperaturen voor het GBB-scenario**

### Temperatuurveranderingen

Figuur 2.34 toont de verschillen tussen Mod en Trad. Zowel de rectale als de gemiddelde lichaamstemperaturen laten duidelijk zien dat Mod en Trad een relatief vergelijkbaar verloop

hebben, terwijl de ontwikkeling van de huidtemperatuur in Mod sneller is tijdens het voorwerk bij kamertemperatuur. Dit patroon keert zich echter om tijdens blootstelling aan extreme hitte, waarbij Mod betere bescherming laat zien, vooral onder stralingsbelasting. De temperatuurontwikkeling is in het laatste deel van de hittesten vrijwel identiek. Tijdens de herstelfase blijven de temperatuurverschillen tussen Mod en Trad in Tsk, Tb en Trec praktisch verwaarloosbaar.



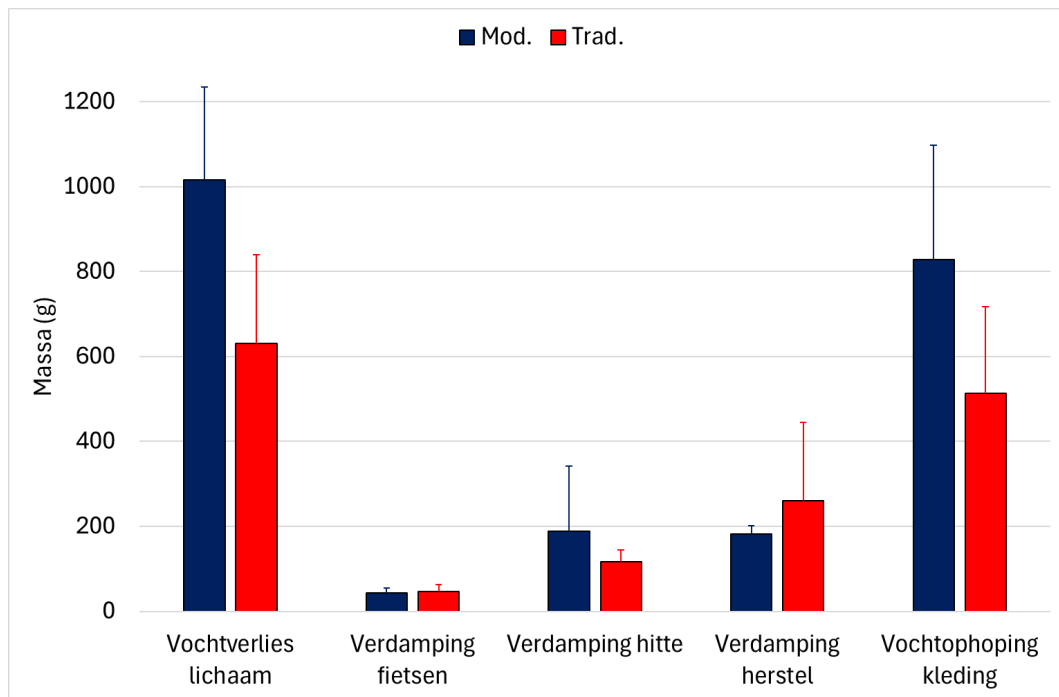
dTsk – verandering in gemiddelde huidtemperatuur; dTrec – verandering in rectale temperatuur; dTlich – verandering in gemiddelde lichaamstemperatuur.

**Figuur 2.34 Verandering in temperaturen voor het GBB-scenario**

### Verlies lichaamsgewicht, verdamping en geschatte vochtophoping in de kleding

Net als in THW en NBB waren ook in GBB het gewichtsverlies van het lichaam en de vochtophoping in de kleding hoger in Mod dan in Trad (Figuur 2.35). De verdamping tijdens de gesimuleerde voorbereidende activiteiten buiten de klimaattent was in beide kledingcombinaties vergelijkbaar; tijdens de hitteblootstelling was deze hoger in Mod en tijdens de herstelfase hoger in Trad. De hoge standaarddeviaties in gewichtsverlies, vochtophoping en in beide hoogste verdampingswaarden wijzen op grote individuele variatie. Deze significante verschillen kunnen hoogstwaarschijnlijk worden toegeschreven aan de zweetcapaciteit van de individuen in de groepen Mod en Trad.

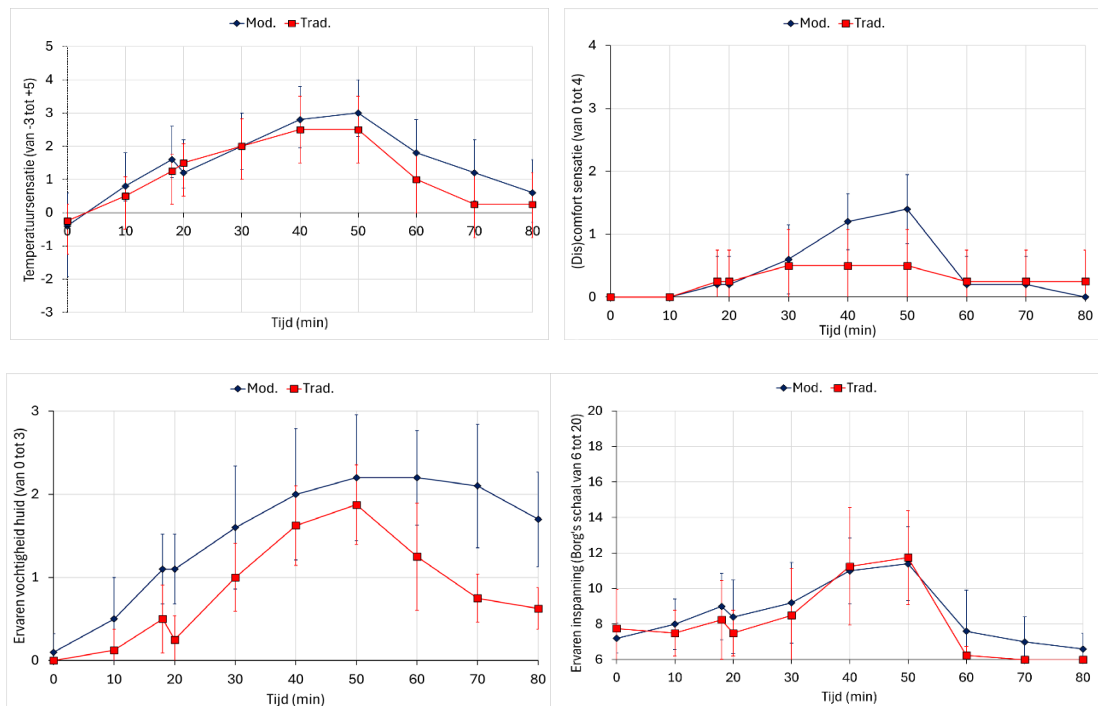
Dat de verdamping in Mod tijdens de hitteblootstelling hoger is dan in Trad is logisch, aangezien er meer vocht in het systeem aanwezig is. Er wordt echter een duidelijke discrepantie gezien in de verdamping tijdens de herstelfase: Mod vertoont lagere verdamping dan Trad, ondanks een hogere zweetproductie en meer vochtophoping in de kledinglagen. De enige verklaring zou kunnen zijn dat een groot deel van het vocht zich heeft opgehoopt in de buitenlagen van Mod (dubbele jas, helm en handschoenen). Helaas zijn de afzonderlijke kledingstukken in deze studie niet gewogen, waardoor gerichte vervolgstudies nodig zijn om deze discrepantie nader te onderzoeken.



**Figuur 2.35 Gewichtsverlies, evaporatie en geschatte vochtophoping in de kleding in het GBB-scenario**

### Subjectieve reacties

De thermische sensatie was in beide kledingsets relatief vergelijkbaar, met een toenemend verschil tijdens de herstelfase waarbij Mod warmer werd ervaren dan Trad (Figuur 2.36). Dit wordt bevestigd door de comfortsensatie, die echter al vanaf het midden van de hitteblootstelling sterker begon te verschillen. De huidvochtigheidssensatie was in Mod vanaf het begin hoger dan in Trad en nam tijdens de herstelfase aanzienlijk toe. Hiermee werden de gegevens over gewichtsverlies, verdamping en vochtophoping bevestigd (Figuur 2.35). Tegelijkertijd was de ervaren inspanning in beide kledingsets vergelijkbaar (Figuur 2.36), terwijl in THW (Figuur 2.16) en NBB (Figuur 2.26) de ervaren inspanning iets hoger was in Trad, wat wijst op een vergelijkbare belasting door het beschermingssysteem, bijvoorbeeld bewegingsbeperkingen door de kleding en het hoge aandeel van het dragen van het ademluchtsysteem.



Figuur 2.36 Subjectieve reacties tijdens het GBB-scenario

## 2.4 Bruikbaarheid van modellen

De verzamelde gegevens bestreken een breed scala aan blootstellingsomstandigheden en kledingcombinaties, waardoor ze een goede basis vormen voor de validatie van thermofysiologische voorspellingsmodellen. Tot dusver zijn drie modellen geëvalueerd, waarvan de resultaten in de bijlagen van dit rapport zijn opgenomen:

- > Twee versies van PHS (ISO 7933):
  - Universiteit van Lund gebaseerd aangepaste online PHS (Bijlagen 1 en 5, Jacobs 2024, Jacobs et al. 2025a, Jacobs et al. 2025b, Kuldmäe 2025, Kuldmäe et al. 2025)
  - FAME Lab online PHS (Bijlagen 2 en 5, Klomp 2024, Klomp et al. 2025a, Klomp et al. 2025b, Kuldmäe 2025, Kuldmäe et al. 2025)
- > TAItherm™ van Thermoanalytics (Page et al. 2025a, Page et al. 2025b).

Het PHS-model is relatief eenvoudig in gebruik. Toch volgden de PHS-voorspellingen de PP-data soms wel, maar soms ook niet. Aangezien PHS is ontwikkeld en gevalideerd voor industrieel gebruik, en geen extreme blootstellingen, hoge isolatie en verdampingsweerstand van beschermende uitrusting meeneemt, werd in de omstandigheden van de in dit rapport beschreven experimenten – waarin taken zijn uitgevoerd op de fysiologische grenzen van de mens – geen voldoende goede overeenkomst tussen de testen en PHS bereikt. De voorliggende studie heeft echter een basis gelegd om de PHS-methode te verbeteren, zodat ook extremere blootstellingen gedekt kunnen worden. Om een PHS-type model voor de behoeften van de hulpdiensten te gebruiken, moet het dus worden aangepast of uitgebreid met specifieke algoritmen die aansluiten bij de incidentscenario's.

TAItherm™ heeft nauwkeuriger voorspellingen gegeven, maar heeft eveneens enkele aanpassingen nodig. Zo verbeterden de voorspellingen bijvoorbeeld wanneer rekening werd gehouden met de massa van kleding en uitrusting en de bijbehorende thermische traagheid.

Het invoeren van de modelgegevens blijkt echter zeer gedetailleerd en complexer voor willekeurige gebruikers. Daarom is hier een eenvoudiger of geautomatiseerde invoer nodig van kleding-eigenschappen, omgevings- en werkgerelateerde parameters. Dit vereist toegang tot en automatische koppeling met gedetailleerde waarden van kleding-eigenschappen uit manikintesten (zie Kuklane et al. 2022 en 2024a), lokale weersgegevens (vergelijkbaar met ClimApp, zie Kingma et al. 2021) en input vanuit modellen voor incidentontwikkeling.

# 3 Conclusies

## 3.1 Gebruik van het kledingsysteem

In dit onderzoek zijn twee verschillende kledingsystemen onderzocht onder drie verschillende omstandigheden. De kledingsystemen bestonden uit het standaard uitrustpak met daaronder het operationeel uniform (het traditionele systeem Trad) en een modulair systeem dat bestond uit het operationeel uniform met daaroverheen een tweetal lagen, waarvan de eerste gebruikt zou kunnen worden voor natuurbrandbestrijding en technische hulpverlening, en de tweede daaroverheen voor binnenbrandbestrijding (het modulaire systeem Mod). Met deze twee systemen zijn werkzaamheden uitgevoerd onder gesimuleerde omstandigheden, namelijk een technische hulpverlening, een natuurbrandscenario en een binnenbrandscenario. Onder deze omstandigheden werden voor beide kledingsystemen de hitte-opbouw en de verdampingsweerstand gemeten.

Er zijn bij deze experimenten geen statistisch significante verschillen in deze parameters gemeten tussen de twee kledingsystemen. Dit betekent dat in dit onderzoek geen verschil in hittebelasting werd gemeten tussen een traditioneel pak en een modulair opgebouwd kledingsysteem bij deze drie scenario's. Hier kunnen echter wel een paar kanttekeningen bij worden geplaatst, waardoor we toch kunnen zeggen dat het modulaire systeem beter presteert, en daarenboven de mogelijkheid opent om afhankelijk van de klus op of af te schalen in lagen.

Tijdens de experimenten bleek dat de omgevingstemperatuur in de klimaatkamer tijdens het bemeten van het modulaire systeem (bij het natuurbrandscenario) onbedoeld 6 °C hoger was dan bij de experimenten met het traditionele systeem. Verder is het onderzoek door omstandigheden onbedoeld met minder proefpersonen (8 in plaats van 10) uitgevoerd, waardoor de spreiding in de resultaten groter is, en de verschillen niet altijd statistisch significant zijn. De volgende waarnemingen zijn van belang voor de duiding van de resultaten:

- > In het technische hulpverlening scenario kon langer worden gewerkt in het modulaire systeem met een lichtere bescherming dan in het traditionele systeem.
- > In het natuurbrandscenario werd, ondanks de zwaardere omstandigheden (een hogere omgevingstemperatuur van 6 °C), een vergelijkbare hittestress gemeten tussen de twee systemen.
- > In het scenario van binnenbrandbestrijding werd in het modulaire systeem een combinatie van kledinglagen gedragen met een vergelijkbare verdampingsweerstand als die van het traditionele systeem. Dit gaf een vergelijkbare hittebelasting.

## 3.2 Bevindingen over fysiologische impact

- > De individuele variatie was groot. De data zijn geschikt voor modelleringsdoeleinden, maar laten geen eenvoudige vergelijking van de kledingcombinaties toe, omdat
  - verschillende personen verschillende kledingsystemen droegen (Mod of Trad),

- het aantal proefpersonen laag was voor een dergelijke vergelijking (slechts 4 per systeem), en
- de omstandigheden in de klimaattent en in de voorbereidings-/herstelruimte varieerden door weersveranderingen en plotselinge problemen met de klimaattentregeling tegen het einde van de testserie.
- > De lokale huidtemperatuur aan de bovenarm overschreed geen enkele maal de 43 °C.
  - Het is mogelijk om blootstellingstijden te schatten op basis van beschikbare studies wanneer de kledingisolatie bekend is.
  - Er is verdere analyse van de gegevens nodig om de specifieke relaties tussen stralingsvermogen, lokale isolatie en blootstellingsduur vast te stellen.
- > Alle proefpersonen (PP) stopten met het natuurbrand scenario. Sommige blootstellingen werden beëindigd, omdat de rectale temperatuur van de proefpersoon de ingestelde veiligheidslimiet van 39 °C bereikte, andere op verzoek van de proefpersoon zelf: de gekozen omstandigheden in combinatie met de stralingsbelasting brachten de individuele tolerantielimieten dichterbij.
  - De omstandigheden waren gekozen op basis van een voorlopige modellering van incidenten en kort aangepast aan in de literatuur gerapporteerde veldblootstellingen. Het gebruikte vereenvoudigde PHS-model werkte in sommige gevallen wel, maar niet altijd.
- > Er kan grofweg worden geschat dat een stijging van de kerntemperatuur met 1 °C de cardiovasculaire belasting met ongeveer 30 slagen/min verhoogt bij middelzware tot zware inspanningsniveaus in hitte.

### 3.3 Gebruik van modellen

Drie modellen zijn geëvalueerd. Twee modellen zijn relatief eenvoudig in gebruik, maar de voorspellingen waren niet goed genoeg omdat specifieke algoritmen voor incidenten van brandweerpverleners ontbreken om een betere voorspelling te kunnen doen. Een model gaf iets betere voorspellingen, maar heeft ook nog aanpassingen nodig om betere voorspellingen te kunnen doen en is complex in gebruik.

# Bijlage 1. PHS validation based on Lund University version

Jacobs, L. Validation of the modified predicted heat strain model for intermittent firefighter activities. BSc thesis report, VU Amsterdam, **2024**, pp. 43.

## Abstract

Firefighters wear highly protective clothing to protect them against extremely warm conditions and dangerous situations. When combined with heavy physical activity, this can result in the development of heat stress. Heat stress prediction models can estimate the possible risk of heat-related illness in workers. A frequently used model is the Predicted Heat Strain (PHS) model. However, this model is not designed for firefighters with varying activity levels and high clothing thermal insulation values. This study aimed to investigate the validation of the modified PHS model for intermittent firefighting tasks during Technical Rescue Warm (THW), Wildland Firefighting (NBB), and Structural Indoor Firefighting (GBB) scenarios. Four firefighters participated in this study. They underwent three different measurements with firefighter scenarios in a climate chamber. Total water loss (*TWL*), rectal temperature (*Trec*), and skin temperature (*Tsk*) were measured. Furthermore, the clothing of the firefighters was tested on a thermal manikin, to measure clothing properties. Both data were needed for the PHS model predictions. Before using the PHS model, the model was modified to make the input of intermittent activity and higher clothing insulation values possible. The experimental data was compared to the predicted data. The result was that the modified PHS model accurately predicted both *Trec* and *Tsk* in the GBB scenario (RMSD < SD). For the *TWL*, the model gave a good prediction in the THW and NBB scenarios compared to the experimental data ( $p > 0.05$ ). The PHS model does not provide accurate predictions in all scenarios. Therefore, the modified PHS model is not valid and suitable for individual firefighters.

*Keywords: PHS model, heat stress, firefighters, protective clothing, intermittent activity, clothing thermal insulation*

# Bijlage 2. PHS validation based on FAME Lab version

Klomp, M.H. Predicted heat strain model validation for intermittent firefighter activities. BSc thesis report, VU Amsterdam, 2024, pp. 48.

## Abstract

**Background:** Firefighters face hazardous conditions that can induce negative physiological and psychological responses, leading to heat strain. The FAME Lab predicted heat strain model (PHSFL) enables the determination of heat strain while considering clothing properties.

**Purpose:** To validate the PHSFL model for three intermittent firefighter scenarios: Technical Rescue Warm (THW), Wildland Firefighting (NBB), and Structural Indoor Firefighting (GBB).

**Methods:** Four firefighters (mean age  $39 \pm 14$  years) performed three intermittent firefighter tasks with highly insulated clothing under varying hot environmental conditions. Rectal temperature (*Trec*), skin temperature (*Tsk*), and body water loss were measured, with clothing thermal insulation determined using a thermal manikin. PHSFL model predictions were compared with measured data.

**Results:** The PHSFL model underestimated *Trec* and *Tsk* in all scenarios and overestimated water loss for GBB. The discrepancies increased over time and were the largest for *Tsk*. Significant differences (mean  $\pm$  SD) were observed at the end of exertion between measured and predicted *Trec*: THW ( $38.23 \pm 0.34$  °C vs.  $37.25 \pm 0.27$  °C), NBB ( $38.50 \pm 0.58$  °C vs.  $37.23 \pm 0.08$  °C) and GBB ( $38.04 \pm 0.51$  °C vs.  $37.52 \pm 0.39$  °C); and measured and predicted *Tsk*: THW ( $34.06 \pm 0.09$  °C vs.  $35.51 \pm 0.10$  °C), NBB ( $37.90 \pm 0.85$  °C vs.  $36.03 \pm 0.40$  °C) and GBB ( $38.29 \pm 0.72$  °C vs.  $36.05 \pm 0.31$  °C). GBB's predicted body water loss ( $1078 \pm 269$  g) exceeded significantly measured body water loss ( $630 \pm 209$  g). Root mean square deviation (RMSD) showed unacceptable predictions for THW and NBB, while there was alignment for *Tsk* during GBB.

**Conclusion:** The PHSFL model is not valid for intermittent firefighter activities. A new ISO standard is necessary to prevent heat strain in firefighters. Adjustments to the PHSFL model are crucial for realistic predictions under specific initial conditions.

**Key words:** *firefighters; intermittent activities; physiological measurements; clothing ensembles; PHSFL model; validation PHSFL; thermal manikin*

# Bijlage 3. A study in structural firefighting scenario with different clothing and without radiation

Ambo, E. Thermo-physiological suitability of rescuer's protective clothing. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, 2024, pp. 46.

## Abstract

The aim of this master's thesis was to determine whether it is more optimal, from the perspective of reducing a firefighter's heat load, to go on a call-out in the station wear (strategy 1) and add protective clothing according to the nature of the call or to go on a call-out in protective clothing worn over the special clothing (strategy 2). To accomplish this task, an experiment simulating a building fire scenario was conducted, during which comparable thermo-physiological parameters were collected using the Estonian firefighter's station wear and protective clothing "TAURUS." Knowing the properties of clothing sets is crucial because, in addition to functionality, the clothing must be safe for the wearer and as optimal as possible. By understanding how the clothing affects the wearer, it is possible to prevent and reduce the risk of heat stress caused by the clothing. To achieve the goal, prior scientific literature was reviewed, and practical knowledge was gathered by conducting experiments with firefighters in the Netherlands. The experiment involved physical exertion, starting with pre-work on a bicycle ergometer at  $T_a = 23 \pm 2$  °C with a relative humidity of  $\phi = 33 \pm 5\%$ . Exposure to heat took place in a climate chamber while walking on a treadmill at  $T_a = 45 \pm 1$  °C and a relative humidity of  $\phi = 26 \pm 5\%$ . The air movement speed in the climate chamber during the experiment was 0.12 to 0.13 m/s. The experiment concluded with recovery, sitting on a chair at  $T_a = 23 \pm 2$  °C with a relative humidity of  $\phi = 33 \pm 5\%$ . A total of eight volunteer subjects participated in the experiments,  $n = 8$ . Data were collected through skin temperature, rectal temperature, heart rate, and weighing the individuals/clothing. An important finding was that upon exiting the heat, the rectal temperature does not start to drop immediately, as the heat begins to accumulate internally, and it can rise to a critical 39 °C within 20 minutes of exposure to heat. Detailed weighing of the clothing revealed that the most fluid accumulates in the special clothing jacket and sweatpants. The results indicate that with strategy 1, the firefighter's performance improves by 1,5 times that is reflected in possible longer exposure to the heat, shorter time for recovery etc. Therefore, it is recommended to do pre-work in station wear and add protective clothing along with the necessary equipment when entering a hot environment. During recovery, as many clothes as possible should be removed, but care must be taken to avoid cold-related illnesses.

*Keywords: Firefighters, heat stress, climatic chamber, hot environment, building fire, smoke diving*

# Bijlage 4. A study in wildland firefighting scenario with different clothing and without radiation

Kaaver, S. Physiological impact of Estonian rescue workers' protective clothing on heat strain development during simulated wildland firefighting activities. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, 2025, pp. 97.

## Abstract

Wildland firefighting presents significant physiological challenges due to extreme environmental conditions and prolonged operations. Working for extended periods in hot environments while wearing protective clothing induces heat stress and increases the risk of occupational injuries. Protective clothing also affects cardiovascular function and is associated with changes in metabolic processes, which in turn influence physical endurance and performance. The aim of this master's thesis was to assess the impact of protective clothing systems used by Estonian firefighters (Red Fox RF-504 and Taurus), both compliant with the EN 469 standard, as well as the undergarments worn beneath them (station wear), on firefighters' physiological responses and work capacity during a wildland firefighting simulation.

**Methods.** The experiment was conducted in a climate-controlled chamber at the Institute of Sports Sciences and Physiotherapy, University of Tartu. The experimental group consisted of male professional firefighters ( $n = 12$ ), who participated in the trial wearing two different protective clothing systems: Taurus ( $n = 6$ ) and Red Fox RF-504 ( $n = 6$ ). The tests were conducted with two types of protective clothing configurations: in the "heavy" series, participants wore underwear shorts, a T-shirt, and station wear (blouson and sweatpants) underneath the protective clothing, and in the "light" series, they wore only underwear shorts and a T-shirt provided by the employer under the turnout gear. Heat exposure took place at an ambient temperature ( $T_a$ ) of  $35,9 \pm 0,3$  °C and relative humidity ( $\varphi$ ) of  $36,0 \pm 1,8$  %, followed by a recovery phase outside the chamber at  $T_a = 23,3 \pm 0,2$  °C and  $\varphi = 41,9 \pm 1,9$  %. Air velocity ( $v_a$ ) remained below 0,15 m/s throughout the trial. The test protocol consisted of continuous treadmill walking at varying speeds: 2,1 km/h (0–10 min), 3,5 km/h (10–25 min), 4,5 km/h (25–40 min), 3,5 km/h (40–55 min), 4,5 km/h (55–70 min) and 2,1 km/h (70–80 min). After exiting the heat, the test persons removed their gloves, helmet, baclava and firefighting jacket. During the recovery period (80–110 min), they were seated. The recorded data included heart rate, rectal (representing body core temperature), and skin temperature, and based on these the mean body temperature was calculated, subjective ratings were collected and sweat evaporation and fluid loss were assessed by weighing the test persons with and without clothes. Skinfold thickness was measured for calculation of body fat percentage, and body mass index (BMI) was calculated. Aerobic and anaerobic work capacity was measured in these test persons who agreed to do the maximal capacity test ( $n = 9$ ).

The analysis of the results showed that protective clothing systems with the station wear (heavy) caused greater increases in rectal, body, and skin temperatures, longer recovery times, and greater fluid loss compared to light one ( $p < 0,05$ ). In contrast, light protective clothing systems were associated with lower measured temperatures and subjective ratings indicated greater comfort. The results confirmed that, in hot environmental conditions, lighter protective clothing should be preferred, and that reducing the number of clothing layers during the recovery phase is advisable to promote more efficient body cooling. It is important to note that the higher number of test terminations in the protective clothing conditions with station wear suggests that the additional clothing layers caused greater discomfort and earlier cessation during heat exposure, likely hindering heat dissipation.

*Keywords: wildland firefighting, protective clothing, heat strain, thermal insulation, physiological strain.*

# Bijlage 5. PHS validation based on the conditions without radiation

Kuldmäe, G. Validation on the Predicted Heat Strain model (PHS) for assessing firefighters' heat stress in wildland and structural fire situations. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, 2025, pp. 86.

## Abstract

The aim of this research was to evaluate the validity of the Predicted Heat Strain model (PHS) based on the experimental results performed in a simulated wildland and structural fire scenario by comparing measured and modelled physiological parameters. Methodology: During the validation, two online versions of the heat strain model, PHS-LU and PHS-FL, were utilized while considering the effects of so called light and heavy (without and with station wear) combinations of the Red Fox and Taurus protective clothing systems. These two turnout gear systems were used with and without the use of station wear in wildland firefighting scenario, and with and without the use of turnout gear during the simulated prework in structural firefighting scenario. The subjects' rectal and skin temperatures, body fluid loss, and evaporation were compared. In the event of a structural fire, the situation was considered "light" (Strategy 1) if, during the preparatory work, the person was wearing station wear, including a T-shirt and underwear. In the case of a "heavy" condition (Strategy 2), firefighter protective clothing – i.e., turnout gear – was worn on top of the station wear already during prework simulation. Results: In simulated wildland firefighting scenario, the PHS-FL model consistently underestimated the rectal temperature increase and fluid loss of a rescue worker. The PHS-LU model was more accurate for higher physical exertion, especially for Red Fox heavy and Taurus heavy conditions, where no significant differences appeared between the actual and projected values. However, there was a noticeable underestimation of the rectal and skin temperatures in Taurus light condition. The simulated structural firefighting scenario showed a similar trend as the wildland firefighting scenario. The PHS-FL model predicted that the rectal temperature of the rescue worker would be significantly lower and that it would stabilize earlier in time compared to measured under experimental conditions where it did not stabilize during heat exposure. In terms of skin temperature, the predictions of both models were significantly lower than the actual values of the test subjects. Also, the PHS-FL model significantly underestimated the body's fluid loss. The PHS-LU model was once again more accurate in the conditions of structural fire scenario in both Red Fox and Taurus heavy conditions. However, there was an underestimation in the light condition while using this protective clothing system, especially during the recovery period. The models were unable to realistically reflect the evaporation of the body. The PHS-LU model predicted evaporation to be systematically lower than it was actually measured in test subjects. Because the results showed that neither model was able to predict physiological changes in the body with sufficient accuracy under the observed conditions, then both model versions should be improved. The dynamics of the physiological parameters of the rescue worker while acting at the fire incident site must be taken into account in order to prevent excessive values of rectal and skin temperatures and fluid loss (evaporation) indicators. The combination of protective clothing (light, heavy) depending on

the fire scenario plays an important role. Conclusions: Both model versions (PHS-LU and PHS-FL) need improvements in order to predict the dynamics of the physiological parameters of the firefighters while performing their tasks, in order to prevent the organism from exceeding the thresholds of physiological parameters in different rescue scenarios. The use of station wear under protective clothing layers (light, heavy) is important to consider, as it is vital for the occupational safety of rescue workers.

*Keywords: fire scenario, predicted heat stress model, ISO 7933, protective clothing, rescue worker*

# Publicaties en presentaties gerelateerd aan het modulair beschermingsconcept

- Ambo, E. Thermo-physiological suitability of rescuer's protective clothing. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, **2024**, pp. 46, <http://hdl.handle.net/10492/9280>.
- Ambo, E., Reinvee, M., Purge, P., Kuklane, K. Heat stress in simulated structural firefighting scenarios utilizing two types of dressing strategies. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 79-82, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Bröde, P.; Kuklane, K.; Havenith, G. Requirements for benchmarking the ergonomics of PPE systems. 9<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, online, Stuttgart, Germany, May 10-12, **2021**, 106-107, <https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/9th-ecpc.pdf>.
- Eggeling, J.; Toma, R.; Kuklane, K. A new approach to estimate Ret values. Eds. Kuklane, K., Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, May 9-12, **2023**, p. 66-67, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.
- Heus, R.; Catoire, M. Compatibility and ergonomic standards for personal protective clothing and other PPE. ECPC preceding webinar nr. 3, casted online, Netherlands, December 14, **2022**.
- Heus, R.; Kingma, B.R.M.; van Berlo, B.M.A.; Mol, D.; Daanen, H.A.M.; Kuklane, K. The protective performance of process operators' protective clothing and exposure limits under low thermal radiation conditions. *Biology* **2022**, *11*, 1222, <https://doi.org/10.3390/biology11081222>.
- Heus, R.; Kingma, B.R.M.; Mol, D.; Kuklane, K. Protection of process operators against heat radiation. 9<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, online, Stuttgart, Germany, May 10-12, **2021**, 170-171, <https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/9th-ecpc.pdf>.
- Heus, R.; Kuklane, K. Beschermende kleding brandweer. Deel 1 kleding eigenschappen. NIPV rapport. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), p. 50, **2025**, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/09/20250818-NIPV-Beschermende-kleding-brandweer-deel-1-kleding-eigenschappen.pdf>.
- Jacobs, L. Validation of the modified predicted heat strain model for intermittent firefighter activities. BSc thesis report, VU Amsterdam, **2024**, pp. 43.
- Jacobs, L.M.G., Klomp, A.M.H., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated wildland firefighting. ThermoNED, Delft, Netherlands, April 11, **2025a**.
- Jacobs, L.M.G., Klomp, A.M.H., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated wildland firefighting. Editors: Olt, J., Kikas, T., Meneses, L. Book of Abstracts. 15<sup>th</sup> International Conference on Biosystems Engineering, May 7-9, **2025b**, Tartu, Estonia, p.34, <http://hdl.handle.net/10492/9611>.

- Kaaver, S. Physiological impact of Estonian rescue workers' protective clothing on heat strain development during simulated wildland firefighting activities. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, **2025**, pp. 97, <http://hdl.handle.net/10492/9994>.
- Kaaver, S., Kuklane, K. Physiological impact of rescue workers' protective clothing on heat stress development during simulated wildland firefighting activities. University master students conference, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia, April 24, **2025**.
- Kaaver, S., Purge, P., Kuklane, K. Physiological impact of rescue workers' protective clothing on heat stress development during simulated wildland firefighting activities. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 83-86, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Kingma, B.R.M.; Steenhoff, H.; Toftum, J.; Daanen, H.A.M.; Folkerts, M.A.; Gerrett, N.; Gao, C.; Kuklane, K.; Petersson, J.; Halder, A.; Zuurbier, M.; Garland, S.W.; Nybo, L. ClimApp – integrating personal factors with weather forecasts for individualised warning and guidance on thermal stress. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 11317. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111317>.
- Klomp, M.H. Predicted heat strain model validation for intermittent firefighter activities. BSc thesis report, VU Amsterdam, **2024**, pp. 48.
- Klomp, A.M.H., Jacobs, L.M.G., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated technical rescue activities. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025a**, p. 39-42, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Klomp, A.M.H., Jacobs, L.M.G., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated structural firefighting. Proceedings of the 13th International Manikin & Modelling Meeting (I3M) and The Clothing and Textile Sciences Research Meeting, Wilson College of Textiles, NC State, Raleigh, USA, Oct. 15-17, **2025b**, p. 121-131, <https://doi.org/10.52750/825607>.
- Krause, R.; Kuklane, K.; Kemmeren, M.; Gries, T. Europäische nutzerumfrage zu smarter persönlicher schutzausrüstung für feuerwehreinsatzkräfte. *Crisis Prevention* **2021**, *3*, 34-39 (in German).
- Kuklane, K. EN ISO 15831 Clothing — Physiological effects — Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin. Invited lecture at European Commission workshop on EN ISO 15831:2004, Study on the inclusiveness of anthropometrics in European harmonised standards, Etterbeek, Belgium, October 13, **2023**.
- Kuklane, K. Firefighter clothing database: preliminary modelling and exposure predictions. In eds. Kuklane, K., Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, May 9-12, **2023**, p. 48-49, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.
- Kuklane, K. Modular protection concept for firefighter protective clothing system. Invited lecture at FITI, Seoul, Republic of Korea, June 10, **2024**.
- Kuklane, K. Modular protection concept – starting up the work with future protective clothing for Dutch firefighters. ECPC preceding webinar nr. 2, casted online from Zoetermeer, Netherlands, May 25, **2022**.
- Kuklane, K. New guidelines for selection, use, care and maintenance of smart garments protecting against heat and flame. 9<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing,

- online, Stuttgart, Germany, May 10-12, **2021**, 92-93, <https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/9th-ecpc.pdf>.
- Kuklane, K. The climatic conditions at work: Ergonomics of the protective clothing. Invited lecture on World Ergonomics Day, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia, October 21, **2022**.
- Kuklane, K. Thermal manikin measurements – the effect of size and fit on thermal performance of clothing. Invited lecture at European Commission workshop on EN ISO 15831:2004, Study on the inclusiveness of anthropometrics in European harmonised standards, Etterbeek, Belgium, October 13, **2023**.
- Kuklane, K.; Eggeling, J.; Kemmeren, M.; Heus, R. A database of static thermal insulation and evaporative resistance values of Dutch firefighter clothing items and ensembles. *Biology* **2022**, *11*, 1813, <https://doi.org/10.3390/biology11121813>.
- Kuklane, K.; Eggeling, J.; Kemmeren, M.; Heus, R. Local effects of printed logos and reflective striping fixed to firefighter clothing material packages under low radiation exposure. *Ind. Health* **2022**, *61*(5), <https://doi.org/10.2486/indhealth.2022-0126>.
- Kuklane, K.; Kemmeren, M.; Kistemaker, L.; Heus, R. Physiological and subjective responses during fire training. 9<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, online, Stuttgart, Germany, May 10-12, **2021**, 90-91, <https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/9th-ecpc.pdf>.
- Kuklane, K.; Kemmeren, M.; Kistemaker, L.; Heus, R. Skin temperature measurements and subjective responses during flue gas cooling experiment. *The Catalyst* **2022**, *Q4*, 42-45, <https://fliphtml5.com/hglao/eyne/2022 - Catalyst Q4/>.
- Kuklane, K.; Klomp, A.M.H.; Jacobs, L.M.G.; Heus, R. A size smaller accessory on top of firefighter protective clothing leads to higher risks. CLOTECH 2024, 15<sup>th</sup> Joint International Conference on Innovation in Clothing, Dresden, Germany, September 5-6, **2024**.
- Kuklane, K.; Klomp, A. M.; Jacobs, L. M.; Heus, R. Thermal protective properties of a firefighter turnout gear with and without an accessory on top of turnout jacket. *Communications in Development and Assembling of Textile Products* **2024**, *5*(2), 242–254. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2024.5.p242-254>.
- Kuklane, K.; Levels, K.; de Weerd, M.; Teunissen, L.; Eggeling, J.; Kemmeren, M. Comparison of clothing measurements on 2 manikins in the light of size and fit. Eds. Kuklane, K., Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, May 9-12, **2023**, p. 60-61, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.
- Kuklane, K.; Levels, K.; de Weerd, M.; Teunissen, L.; Eggeling, J.; Kemmeren, M. Thermo-physiological properties of Dutch firefighters' clothing systems – comparison of results from 2 manikins. ThermoNED, Soesterberg, Netherlands, April 1, **2022**.
- Kuklane, K.; Levels, K.; Kistemaker, L.; Mol, E.; Tanck, I.; Heus, R. Firefighters' skin temperatures in three simulated incident scenarios: A comparison of 4- and 8-point based mean skin temperature calculations. ThermoNED, Nijmegen March 1, **2024**.
- Kuklane, K.; Levels, K.; Kistemaker, L.; Mol, E.; Tanck, I.; Heus, R. Heat stress prediction for simulated rescue activities. Eds. Lee, J.-Y., Kim, D.-H. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, Jeju, Republic of Korea, June 3-7, **2024**, p. 145-146,

[https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731https://www.icee2024.com/form\\_download/ICEE2024\\_BOOK\\_OF\\_ABSTRACTS\\_V4.pdf](https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731https://www.icee2024.com/form_download/ICEE2024_BOOK_OF_ABSTRACTS_V4.pdf).

- Kuklane, K., Levels, K., Kistemaker, L., Tanck, I., Mol, E., Kemmeren, M., Heus, R. Heat stress under simulated technical rescue activities. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 51-54, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Kuklane, K.; Toma, R. Common clothing area factor estimation equations are inaccurate for highly insulating ( $I_{cl} > 2$  clo) and non-western loose-fitting clothing ensembles. *Ind. Health* **2021**, *59*, 107-116, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2020-0209>.
- Kuklane, K.; Toma, R. Validation of ISO 9920 clothing item insulation summation method based on an ambulance personnel clothing system. *Ind. Health* **2021**, *59*, 27-33, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2020-0208>.
- Kuldmäe, G. Validation on the Predicted Heat Strain model (PHS) for assessing firefighters' heat stress in wildland and structural fire situations. MSc thesis report, Estonian University of Life Sciences, **2025**, pp. 86, <http://hdl.handle.net/10492/9990>.
- Kuldmäe, G., Kuklane, K., & Merisalu, E. Kuumastressi mudeli valideerimine päästetööde tarbeks simuleeritud kliimakambri katsete baasil. (Validation of a heat strain model for assessing rescue activities based on climate chamber tests.) In Estonian. University master students conference, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia, April 24, **2025**.
- Levels, K.; Kuklane, K.; Mol, E.; Kistemaker, L.; Tanck, I.; Heus, R. Validity of the heart rate-based ECTemp algorithm to estimate core temperature during simulated firefighting scenarios. Eds. Lee, J.-Y., Kim, D.-H. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, Jeju, Republic of Korea, June 3-7, **2024**, p. 149-150, <https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731>.
- Page, S.C., Hepokoski, M.A., Golubev T., Kuklane, K. Predicting the effectiveness of technical rescue gear with thermal modelling software. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025a**, p. 59-62, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Page, S.C., Hepokoski, M.A., Golubev T., Kuklane, K. Predicting the effectiveness of structural internal firefighting gear using computational thermal modeling. Proceedings of the 13th International Manikin & Modelling Meeting (I3M) and The Clothing and Textile Sciences Research Meeting, Wilson College of Textiles, NC State, Raleigh, USA, Oct. 15-17, **2025b**, p. 14, <https://doi.org/10.52750/825607>.
- Van Harten, T. Ergonomic and performance differences between firefighter protective clothing systems. MSc thesis report, VU Amsterdam, **2023**, pp. 53.
- Van Harten, T.; Kuklane, K.; Heus, R.; Daanen, H.A.M. Ergonomic and performance differences between firefighter protective clothing systems. Eds. Kuklane, K.; Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, May 9-12, **2023**, 154-155, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.

# Referenties

- Aljaroudi, A.M.; Bhattacharya, A.; Strauch, A.; Quinn, T.D.; Williams, W.J. Effect of cooling on static postural balance while wearing firefighter's protective clothing in hot environment. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* **2022**, *29*(4), 1460–1466, <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2138142>.
- Ambo, E., Reinvee, M., Purge, P., Kuklane, K. Heat stress in simulated structural firefighting scenarios utilizing two types of dressing strategies. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 79-82, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Borg, G. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **1982**, *14*(5), 377–381.
- Carballo-Leyenda, B.; Ferreiro-González, M.; Aliaño-González, M.J. (2022). Perceptions of Heat Stress, Heat Strain and Mitigation Practices in Wildfire Suppression across Southern Europe and Latin America. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, *19*(19), 12288, <https://doi.org/10.3390/ijerph191912288>.
- Carballo-Leyenda, B.; Villa, J.G.; López-Satué, J; Rodríguez-Marroyo, J.A. Impact of different personal protective clothing on wildland firefighters' physiological strain. *Frontiers in physiology* **2017**, *8*, 618, <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00618>.
- Chaui-Berlinck, J.G.; Alves Monteiro, L.H.; Navas, C.A.; Bicudo, J.E.P.W. Temperature effects on energy metabolism: A dynamic system analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **2002**, *269*(1486), 15–19, <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1845>.
- De Freitas, C.R.; Grigorieva, ET AL. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology* **2014**, *59*(1), 109–120, <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>.
- Dorman, L.E. The effects of protective clothing and its properties on energy consumption during different activities. *Doctoral Thesis*, Loughborough University, Loughborough, UK, March **2007**.
- Dorman, L.E.; Havenith, G. The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *European Journal of Applied Physiology*, **2009**, *105*, 463–470.
- Durnin, J.V.G.A.; Womersley, J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutrition* **1974**, *32*, 77-97.
- Engenberger, P.; MacRae, B.A.; Kemp, S.; Bürgisser, M.; Rossi, R.M.; Annaheim, S. Prediction of core body temperature based on skin temperature, heat flux, and heart rate under different exercise and clothing conditions in the heat in young adult males. *Frontiers in Physiology* **2018**, *9*, <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>.
- EN 17528:2022 Clothing - Physiological effects - Measurement of water vapour resistance by means of a sweating manikin. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- EN 17558:2023 Ergonomics – Ergonomics of PPE ensembles. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- EN 469:2020 Protective clothing for firefighters — Performance requirements for protective clothing for firefighting activities. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.

- Esfahani, B.H.; Li, R.; Zhang, M.; Eike, R.; Etemadzadeh, M.; Song, G. Enhancing firefighter hoods: innovations, challenges, and future directions in PPE design. *Textile Progress* **2025**, *57*(2), 73–116. <https://doi.org/10.1080/00405167.2025.2528501>
- Færevik, H.; Reinertsen, R. E. Effects of wearing aircrew protective clothing on physiological and cognitive responses under various ambient conditions. *Ergonomics* **2003**, *46*(8), 780–799. <https://doi.org/10.1080/0014013031000085644>
- Fullagar, H.; Schwarz, E.; Richardson, A.; Notley, S. R.; Lu, D.; Duffield, R. Australian firefighters perceptions of heat stress, fatigue and recovery practices during fire-fighting tasks in extreme environments. *Applied Ergonomics* **2021**, *95*, 103449. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103449>
- Gagge, A.P.; Nishi, Y. Heat exchange between human skin surface and thermal environment. *Comprehensive physiology* **1977**, 69-92.
- Gebhardt, H.; Müller, B.H.; Hettinger, T.; Pause, B. *Physiologische Bewertung von Strahlungsheizungen*. [Physiological assessment of infrared radiators], in German. Bremerhaven, Germany: Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft, **1995**.
- Givoni, B.; Goldman, R.F. Predicting metabolic energy cost. *Journal of Applied Physiology* **1971**, *30*(3), pp. 429–433.
- Havenith, G.; Fiala, D. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive Physiology Wiley Online Library*; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, **2016**, *6*, 255–302. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140051>.
- Havenith, G.; Heus, R. A test battery related to ergonomics of protective clothing. *Appl. Ergon.* **2004**, *35*, 3–20. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2003.11.001>.
- Heus R. Exposure to smoke. An overview report of the studies to exposure routes, contamination and cleaning of turn-out gear and the skin barrier function. Arnhem, Instituut Fysieke Veiligheid, **2018**, pp. 50
- Heus, R.; den Hartog, E. Maximum allowable exposure to different heat radiation levels in three types of heat protective clothing. *Ind. Health* **2017**, *55*, 529–536, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0137>
- Heus, R.; Kingma, B.R.M.; van Berlo, B.M.A.; Mol, D.; Daanen, H.A.M.; Kuklane, K. The protective performance of process operators' protective clothing and exposure limits under low thermal radiation conditions. *Biology* **2022**, *11*, 1222, <https://doi.org/10.3390/biology11081222>.
- Heus, R.; Kuklane, K. Beschermende kleding brandweer. Deel 1 kleding eigenschappen. NIPV rapport. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), p. 50, **2025**, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/09/20250818-NIPV-Beschermende-kleding-brandweer-deel-1-kleding-eigenschappen.pdf>.
- Holmér, I.; Kuklane, K.; Subzero project group. Subzero project: validation of IREQ predictions with results from wearer trials and manikin measurements. In: 2<sup>nd</sup> European Conference on Protective Clothing (ECPC) and NOKOBETEF 7: Challenges for Protective Clothing. Montreux, Switzerland [CD-ROM]. St. Gallen, Switzerland: EMPA; **2003**, [https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/ecpc2\\_2003challprotclo.pdf](https://es-pc.eu/media/attachments/2022/11/24/ecpc2_2003challprotclo.pdf).
- Holmér, I.; Kuklane, K.; Gao, C. Test of firefighter's turnout gear in hot and humid air exposure. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* **2006**, *12*(3), 297-305.
- Ioannou, L.G., Tsoutsoubi, L., Mantzios, K., Flouris, A.D. A free software to predict heat strain according to the ISO 7933:2018. *Industrial Health* **2019**, *57*(6), 711–720, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2018-0216>.

- ISO 11999 series. PPE for firefighters — Test methods and requirements for PPE used by firefighters who are at risk of exposure to high levels of heat and/or flame while fighting fires occurring in structures. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 10551:2019 Ergonomics of the physical environment – Subjective judgement scales for assessing physical environments. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- ISO 11079:2007 Ergonomics of the thermal environment – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 15384:2018 Protective clothing for firefighters — Laboratory test methods and performance requirements for wildland firefighting clothing. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 15831:2004 Clothing – Physiological effects – Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO/TS 20141:2022 Personal safety — Personal protective equipment — Guidelines on compatibility testing of PPE. International Standards Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 7933:2004 Ergonomics of thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of predicted heat strain. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jacobs, L.M.G., Klomp, A.M.H., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated wildland firefighting. ThermoNED, Delft, Netherlands, April 11, **2025a**.
- Jacobs, L.M.G., Klomp, A.M.H., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated wildland firefighting. Editors: Olt, J., Kikas, T., Meneses, L. Book of Abstracts. 15<sup>th</sup> International Conference on Biosystems Engineering, May 7-9, **2025b**, Tartu, Estonia, p.34, <http://hdl.handle.net/10492/9611>.
- Jones, B.H.; Toner, M.M.; Daniels, W.L.; Knapik, J.J. The energy cost and heart-rate response of trained and untrained subjects walking and running in shoes and boots. *Ergonomics* **1984**, 27(8), 895–902.
- Teitlebaum, A.; Goldman, R.F. Increased energy cost with multiple clothing layers. *Journal of Applied Physiology* **1972**, 32(6), 743–44.
- Kaaver, S., Kuklane, K. Physiological impact of rescue workers' protective clothing on heat stress development during simulated wildland firefighting activities. University master students conference, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia, April 24, **2025**, <http://hdl.handle.net/10492/9994>.
- Kaaver, S., Purge, P., Kuklane, K. Physiological impact of rescue workers' protective clothing on heat stress development during simulated wildland firefighting activities. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 83-86, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Kingma, B.R.M.; Steenhoff, H.; Toftum, J.; Daanen, H.A.M.; Folkerts, M.A.; Gerrett, N.; Gao, C.; Kuklane, K.; Petersson, J.; Halder, A.; Zuurbier, M.; Garland, S.W.; Nybo, L. ClimApp—integrating personal factors with weather forecasts for individualised warning and guidance on thermal stress. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, 18, 11317, <https://doi.org/10.3390/ijerph182111317>.

- Klomp, A.M.H., Jacobs, L.M.G., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated technical rescue activities. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025a**, p. 39-42, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Klomp, A.M.H., Jacobs, L.M.G., Daanen, H.A.M., Kuklane, K. Heat stress prediction for simulated structural firefighting. Proceedings of the 13th International Manikin & Modelling Meeting (I3M) and The Clothing and Textile Sciences Research Meeting, Wilson College of Textiles, NC State, Raleigh, USA, Oct. 15-17, **2025b**, p. 121-131, <https://doi.org/10.52750/825607>.
- Králík, L.; Lunerová, K.; Vaněk, J.; Weisheitelová, M.; Castulik, P.; Chrastek, J.; Serakova, M.; Kozeluh, J. Structural integrity of firefighter suits and protection against combustion products. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 150-153, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Kuklane, K.; Eggeling, J.; Kemmeren, M.; Heus, R. A database of static thermal insulation and evaporative resistance values of Dutch firefighter clothing items and ensembles. *Biology* **2022**, *11*(12), 1813, <https://doi.org/10.3390/biology11121813>.
- Kuklane, K.; Gao, C.; Holmér, I.; Giedraitytė, L.; Bröde, P.; Candas, V.; den Hartog, E.; Meinander, H.; Richards, M.; Havenith, G. Calculation of clothing insulation by serial and parallel methods: effects on clothing choice by IREQ and thermal responses in the cold. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* **2007**, *13*(2), pp.103-116, <https://doi.org/10.1080/10803548.2007.11076714>.
- Kuklane, K.; Klomp, A. M.; Jacobs, L. M.; Heus, R. Thermal protective properties of a firefighter turnout gear with and without an accessory on top of turnout jacket. *Communications in Development and Assembling of Textile Products* **2024a**, *5*(2), 242–254, <https://doi.org/10.25367/cdatp.2024.5.p242-254>.
- Kuklane, K.; Levels, K.; de Weerd, M.; Teunissen, L.; Eggeling, J.; Kemmeren, M. Comparison of clothing measurements on 2 manikins in the light of size and fit. Eds. Kuklane, K., Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, 9-12 May **2023**, p. 60-61, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.
- Kuklane, K.; Levels, K.; Kistemaker, L.; Mol, E.; Tanck, I.; Heus, R. Heat stress prediction for simulated rescue activities. Eds. Lee, J.-Y., Kim, D.-H. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, Jeju, Republic of Korea, June 3-7, **2024b**, p. 145-146, <https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731>.
- Kuldmäe, G., Kuklane, K., & Merisalu, E. Kuumastressi mudeli valideerimine päästetööde tarbeks simuleeritud kliimakambri katsete baasil. (Validation of a heat strain model for assessing rescue activities based on climate chamber tests.) In Estonian. University master students conference, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia, April 24, **2025**.
- Lee, H.; Kim, S.; Kim, D.; Kim, D.; Lee, J. Requirements of improvement on personal protective equipment and experiences exposed to accidently high risk circumstance while firefighting - a questionnaire study. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System* **2017**, *24*(5), 549–561, <https://doi.org/10.21086/ksles.2017.10.24.5.549>.
- Lei, Y.; Wang, F.; Yang, J. An extended model for analyzing the heat transfer in the skin–microenvironment–fabric system during firefighting. *Materials* **2023**, *16*(2), 487, <https://doi.org/10.3390/ma16020487>.

- Levels, K.; Kuklane, K.; Mol, E.; Kistemaker, L.; Tanck, I.; Heus, R. Validity of the heart rate-based ECTemp algorithm to estimate core temperature during simulated firefighting scenarios. Eds. Lee, J.-Y., Kim, D.-H. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, Jeju, Republic of Korea, June 3-7, **2024**, p. 149-150, [https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731https://www.icee2024.com/form\\_download/ICEE2024\\_BOOK\\_OF\\_ABSTRACTS\\_V4.pdf](https://ndownloader.figstatic.com/files/47045731https://www.icee2024.com/form_download/ICEE2024_BOOK_OF_ABSTRACTS_V4.pdf).
- Lunerová, K.; Králík, L.; Vaněk, J.; Mašín, M.; Weisheitelová, M.; Fišer, J.; Pokorný, J. Testing of functional characteristics of NBC and firefighter protective clothing. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025**, p. 212-215, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Malchaire, J. Occupational Heat Stress Assessment by the Predicted Heat Strain Model. *Industrial Health* **2006**, *44*(3), 380–387, <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.380>.
- Malchaire, J.; Piette, A.; Kampmann, B.; Mehnert, P.; Gebhardt, H.; Havenith, G.; den Hartog, E.; Holmer, I.; Parsons, K.; Alfano, G.; Griefahn, B. Development and validation of the predicted heat strain model. *Annals of Occupational Hygiene* **2001**, *45*(2), 123–135, <https://doi.org/10.1093/annhyg/45.2.123>.
- McCarthy, A.; Wills, J.A.; Fuller, J.T.; Cassidy, S.; Nindl, B.C.; Doyle, T.L. Predicting maximal military occupational task performance from physical fitness tests using machine learning. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **2025**, *57*(9), 1877-1885, doi: [10.1249/MSS.0000000000003727](https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003727).
- McLellan, T. M.; Daanen, H. A. M.; Cheung, S. S. Encapsulated environment. *Comprehensive Physiology* **2013**, 1363-1391.
- Moran, D. S.; Pandolf, K.B.; Shapiro, Y.; Laor, A.; Heled, Y.; Gonzalez, R. R. Evaluation of the environmental stress index for physiological variables. *Journal of Thermal Biology* **2003**, *28*(1), 43–49, [https://doi.org/10.1016/s0306-4565\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/s0306-4565(02)00035-9).
- Page, S.C., Hepokoski, M.A., Golubev T., Kuklane, K. Predicting the effectiveness of technical rescue gear with thermal modelling software. Eds. Kutlu, B., Kartal, G.E., Türkoğlu, G.C. Proceedings of the 11th European Conference on Protective Clothing, Kuşadası - Aydın, Turkey, May 20-23, **2025a**, p. 59-62, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17472264>.
- Page, S.C., Hepokoski, M.A., Golubev T., Kuklane, K. Predicting the effectiveness of structural internal firefighting gear using computational thermal modeling. Proceedings of the 13th International Manikin & Modelling Meeting (I3M) and The Clothing and Textile Sciences Research Meeting, Wilson College of Textiles, NC State, Raleigh, USA, Oct. 15-17, **2025b**, p. 14, <https://doi.org/10.52750/825607>.
- Parsons, K. *Human thermal environments*. 3rd ed.; Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, **2014**.
- Pandolf, K.B.; Burse, R.L.; Givoni, B.; Soule, R.G.; Goldman, R.F.; Pandolf, K.B. Effects of dehydration on predicted rectal temperature and heart rate during work in the heat. *Medicine & Science in Sports & Exercise* **1977**, *9*(1), 51.
- Périard, J. D.; Eijsvogels; T. M. H.; Daanen, H. Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies. *Physiological Reviews* **2021**, *101*(4), 1873–1979, <https://doi.org/10.1152/physrev.00038.2020>.
- Pettersson, J.; Kuklane, K.; Gao, C. Is there a need to integrate human thermal models with weather forecasts to predict thermal stress? *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 4586. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224586>.

- Petruzzello, S.J.; Gapin, J.I.; Snook, E.M.; Smith, D.L. Perceptual and physiological heat strain: Examination in firefighters in laboratory- and field-based studies. *Ergonomics* **2009**, *52*(6), 747–754, <https://doi.org/10.1080/00140130802550216>.
- Ramanathan, N.L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *Journal of Applied Physiology* **1964**, *19*(3), 531-533.
- Rathour, R.; Das, A.; Alagirusamy, R. Studies on the influence of process parameters on the protection performance of the outer layer of fire-protective clothing. *Journal of Industrial Textiles* **2021**, *51*(5\_suppl), 8107S-8126S, <https://doi.org/10.1177/15280837211054582>.
- Renberg, J.; Lignier, M.J.; Wiggen, Ø.N.; Færevik, H.; Helgerud, J.; Sandsund, M. Heat tolerance during uncompensable heat stress in men and women wearing firefighter personal protective equipment. *Applied Ergonomics* **2022**, *101*, 103702. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103702>.
- Sandsund, M.; Aamodt, E.; Renberg, J. Heat strain in professional firefighters: physiological responses to a simulated smoke dive in extremely hot environments and the subsequent recovery phase. *Industrial Health* **2024**, *62*(5), 312-323, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2023-0151>.
- Sköldström, B. Physiological responses of fire fighters to workload and thermal stress. *Ergonomics* **1987**, *30*(11), 1589–1597. <https://doi.org/10.1080/00140138708966049>.
- Son, S.Y.; Muraki, S.; Tochiara, Y. Exploring the appropriate test methods to examine the effects of firefighter personal protective equipment on mobility. *Fash. Text.* **2022**, *9*, 22, <https://doi.org/10.1186/s40691-022-00295-8>.
- Taylor, N.A.; Lewis, M.C.; Notley, S.R.; Peoples, G.E. A fractionation of the physiological burden of the personal protective equipment worn by firefighters. *European journal of applied physiology* **2012**, *112*, pp.2913-2921, <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2267-7>
- Tochiara, Y.; Lee, J.-Y.; Son, S.-Y.; Bakri, I. Heat strain of Japanese firefighters wearing personal protective equipment: a review for developing a test method. *Ergonomics* **2022**, *66*(5), 676–689, <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2113150>.
- Underwood, C.R.; Ward, E.J. The solar radiation area of man. *Ergonomics* **1966**, *9*(2), 155–168, <https://doi.org/10.1080/00140136608964361>.
- Van Harten, T. Ergonomic and performance differences between firefighter protective clothing systems. MSc thesis report, VU Amsterdam, **2023**, pp. 53
- Van Harten, T; Kuklane, K.; Heus, R.; Daanen, H.A.M. Ergonomic and performance differences between firefighter protective clothing systems. Eds. Kuklane, K.; Mertens, C. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Protective Clothing, Arnhem, Netherlands, May 9-12, **2023**, 154-155, <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230508-NIPV-ESPC-Proceedings-of-the-10th-European-Conference-on-Protective-Clothing.pdf>.
- Wang, F.; Gao, C.; Kuklane, K.; Holmér, I. Effects of various protective clothing and thermal environments on heat strain of unacclimated men: the PHS (predicted heat strain) model revisited. *Industrial Health* **2013**, *51*(3), 266-274, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0073>.
- Wang, S.; Park, J.; Wang, Y. Cross-cultural comparison of firefighters' perception of mobility and occupational injury risks associated with personal protective equipment. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* **2021**, *27*, 664–672, <https://doi.org/10.1080/10803548.2019.1607027>.
- Xu, X.; Rioux, T.P.; Gonzalez, J.; Hansen, E.O.; Castellani, J.W.; Santee, W.R.; Karis, A.J.; Potter, A.W. Development of a cold injury prevention tool: The cold weather ensemble

- decision aid (CoWEDA). In USARIEM Technical Report No. T19-06; March **2019**, Natick, MA, USA.
- Xu, X.; Rioux, T.P.; Gonzalez, J.; Hansen, E.O.; Castellani, J.W.; Santee, W.R.; Karis, A.J.; Potter, A.W. A digital tool for prevention and management of cold weather injuries—Cold Weather Ensemble Decision Aid (CoWEDA). *Int. J. Biometeorol.* **2021**, *65*, 1415–1426, <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02113-0>.
- Xu, X.; Rioux, T.P.; Potter, A.W. Fabric Thermal resistance and ensemble thermal resistances are two different concepts. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **2014**, *11*(11), D187–D188, <https://doi.org/10.1080/15459624.2014.946517>.
- Yung, M.; Du, B.; Gruber, J.; Hackney, A.; Yazdani, A. Fatigue measures and risk assessment tools for first responder fatigue risk management: A scoping review with considerations of the multidimensionality of fatigue. *Safety Science* **2022**, *154*, 105839, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105839>.