

Defensieve buiteninzet: warmtestraling en waterschermen



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

Colofon

Contactpersoon: drs. C. Tonnaer
Titel: Defensieve buiteninzet: warmtestraling en waterschermen
Datum: 26 november 2015
Status: definitief
Versie: 1.0
Projectgroep: E. van Berkel BSc, K. Dangermond MA MSc, R. van den Dikkenberg
MCDm, drs. K. Groenewegen-Ter Morsche, drs. C. Tonnaer, ing. L.
de Witte, L. Wolfs
Projectleider: drs. C. Tonnaer
Review: Dr. Ir. Ricardo Weewer
Eindverantwoordelijk: W. Beckmann MEd MME

Inhoud

	Inleiding	4
1	Warmtestraling en water	8
1.1	Brandoverslag en warmtestraling	8
1.2	Absorptie door vloeibaar water	9
1.3	Theoretisch effect waterschermb	10
2	Onderzoekopstelling	11
2.1	Onderzoekruimte	11
2.2	Stralingsbron	12
2.3	Ontvangende wand	14
2.4	Hydroschild	16
2.5	Gootje	17
2.6	Opstelling	18
2.7	Meetapparatuur	20
3	Uitvoering experimenten	24
3.1	Veiligheidsmaatregelen	24
3.2	Pre-testen en verfijning onderzoeksplan	24
4	Resultaten	26
4.1	Opstelling zonder waterschermb	26
4.2	Opstelling met verticaal waterschermb	27
4.3	Experimenten waterschermb op wand gericht	29
5	Analyse	31
5.1	Temperatuurmetingen	31
5.2	Straling	32
5.3	Opstelling 1 (experiment 1, 2 en 3)	32
5.4	Opstelling 2 (experiment 4, 5 en 6)	33
5.5	Opstelling 3 (experiment 7, 8 en 9)	33
6	Conclusies	35
6.1	Natuurkundige principes	35
6.2	Proefopstelling	35
6.3	Opwarming zonder waterschermb	36
6.4	Opwarming met verticaal waterschermb	36
6.5	Opwarming met 'gekanteld' waterschermb	36
6.6	Eindconclusie	36
7	Discussie en vervolg	37
7.1	Discussie	37
7.2	Vervolg	38
8	Literatuurlijst	39

Bijlage 1: Gebruikte termen	40
Bijlage 2: Wet van Planck	42
Bijlage 3: Specificaties onderzoeksofstelling	43
Bijlage 4: Weersomstandigheden tijdens experimenten	45
Bijlage 5: Meetresultaten per experiment	47
Bijlage 6: Waterverbruik	62
Bijlage 7: Berekeningen thermodynamica en viewfactor	63

Inleiding

Aanleiding en achtergrond

Naar aanleiding van de brand in De Punt in 2008, waarbij drie brandweercolllega's om het leven zijn gekomen, heeft er in Nederland een herbezinning plaatsgevonden op de vanzelfsprekendheid van de binnenaanval als preferente bestrijdingstactiek. Vanuit deze herbezinning is het kwadrantenmodel ontstaan (Hagen, Hendriks, & Molenaar, 2015).

Het kwadrantenmodel gaat ervan uit dat je gebouwbranden op verschillende manieren kunt benaderen. Enerzijds kan de indeling gemaakt worden in een 'binneninzet' (waarbij daadwerkelijk naar binnen wordt gegaan door brandweermensen) en de 'buiteninzet' (waarbij brandweermensen buiten het pand blijven). Anderzijds kan de indeling worden gemaakt in een 'offensieve' benadering van de brand (het proberen te blussen van de brand) en een 'defensieve' benadering (waarbij verdere uitbreiding wordt voorkomen). Deze twee indelingen leiden tot de volgende vier hoofdcategorieën ('kwadranten') waarmee de brandweer een gebouwbrand kan benaderen:

1. offensief binnen (de 'binnenaanval')
2. offensief buiten
3. defensief binnen
4. defensief buiten.

Het doel van het kwadrantenmodel is het expliciet benoemen van de inzetmogelijkheden van de brandweer bij het bestrijden van gebouwbranden. Daarmee wordt het automatisme van de binnenaanval (offensief binnen) doorbroken en ontstaat er een breder handelingsperspectief.

Dit onderzoek heeft betrekking op een techniek die gebruikt wordt bij een defensieve buiteninzet (het vierde kwadrant). De defensieve buiteninzet is er bij gebouwbranden op gericht om brandoverslag naar omliggende panden via de buitenlucht te voorkomen. Aangenomen wordt dat warmtestraling (radiatie) een belangrijke oorzaak is voor brandoverslag via de buitenlucht. Wanneer er sprake is van een mogelijke brandoverslag naar omliggende panden, kan de brandweer een waterscherm plaatsen om deze warmtestraling tegen te houden. Over de effectiviteit van een waterscherm is echter nog relatief weinig bekend.

Vanwege het gebrek aan kennis over de effectiviteit van waterschermen en omdat de Brandweeracademie streeft naar een meer *evidence based* benadering van brandbestrijding is dit onderzoek geïnitieerd. Het voorliggende onderzoeksrapport is voor een belangrijk deel gebaseerd op het afstudeeronderzoek van Ellen van Berkel dat zij in de periode februari tot september 2015 bij de Brandweeracademie heeft uitgevoerd in het kader van de opleiding Crime Science van Saxion Hogeschool te Enschede.

Op voorhand moet opgemerkt worden dat het plaatsen van een waterscherm niet de enige door de brandweer gebruikte techniek is om brandoverslag naar een ander pand te voorkomen. Andere technieken zijn bijvoorbeeld het plaatsen van een waterkanon (gericht op het aangestraalde gebouw) of het 'inschuimen' van het aangestraalde pand met drukluchtschuim. Naar het oordeel van de onderzoekers (onder meer op basis van voorbeelden uit de

praktijk) is het plaatsen van een waterscherm met behulp van een zogenaamd 'hydroschild'¹ een gangbare manier om een belendend pand af te schermen van warmtestraling. Vandaar dat deze techniek als eerste is onderzocht. Mogelijk dat in de toekomst de andere technieken ook onderzocht gaan worden.

Doelen en onderzoeksvragen

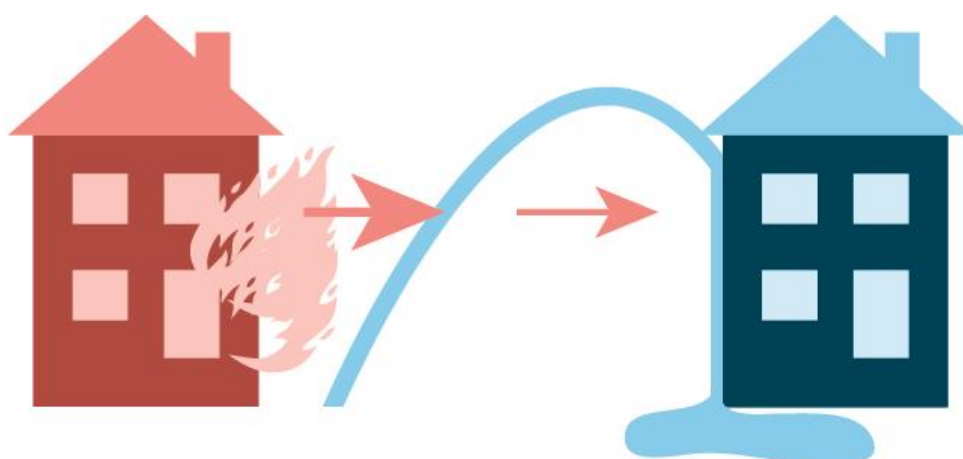
Het onderzoek is erop gericht om te bepalen op welke wijze het door een hydroschild gecreëerd waterscherm in de ontworpen proefopstelling het meest efficiënt ingezet kan worden. Hierbij worden twee inzetmanieren uitgetoond: verticaal tussen het brandende pand en het aangestraalde pand, of diagonaal gericht op het aangestraalde pand.

Het ontwikkelen van de betreffende proefopstelling is een tweede, nevensgeschikt doel van het onderzoek.

Naar aanleiding van deze doelen zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd.

1. Met welke natuurkundige principes moet rekening gehouden worden bij het ontwerpen van een proefopstelling voor het meten van de effectiviteit van een waterscherm bij het tegenhouden van warmtestraling?
2. Hoe ziet een dergelijke proefopstelling eruit voor de twee te onderzoeken varianten?
3. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer er geen gebruikgemaakt wordt van een waterscherm?
4. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer er gebruikgemaakt wordt van een verticaal geplaatst waterscherm tussen de twee wanden?
5. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer het tussen de twee wanden geplaatste waterscherm zo wordt gekanteld dat het de aangestraalde wand nat kan houden (zie figuur 1)?

Figuur 1: Waterscherm gericht op aangestraalde wand



¹ Voor uitleg van de gebruikte begrippen, zie bijlage 1. Recentelijk is daar de zogenaamde 'Firedefender' bijgekomen. Hiermee wordt een waterscherm gecreëerd door middel van een buis met kleine gaatjes. Aangezien deze manier van het plaatsen van een waterscherm nog geen gemeengoed is, is in dit onderzoek uitgegaan van het meer gangbare hydroschild.

Afbakening

In theorie kan brandoverslag tussen twee panden op verschillende manieren plaatsvinden. Vuur of hete lucht kan in contact komt met een brandbaar deel van een tegenovergelegen pand (convectie). Als de panden met bijvoorbeeld metalen constructies aan elkaar verbonden zijn, kunnen deze constructies de hitte geleiden en zodoende brand doen ontstaan. Een derde mogelijkheid is dat vaste brandende delen op het belendende pand terecht komen en daar brand veroorzaken ('vliegvluur'). De vierde mogelijkheid is dat het tegenovergelegen pand door de hitte van het vuur aangestraald wordt en hierdoor zo'n hoge temperatuur bereikt dat het brandbare materiaal tot ontbranding komt.

Verondersteld wordt dat deze laatste manier van brandoverslag verreweg het vaakst voorkomt. Daarom richt dit onderzoek zich uitsluitend op brandoverslag via warmtestraling. In dit onderzoek is deze veronderstelling echter niet nader onderbouwd met statistiek.

In dit onderzoek is gewerkt vanuit een 'laboratoriumopstelling'. Dit betekent dat de experimenten zijn uitgevoerd in een controleerbare, stabiele situatie. Onvoorspelbare factoren zoals wind, neerslag of een fluctuerende vuurlast en dito vlammenfront spelen bij deze experimenten geen rol. In de dagelijkse praktijk van de bestrijding van gebouwbranden spelen deze factoren uiteraard wel een rol. Wat de invloed van deze factoren is op de effectiviteit van een waterscherm, specifiek als het gaat om het tegenhouden van warmtestraling, is in deze studie niet onderzocht.

De experimenten zijn uitgevoerd met een vrijwel gelijke vuurlast die een vrijwel gelijke hoeveelheid warmtestraling opleverde. Wat de effecten zijn bij een grotere of juist kleinere vuurlast c.q. warmtestraling, is niet onderzocht.

Leeswijzer

Wanneer brandoverslag door warmtestraling voorkomen moet worden, is het van belang te weten wat warmtestraling feitelijk is. Hiervoor is enige kennis van de natuurkunde van belang. Ook is het van belang te weten wat vloeibaar water doet met warmtestraling. Daarom wordt in hoofdstuk één nader ingegaan op de natuurkundige principes die hierbij van belang zijn.

In hoofdstuk twee wordt weergegeven hoe de onderzoekopstelling is vormgegeven en welke overwegingen hieraan ten grondslag lagen, waarbij in hoofdstuk drie is beschreven hoe de experimenten feitelijk zijn uitgevoerd. In hoofdstuk 4 worden de meetresultaten van het onderzoek beschreven. Deze meetresultaten worden in hoofdstuk 5 geanalyseerd. Omwille van de leesbaarheid, worden niet alle meetresultaten in hoofdstuk 4 en 5 weergegeven, maar wordt er volstaan met een samenvatting. In bijlagen zijn de meetresultaten meer in detail weergegeven.

Aan de hand van de hoofdstukken een tot en met vijf wordt in hoofdstuk zes een antwoord gegeven op de onderzoeksvragen en wordt in hoofdstuk zeven aangegeven waar eventueel vervolgonderzoek zich op zou moeten richten en welke aanbevelingen er gedaan kunnen worden.

Omdat niet elke lezer bekend is met natuurkundige of brandweertechnische termen en begrippen, worden deze termen en begrippen in bijlage 1 nader verklaard. De belangrijkste natuurkundige principes waar dit onderzoek op is gebaseerd, worden behandeld in bijlage 2 en bijlage 4.

1 Warmtestraling en water

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het natuurkundige verschijnsel warmtestraling. Uitgelegd wordt wat warmtestraling is en hoe het zich verhoudt tot andere vormen van warmteoverdracht. Daarna wordt ingegaan op de mate waarin water in staat is tot het opnemen van warmtestraling en wat dit (in theorie) betekent voor het toepassen van water als middel om warmtestraling tegen te houden.

1.1 Brandoverslag en warmtestraling

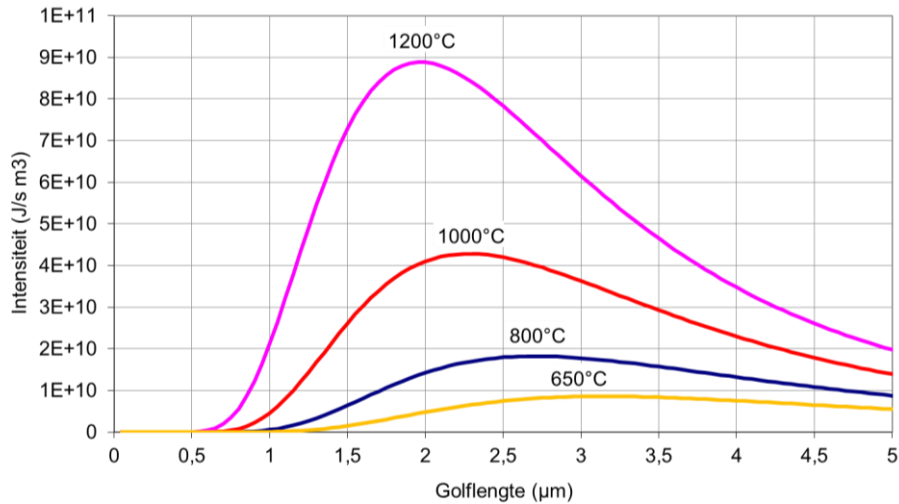
Zoals in de inleiding wordt aangegeven, veronderstellen we dat warmtestraling een belangrijke (zo niet de belangrijkste) oorzaak is van brandoverslag. Brandoverslag staat in de NEN 6068 gedefinieerd als “uitbreiding van brand van een ruimte naar een andere ruimte uitsluitend via de buitenlucht”. Brandoverslag kan zowel tussen twee losstaande gebouwen als in hetzelfde gebouw plaatsvinden. Een voorbeeld van dit laatste scenario is een brand die uit de ramen slaat en via het raam erboven het bovenliggende compartiment aansteekt.

Brandoverslag ontstaat doordat energie (warmte) van de ene plek naar de andere wordt overgebracht. Manieren van energieoverdracht zijn convectie, geleiding, vlamcontact en straling.

- > Bij convectie is er sprake van het opwarmen van een “tussenstof” (meestal lucht), waarbij die tussenstof langs een ander object stroomt en zo dat object opwarmt.
- > Van geleiding spreken we als twee objecten (bijvoorbeeld met een staalconstructie) aan elkaar verbonden zijn, waarbij het staal de energie van het ene pand naar het andere pand geleidt.
- > Ook kan energieoverdracht plaatsvinden door vlamcontact. Bijvoorbeeld doordat de vlammen uit het brandende pand het naburige pand raken, of door middel van ‘vlieg-vuur’. Vliegvuur bestaat uit vaste brandende stoffen die bij een brand door de wind of door opstijgende hete gassen worden meegevoerd.
- > Energieoverdracht door straling komt veel voor bij brand. Straling is energietransport zonder toedoen van een tussenstof. Dat wil zeggen dat er niet eerst een andere stof (zoals lucht) wordt opgewarmd voordat de warmte uiteindelijk zijn doel bereikt. Straling kan dus ook in het luchtledige plaatsvinden. Het beste voorbeeld van deze vorm van energietransport is de zon. De zon zendt naast zichtbaar licht en ultraviolette straling, ook infraroodstraling naar de aarde. Deze straling zelf heeft geen temperatuur. Pas als de infraroodstraling een stof treft, wordt deze vorm van energie gedeeltelijk omgezet in warmte. Om die reden is het koeler in de schaduw, daar is immers minder straling afkomstig van de zon omdat de straling door het object waarbij de schaduw behoort wordt geblokkeerd. Deze warmtestraling (infraroodstraling) komt ook vrij bij brand.

Infraroodstraling kent een bepaalde golflengte en een bepaalde intensiteit. Deze golflengte en intensiteit variëren afhankelijk van de hitte van de brand en kan weergegeven worden met behulp van de Wet van Planck (zie bijlage 2). Omdat de hitte van de vlammen bij een brand meestal varieert tussen de 650 en 1200 graden Celsius (°C), is een berekening van het spectrum uitgevoerd en weergegeven in figuur 2.

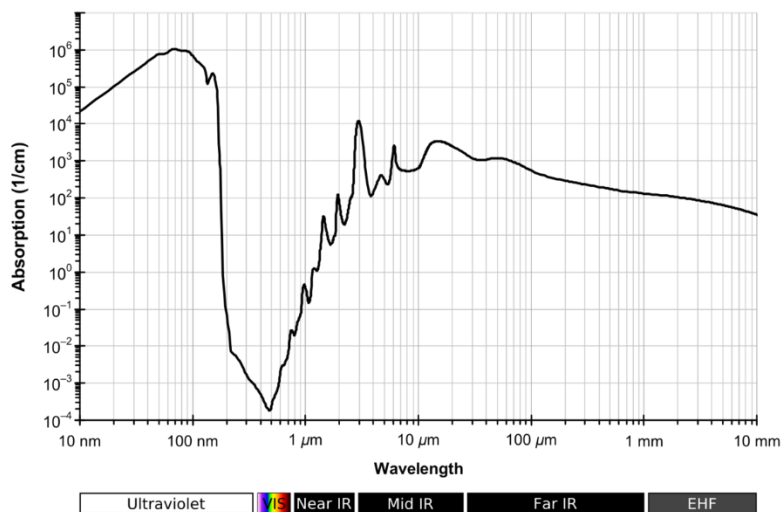
Figuur 2: Uitgezonden spectrum van een zwarte straler²



1.2 Absorptie door vloeibaar³ water

Helder water laat vrij goed licht door (denk bijvoorbeeld aan een aquarium of een zwembad waar je de bodem van kunt zien). Er is dus nauwelijks sprake van absorptie van het zichtbare licht (vrijwel al het zichtbare licht wordt doorgelaten). Zichtbaar licht heeft een golflengte van ongeveer 380 tot 780 nanometer. Wanneer de golflengte groter dan 780 nanometer wordt, is het licht niet meer zichtbaar voor het menselijk oog. We spreken dan van infrarood. De warmtestraling afkomstig van vlammen bevindt zich vooral rond de 2-3 μm. Uit figuur 3 is af te lezen dat vloeibaar water straling ('licht') van deze golflengte juist wel goed absorbeert.

Figuur 3: Absorptievermogen vloeibaar water⁴



² Een 'zwarte straler' is een object dat alle straling absorbeert (en dus geen straling reflecteert).

³ In deze studie wordt uitsluitend uitgegaan van vloeibaar water. Voor water in een andere aggregatietoestand (ijs of damp) gelden andere absorptievermogens.

⁴ Kebes at English Wikipedia [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons.

1.3 Theoretisch effect waterscherm

1.3.1 Dichtheid waterscherm

Aangezien vloeibaar water veel infraroodstraling kan absorberen, kan verondersteld worden dat een waterscherm zoals dat door de brandweer gemaakt wordt met behulp van een hydroschild (zie figuur 4) effectief is in het tegenhouden van warmtestraling. Een kanttekening hierbij is echter dat het vlak dat een waterscherm genereert niet egaal is en openingen vertoont. Vlak bij de uitlaat van de armatuur (het hydroschild) zal er sprake zijn van een egaal vlak. Iets verder hier vandaan zal het vlak niet meer egaal zijn maar 'uiteenvallen' in druppels. Dit betekent dat er in meer of mindere mate een mogelijkheid is dat de infraroodstraling het waterscherm ongehinderd passeert langs de druppels en dus niet geabsorbeerd wordt.

Figuur 4: Hydroschild



1.3.2 Verdamping

Het absorberen van de infraroodstraling door het water is een vorm van energieoverdracht. De elektromagnetische energie van de infraroodstraling wordt omgezet in warmte (het water wordt warmer). Deze warmte kan ertoe leiden dat het water verdampt en daarmee deels zijn absorberend effect verliest. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat de soortelijke warmte van water extreem hoog is (4184 J/kg/K)⁵. Het kost dus erg veel (elektromagnetische) energie om water zodanig te verwarmen dat het in stoom overgaat.⁶ Gezien het feit dat het water slechts enkele seconden aan de warmtestraling wordt blootgesteld, ligt het niet voor de hand dat eventuele verdamping van het water significant is.

⁵ Zie bijvoorbeeld <http://water.usgs.gov/edu/heat-capacity.html>.

⁶ Dit betekent dat er ruim 4 kilojoules nodig is om een liter water met 1 graad Celsius te verwarmen. Uitgaande van de gemiddelde temperatuur van leidingwater van 13 graden Celsius, zal er dus $87 \cdot 4 = 348$ kilojoules nodig zijn om één liter water tot 100 graden Celsius te verwarmen.

2 Onderzoekopstelling

Om het effect van een waterscherm op het tegenhouden van warmtestraling te bepalen, is het noodzakelijk om de experimenten onder controleerbare omstandigheden te laten plaatsvinden. Ten eerste dient er een stralingsbron gebruikt te worden die een zo constant mogelijke hoeveelheid straling afgeeft. Vervolgens moet er een ontvangende wand geplaatst worden, waarbij de afstand tussen het stralend vlak en het ontvangende vlak steeds gelijk is en ook de hoogte en de hoek van het ontvangende en het stralende vlak gelijk is. Ook het waterscherm dat geplaatst wordt dient bij elk experiment gelijk van omvang, debiet en plaats te zijn. Verder moeten factoren die de metingen beïnvloeden, zoals weersinvloeden, zoveel mogelijk uitgesloten worden. Gezien het belang van de onderzoekopstelling wordt in dit hoofdstuk hier uitgebreid aandacht aan besteed.

2.1 Onderzoekruimte

Vanwege het uitsluiten van mogelijk storende weersinvloeden is er in dit onderzoek voor gekozen om de experimenten binnen uit te voeren. Om die reden is op Troned Trainings Factory van de Twente Safety Campus gedurende drie dagen een voormalige hangar gehuurd (hangar C60, zie figuur 5).

Figuur 5: Hangar C60



Met de keuze voor deze hangar konden weersinvloeden zo veel mogelijk uitgesloten worden. Gedurende de twee testdagen zijn er geen grote verschillen in de weersomstandigheden geconstateerd (zie bijlage 4).

Daarnaast is het mogelijk dat de ontvangende stalen wand behalve door straling deels ook door convectie opwarmt (de lucht in de hangar warmt op). Daarom is de starttemperatuur van de ruimte voor de verschillende experimenten constant gehouden.

2.2 Stralingsbron

Om een zo constant mogelijke stralingsbron te realiseren is een zeecontainer⁷ gebruikt, waarvan de wand aan drie zijden verwijderd is om de zuurstoftoevoer optimaal te houden (zie figuur 6). In deze zeecontainer zijn per experiment drie stapels van elk elf houten pallets op twintig centimeter van de achterwand geplaatst (zie figuur 7, 8 en 9).⁸ De vochtigheidsgraad van de pallets is zo constant mogelijk gehouden en regelmatig gemeten, zodat eventuele invloeden op de reproduceerbaarheid inzichtelijk zouden zijn. Door de brandende pallets warmde de achterwand op, waarna de wand warmte uitstraalde. Zodoende fungeerde de achterwand als een stralend vlak van ongeveer 2,5 bij 6 meter. Door deze achterwand als stralend vlak te gebruiken (in plaats van de straling rechtstreeks van de vlammen te laten komen), kon een redelijk egaal stralend vlak gecreëerd worden met weinig fluctuaties.

Figuur 6: Opengewerkte zeecontainer



⁷ De afmetingen van de zeecontainer zijn: hoogte: 2591 mm; lengte: 6058 mm; diepte: 2438 mm (buitenzijde).

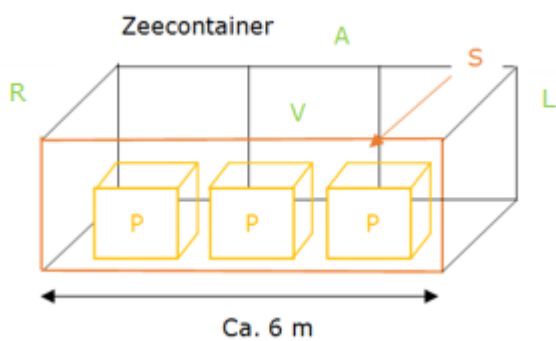
⁸ Zie bijlage 2 voor specificaties. Een aantal pallets zijn gewogen om een schatting te maken van de hoeveelheid hout dat per experiment is gebruikt (zie bijlage 3).

Figuur 7: Pallets in zeecontainer



In figuur 8 is een weergave te vinden van de stralingsbron.

Figuur 8: Schematische weergave stralingsbron



Legenda: S: stralende wand; P: pallets; L: linkerzijde; R: rechterzijde; V: voorzijde; A: achterzijde

Figuur 9: Zijaanzicht zeecontainer



Om de brand goed te laten ontwikkelen is het belangrijk dat er een constante toevoer van voldoende zuurstof plaatsvindt. Ten behoeve van deze aanvoer is bij de experimenten steeds een opening van 3 meter van de toegangsdeuren aangehouden.

2.3 Ontvangende wand

Tegenover de hete wand van de zeecontainer ('stralende wand'), is een 'ontvangende wand' geplaatst. Dit is de wand waar tijdens de brand een deel van de vrijkomende hittestraling op valt. De ontvangende wand stelt de buitenmuur van het belendende pand voor. Ten behoeve van het verkrijgen van bruikbare meetgegevens zijn er voor de experimenten enkele eisen aan deze ontvangende wand gesteld. Zo moest de wand een goede warmtegeleiding hebben (in verband met de temperatuurmetingen), tegen hoge temperaturen (enkele honderden graden Celsius) kunnen en ook voldoende snel weer afkoelen (om weer op tijd een volgend experiment te kunnen doen).

Een zeer dunne plaat koudgewalst staal bleek aan deze eisen te voldoen. Deze plaat straalt veel warmte uit (emissiecoëfficiënt van 0,75-0,85). Om relatief snelle temperatuurveranderingen te krijgen bij een verandering in de hoeveelheid ontvangen straling, is de plaat zo dun mogelijk gehouden. Met behulp van houten balken⁹ is de plaat aan de achterwand van de hangar (gipsplaten en geprofileerd staal) bevestigd (zie figuur 10). De houten balken waartegen de ontvangende wand was bevestigd geleiden slecht en onttrekken relatief weinig warmte van de staalplaat. In tabel 1 zijn de productspecificaties van de staalplaat opgenomen.

⁹ Tijdens de pre-testen (zonder waterscherm) is een houten balk in brand geraakt. Dit gebeurde bij een gemeten straling van 13,8 kW/m². Dit voorval illustreert dat bij deze opstelling brandoverslag reëel is.

Tabel 1: Productspecificaties belendende wand

Belendende wand: koud gewalst staal	
Afmetingen (lengte x breedte x dikte)	2000 mm x 1000 mm x 3 mm
Dichtheid	7,85 kg/m ³
Soortelijke warmte	460 J/(kg*K)
Warmtegeleidingscoëfficiënt	55 W/(m*K)
Emissiecoëfficiënt	0,75 – 0,85
Firma	Giesmar Aluminium botenbouw
Website	http://www.giesmar.nl/

Figuur 10 Staalplaat ('ontvangende wand')



2.4 Hydroschild

Tussen de stralende wand en de ontvangende wand is een ruimte van drie meter vrij gelaten. In het midden daarvan is een hydroschild geplaatst om een waterscherp te kunnen realiseren (zie figuur 11).

Een korte inventarisatie bij brandweerposten heeft geleerd dat er allerlei hydroschilden gebruikt worden in Nederland. Sommige hydroschilden zijn bij een leverancier gekocht, terwijl andere door brandweermedewerkers zelf in elkaar gezet zijn. Het principe van een hydroschild is eenvoudig. Vanuit een lage drukslang wordt water tegen een haaks hierop gemonteerd plaatje gespoten. Hierdoor ontstaat een waaiervormig vlak water (het waterscherp). Het hydroschild dat voor de experimenten is gebruikt is geleend van een brandweerpost in Eibergen (Veiligheidsregio Noord- en Oost-Gelderland). Dit betrof een door de brandweer gefabriceerd exemplaar. Ter controle is het waterscherp dat hiermee gemaakt kon worden vergeleken met een waterscherp dat gemaakt is met een hydroschild dat in de handel verkrijgbaar is. De verschillen waren minimaal. Het hydroschild uit Eibergen leverde een iets egalere vlak op dat het handelsexemplaar.

Het hydroschild levert een waterscherp op van ongeveer 11 meter breed en ongeveer 3,4 meter hoog bij een druk van 2 bar. Dit bleek ruim voldoende voor het afschermen van de ontvangende wand.

Figuur 11: Plaatsing hydroschild



2.5 Gootje

De vijfde onderzoeksvraag van dit onderzoek gaat over de effectiviteit van een waterscherm dat zo is geplaatst dat het de ontvangende wand nat kan houden. Dit houdt in dat het waterscherm niet ‘traditioneel’ recht omhoog gericht is, maar juist gericht is tegen de aangestraalde wand. Het principe van deze tactiek is dat:

- a. het waterscherm enerzijds de straling afschermt door het water dat vanuit het hydroschild omhoog spuit, en
- b. dat er een tweede afschermende werking is, namelijk doordat er een laagje water over de aangestraalde wand loopt.

Tijdens de voorbereidingen van de experimenten werd echter duidelijk dat de achterwand van de hangar deels uit gipsplaten bestaat en derhalve niet tegen grote hoeveelheden water bestand is. Het is dan ook niet mogelijk gebleken om de oorspronkelijke opstelling te hantieren, zoals die voor dit deel van de experimenten bedacht was.

De oplossing is gevonden in een opstelling waarbij de ‘traditionele’ opstelling van het waterscherm voor (a) zorgt, maar dat de stalen plaat (waar de metingen plaatsvinden) apart natgehouden wordt en zo simuleert dat het waterscherm op de ontvangende wand gericht is (b). Hiertoe is een ‘gootje’ ontworpen. Door dit gootje stroomt water, waarbij het water uit dit gootje nagenoeg gelijkmatig over de stalen wand stroomt. Zie figuur 12. De hoeveelheid water dat normaal gesproken over de belendende wand zou stromen is rekenkundig vastgesteld. Tijdens de experimenten leverde het gootje 13 liter water per minuut bij een druk van 2 bar.

Figuur 12: Opstelling gootje

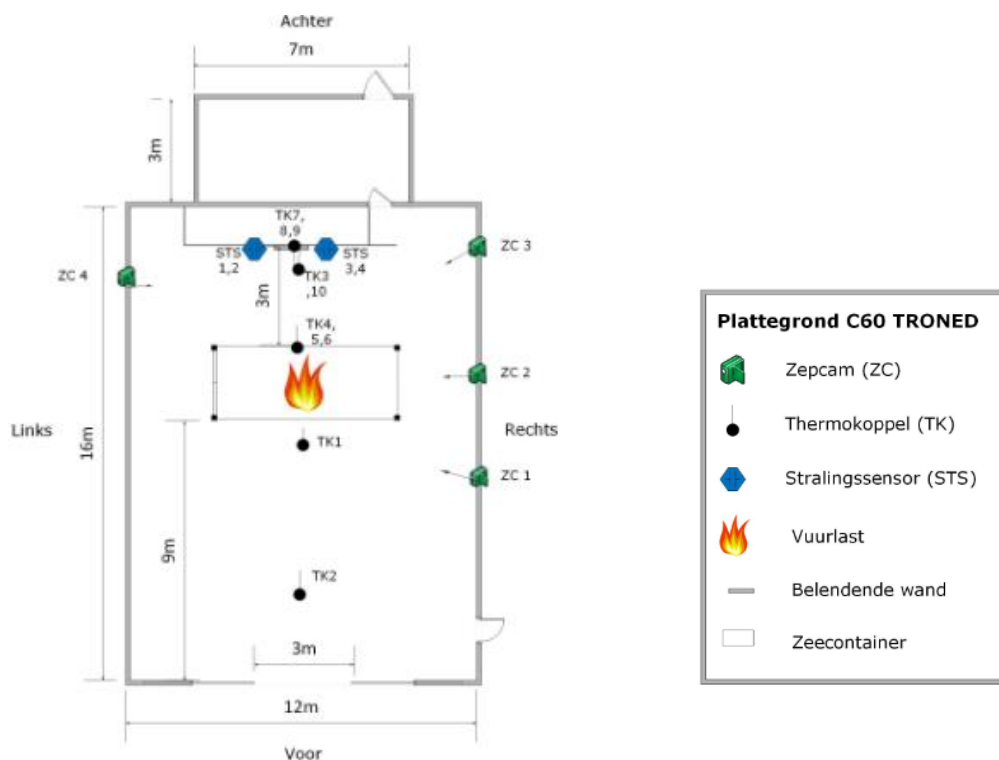


2.6 Opstelling

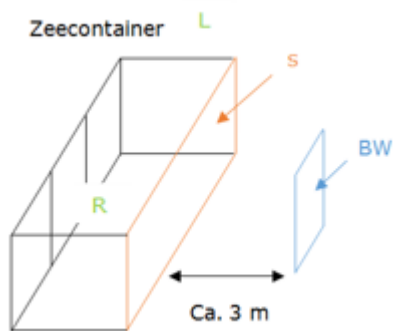
De hangar is uitgerust met temperatuurmeters (thermokoppels) en camera's. Ook de achterwand van de zeecontainer en de ontvangende (belendende) wand zijn op verschillende hoogtes uitgerust met thermokoppels. Direct naast de ontvangende wand zijn bovendien op verschillende hoogtes stralingsmeters geplaatst.

Een plattegrond van de inrichting van de hangar is weergegeven in figuur 13. Een schematische weergave van de onderzoeksofstelling is weergegeven in figuur 14.

Figuur 13: Inrichting hangar



Figuur 14: Schematische weergave onderzoekopstelling



Legenda: S = stralende wand; BW = belendende (ontvangende) wand; L = linkerzijde; R = rechterzijde

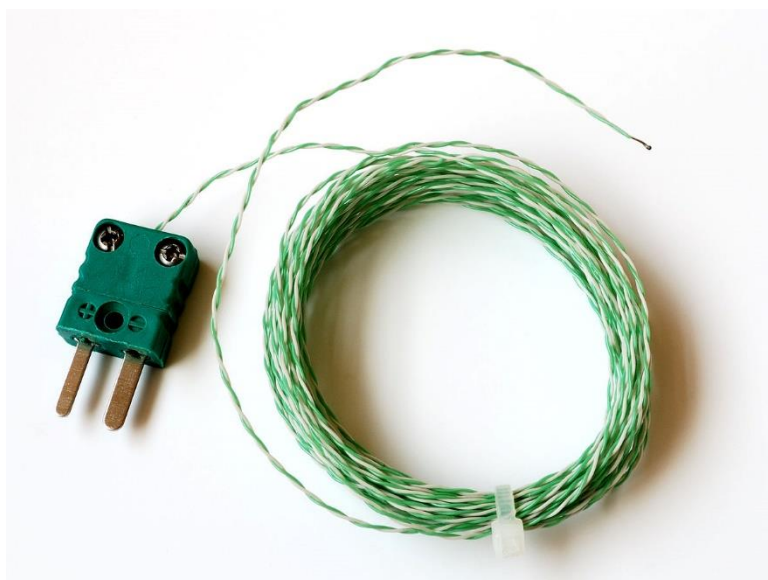
De ruimte tussen de stralende wand (zeecontainer) en de ontvangende wand is gesteld op 3 meter. De afstand moet enerzijds beperkt zijn, om zodoende een hoge stralingsintensiteit te bereiken, maar anderzijds groot genoeg zodat het water van het waterscherm noch de stralende wand, noch de ontvangende wand zou raken. Door middel van enkele proeven ('pre-testen') is deze afstand bepaald.

2.7 Meetapparatuur

2.7.1 Thermokoppels

Een thermokoppel is een temperatuursensor bestaande uit een stekker met een draad. In de draad zitten twee draden van verschillende metalen verwerkt. Wanneer de twee verschillende metalen met elkaar in contact worden gebracht, komt er spanning op te staan. Bij het verwarmen van dit contactpunt blijkt de opgewekte spanning volgens een bepaalde curve evenredig met de temperatuur te wijzigen (Delta Ohm Benelux B.V., z.j.).

Figuur 15: Thermokoppel¹⁰



Er zijn twee belangrijke onderdelen in een meetpunt met een thermokoppel.

- > De warme las: het punt waar de twee metalen samen zijn gebracht. Dit is tevens het punt waarmee de heersende temperatuur wordt gemeten.
- > De koude las: de andere zijde van de meetkring waar de spanning wordt gemeten. Ook hier is weer sprake is van een overgang tussen twee metalen, ditmaal binnen het meetinstrument. Ook hier ontstaat dus een spanning (Delta Ohm Benelux B.V., z.d.)

Het meetinstrument waarop de thermokoppels zijn aangesloten 'ziet' een temperatuur die eigenlijk bestaat uit twee opgetelde temperaturen (spanningen), namelijk die van de warme las en die van de koude las. Door bij de koude las de temperatuur (spanning) te meten en deze temperatuur (spanning) af te trekken van de totaal gemeten temperatuur (spanning) leest men de werkelijke temperatuur van het meetpunt af (Delta Ohm Benelux B.V., z.d.).

Op zowel de belendende wand als de stralende wand zijn drie thermokoppels geplaatst. De thermokoppels worden met behulp van bouten en moeren op de platen bevestigd. De bouten en moeren geleiden namelijk goed en op deze manier zijn de thermokoppels makkelijk te vervangen als dat nodig is. De hoogtes van de thermokoppels op de belendende wand werden gelijk gehouden aan de hoogtes van de thermokoppels op de stralende wand. Met de hoogte van de thermokoppels wordt rekening gehouden met de bodem van de container. Deze bodem is 23 centimeter hoog. De belendende wand is 23 centimeter boven de grond geplaatst, zodat de thermokoppels van de zeecontainer en de belendende wand op dezelfde hoogte hangen.

¹⁰ Bron foto: "Thermocouple K (2)" by Harke - Own work. Licensed under Public Domain via Commons - [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermocouple_K_\(2\).jpg#/media/File:Thermocouple_K_\(2\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermocouple_K_(2).jpg#/media/File:Thermocouple_K_(2).jpg)

De snoeren van de thermokoppels en de stralingssensoren zijn zo veel mogelijk weggewerkt uit de ruimte waarin de experimenten plaatsvonden. Dit in verband met de vrijkomende hitte en het water dat zich in de ruimte bevond. De snoeren die wel in de ruimte liggen, zijn ter bescherming ingepakt met steenwol en aluminiumfolie.

2.7.2 Stralingssensoren

Een stralingssensor is een meetinstrument waarmee de straling van de omgeving wordt geabsorbeerd en wordt gemeten. Bij de experimenten zijn stralingssensoren van de firma Hukseflux gebruikt. Het gaat hier om het type SBG01 met een range tot 50 kW/m². De SBG01 is een watergekoelde warmteflux sensor, ook wel warmtefluxmeter genoemd.

Zoals bij de meeste stralingssensoren, is de eigenlijke sensor van de SBG01 een thermozuul. Deze thermozuul meet het temperatuurverschil over een klein plastic onderdeel binnen in de SBG01. Dit genereert een kleine uitgangsspanning die evenredig is met het temperatuurverschil gedeeld door de plaatselijke thermische geleidbaarheid van de sensor. De sensor is zwart gecoat, zodat deze zeer veel straling absorbeert.

2.7.3 Watermeters

Om inzicht te krijgen in het waterverbruik van zowel het hydroschild als het gootje zijn twee verschillende watermeters gebruikt. Voor het waterscherm is gebruikgemaakt van de digitale watermeter (hierna te noemen watermeter A). Deze is vooral nauwkeurig bij grote debieten (boven de 21.000 l/h). Voor het water dat vanuit het gootje over de wand liep, werd de analoge watermeter (hierna te noemen watermeter B) gebruikt. Deze is voor het meten van kleinere debieten nauwkeuriger.¹¹

2.7.4 Camera's

Om vanuit de meetunit te kunnen volgen wat er gebeurt in de hangar, zijn videocamera's (Zepcams) geplaatst in de muren van de hangar.

2.7.5 Positie meetapparatuur

Bij de experimenten zijn tien thermokoppels geplaatst.

- > Om de temperatuur in de ruimte vast te leggen zijn drie thermokoppels geplaatst op 50 centimeter onder het plafond (TK1, TK2 en TK3).
- > Drie thermokoppels zijn op de stralende wand geplaatst. Deze metingen geven indirect inzicht in de straling die van de stralende wand afkomt: op verschillende hoogtes en bij zowel de experimenten zonder als de experimenten met het waterscherm (TK4, TK5 en TK6).
- > Drie thermokoppels zijn op de achterzijde van de belendende wand geplaatst. Op deze manier kan de temperatuur van de wand worden gemeten, terwijl de meting niet beïnvloed wordt door het water (TK7, TK8 en TK9).
- > De laatste thermokoppel is in de staalconstructie van de hangaar geplaatst, boven TK 3.

De vier stralingssensoren zijn als volgt geplaatst:

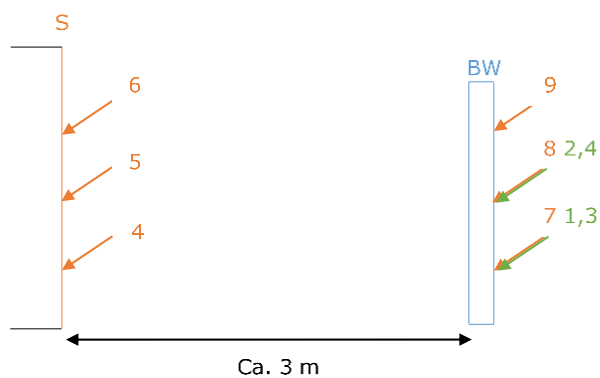
- > twee sensoren zijn op gelijke hoogte met thermokoppel 4 geplaatst, en
- > twee sensoren zijn (ter referentie) op gelijke hoogte met thermokoppel 5 geplaatst.

Alle stralingssensoren zijn op 40 cm naast de belendende wand geplaatst (STS1, STS2, STS3 en STS4).

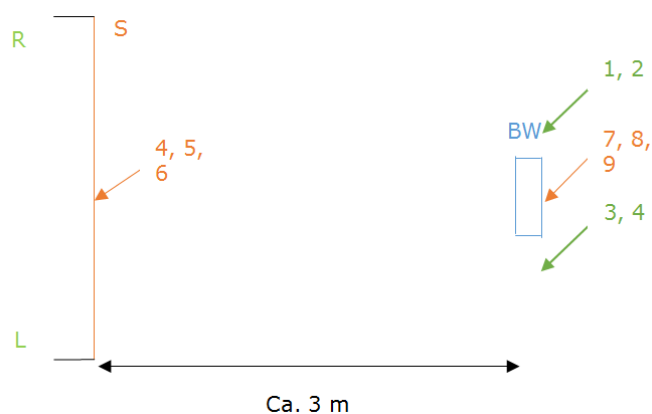
¹¹ Zie R. van den Dikkenberg, K. Groenewegen, M. Kobes en L. Wolfs, *Schuim en water opnieuw belicht. Een onderzoek naar het rookgaskoelend vermogen van DLS OneSeven volgens toepassingsmethode 2.0 versus lagedruk, hogedruk en toepassingsmethode DLS 1.0* (IFV, Arnhem, 7 september 2015) 45.

In figuur 16 en 17 zijn een zij- en bovenaanzicht van de onderzoekopstelling met de thermokoppels en stralingssensoren weergegeven. De posities van de thermokoppels en stralingssensoren staan in tabel 2, 3, 4, 5 en 6.

Figuur 16: Zijaanzicht onderzoekopstelling



Figuur 17: Bovenaanzicht onderzoekopstelling



Legenda: S: stralende wand; WB: belendende wand; L: Linkerzijde; R: Rechterzijde

Tabel 2: Positie thermokoppel 1, 2 en 3

Thermokoppel	Hoogte (onder plafond)
1	0,50 m
2	0,50 m
3	0,50 m

Tabel 3: Positie thermokoppel 4, 5 en 6

Thermokoppel	Hoogte t.o.v. van vloer	Positie t.o.v. de rechterzijde stralende wand
4	0,73 m	3,03 m
5	1,23 m	3,03 m
6	1,73 m	3,03 m

Tabel 4: Positie thermokoppel 7, 8 en 9

Thermokoppel	Hoogte t.o.v. van vloer	Positie t.o.v. de rechterzijde belendende wand
7	0,73 m	0,50 m
8	1,23 m	0,50 m
9	1,73 m	0,50 m

Tabel 5: Positie stralingssensor 1 en 2

Thermokoppel	Hoogte t.o.v. van vloer	Positie t.o.v. de linkerzijde van de belendende wand
1	0,73 m	0,40 m
2	1,23 m	0,40 m

Tabel 6: Positie stralingssensor 3 en 4

Thermokoppel	Hoogte t.o.v. van vloer	Positie t.o.v. de rechterzijde van de belendende wand
3	0,73 m	0,40 m
4	1,23 m	0,40 m

3 Uitvoering experimenten

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de experimenten praktisch zijn uitgevoerd, op basis van de beschreven onderzoeksopzet.

3.1 Veiligheidsmaatregelen

Om de veiligheid tijdens de experimenten te waarborgen, stond bij ieder experiment een brandweerploeg standby. Deze ploeg, bestaande uit vier ervaren brandweermensen, stond onder leiding van een bevelvoerder/veiligheidsman. De brandweermensen zijn geleverd door meewerkende brandweerkorpsen van de regio's Utrecht (VRU), Rotterdam (VRR) en Noord-Oost Gelderland (VNOG), de bevelvoerder/veiligheidsman is geleverd door de Brandweeracademie.

Nadat bij de pre-testen is gebleken dat de stralingsintensiteit in de hangar dermate hoog was dat ook volledig beschermde brandweermensen last kregen van de warmtestraling, mocht er tijdens de experimenten niemand in de hangar aanwezig zijn.

3.2 Pre-testen en verfijning onderzoeksplan

Voor het uitvoeren van de experimenten zijn drie dagen ingepland: dinsdag 16 juni, donderdag 18 juni en vrijdag 19 juni 2015. Dinsdag 16 juni is gebruikt voor het inrichten van de hangar en het uitvoeren van zogenaamde 'pre-testen', waarbij vooral gekeken wordt of alles werkt zoals verwacht. Diezelfde dag zijn de uitgangspunten voor de daadwerkelijke experimenten bepaald.

3.2.1 Start experiment

Om zo veel mogelijk bij ieder experiment dezelfde startcondities te realiseren is bepaald dat het (volgende) experiment pas zou starten als de ontvangende wand een temperatuur van 40 °C of lager zou hebben.

3.2.2 Start waterscherm

Het waterscherm wordt pas gestart wanneer er sprake is van een (conform de praktijk) voldoende 'bedreigende situatie'. Hier is sprake van als thermokoppel 9 (bovenin) een temperatuur van 450 °C meet en één van de stralingssensors 5 kW/m² meet. Deze waarden zijn uiteraard arbitrair en zijn door middel van een inschatting van ervaringsdeskundigen bepaald ('expert opinion').

3.2.3 Einde experiment

Het experiment kan beëindigd worden als thermokoppel 9 zijn maximale temperatuur bereikt heeft (dat wil zeggen: niet verder meer stijgt) en vervolgens weer 100 °C is gedaald, waarbij ook thermokoppel 6 de maximale temperatuur bereikt moet hebben.

3.2.4 Bepaling hoeveelheid straling

Het primaire doel van de experimenten is om te bepalen hoeveel warmtestraling er op de ontvangende wand zou vallen bij de verschillende opstellingen van het waterscherm. De meest makkelijke manier om straling te meten is het gebruik van stralingssensoren. De hoeveelheid ontvangen straling kan echter ook worden afgeleid van de temperatuur van de stalen plaat die als 'ontvangende wand' fungeert. Bij de experimenten zijn dan ook zowel stralingsmeters als thermokoppels gebruikt (zie hoofdstuk 2).

Bij twee opstellingen konden de stralingsmeters zonder problemen gebruikt worden, maar bij de derde opstelling, waarbij de ontvangende wand nat gehouden werd, was dit niet mogelijk, aangezien de stralingsmeters dan nat zouden worden.

Uiteindelijk is gekozen voor de volgende oplossing: de temperatuur van de stalen plaat wordt gebruikt als uitgangspunt om de hoeveelheid ontvangen straling vast te stellen. De gemeten temperatuur wordt dus in feite omgerekend naar de ontvangen straling. Waar mogelijk worden de stralingsmeters (dus bij opstelling 1 en 2) ter referentie gebruikt (met andere woorden: komen de berekende waarden overeen met de gemeten temperaturen en de gemeten hoeveelheid straling bij de andere experimenten).

3.2.5 Aantal experimenten

Om iets te kunnen zeggen over de reproduceerbaarheid van de experimenten, is het van belang dat elke opstelling meerdere keren gedaan wordt. In dit onderzoek is elke opstelling drie keer getest. De vrij constante meetwaarden bij de pretesten bevestigen de inschatting dat drie experimenten voldoende is. Bovendien is gebleken dat drie experimenten op één dag haalbaar is qua tijd en logistiek.

4 Resultaten

Zoals aangegeven zijn er tijdens de twee testdagen drie opstellingen onderzocht:

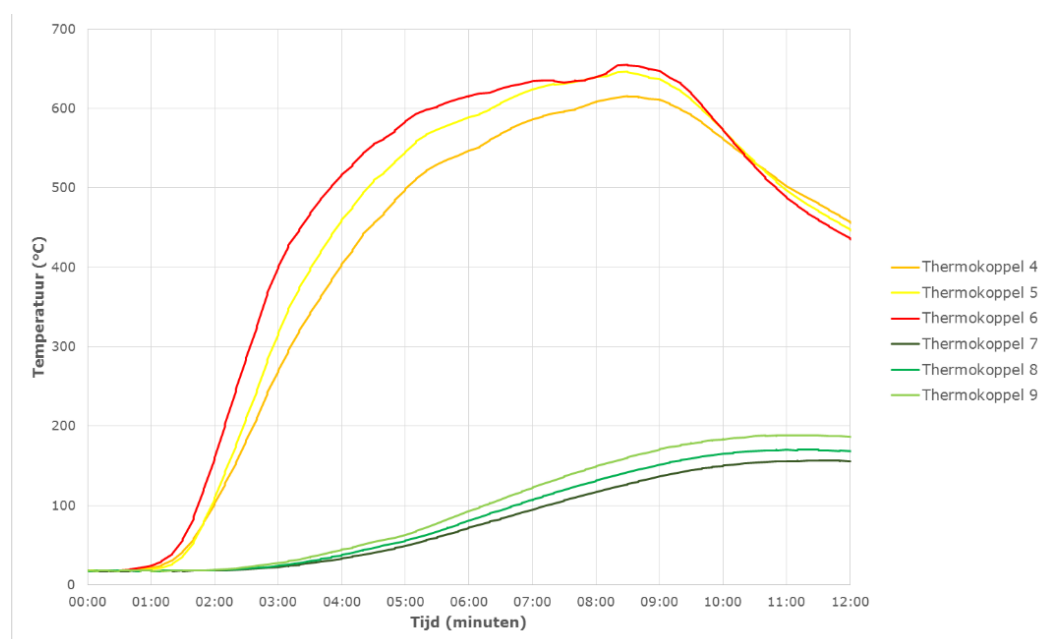
1. een opstelling zonder waterscherm (experiment 1, 2 en 3);
2. een opstelling met waterscherm recht omhoog (experiment 4, 5 en 6);
3. een opstelling waarbij gesimuleerd wordt dat het waterscherm op de ontvangende wand gericht is (experiment 7, 8 en 9).

4.1 Opstelling zonder waterscherm

De resultaten van de drie experimenten die met de opstelling zonder waterscherm zijn gedaan, staan weergegeven in bijlage 5. Omdat de meetresultaten van experiment 1, 2 en 3 niet wezenlijk van elkaar verschillen, worden in deze paragraaf ten behoeve van de overzichtelijkheid alleen de meetresultaten van experiment 1 weergegeven.

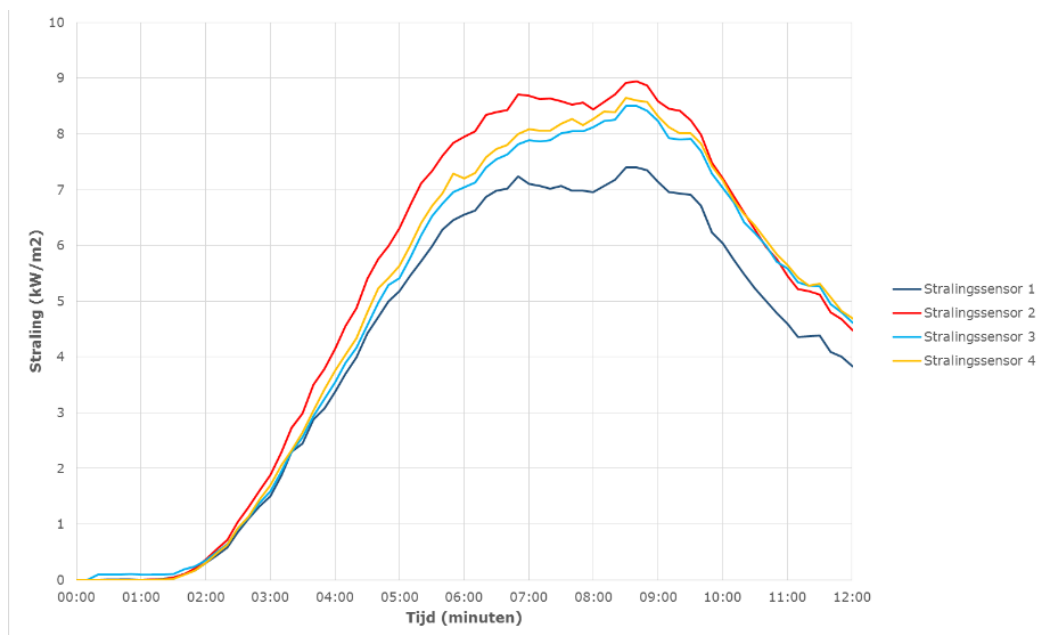
Het verloop van de temperatuur van de stralende wand en het verloop van de temperatuur van de ontvangende wand staan uitgewerkt in figuur 17. Thermokoppel 4, 5 en 6 geven het temperatuurverloop van de stralende wand en thermokoppel 7, 8 en 9 geven het temperatuurverloop van de ontvangende wand weer.

Figuur 17: Temperatuurverloop experiment 1



Bij deze opstelling zijn ook metingen met de stralingsensoren uitgevoerd. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in figuur 18.

Figuur 18: Stralingsverloop experiment 1



4.2 Opstelling met verticaal waterscherm

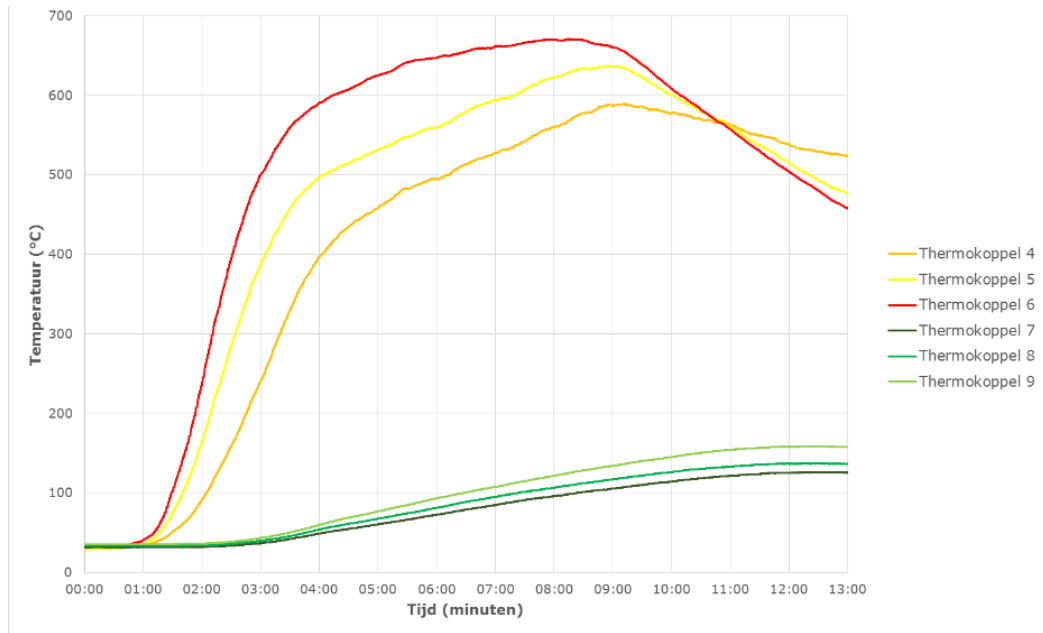
Het waterscherm is recht omhoog tussen de zeecontainer en de belendende wand geplaatst. Hierbij is de temperatuur van de stralende en de ontvangende wand gemeten en is door de stralingssensoren de straling direct naast de ontvangende wand gemeten.

Het waterscherm is steeds 11 minuten aan geweest, met een verbruik van rond de 200 liter per minuut bij 2 bar druk (zie voor gedetailleerde gegevens bijlage 6). Na 11 minuten was de hoogst bereikte temperatuur met 100 graden Celsius gezakt.

Ook voor deze opstelling zijn weer drie experimenten uitgevoerd (nummer 4, 5 en 6). Omdat de meetresultaten van de drie experimenten ook hier niet wezenlijk van elkaar verschillen, worden in deze paragraaf alleen de meetresultaten van experiment 4 weergegeven.

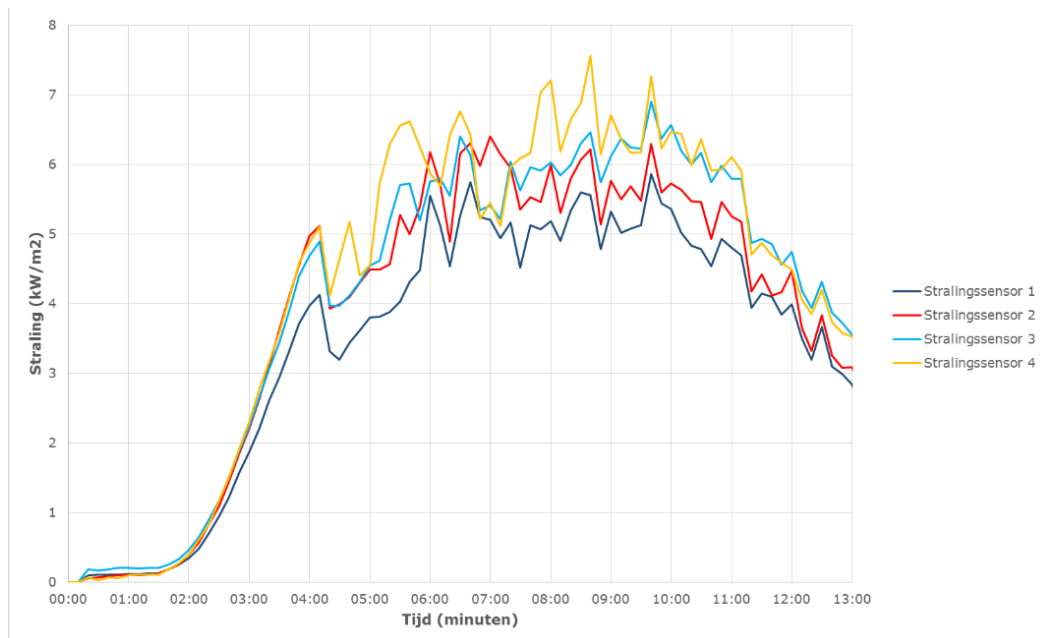
Het verloop van de temperatuur van de stralende wand en het verloop van de temperatuur van de ontvangende wand staan uitgewerkt in figuur 19. In figuur 19 geeft thermokoppel 4, 5 en 6 het temperatuurverloop van de stralende wand weer en thermokoppel 7, 8 en 9 het temperatuurverloop van de belendende wand.

Figuur 19: Temperatuurverloop experiment 4



In figuur 20 staat het stralingsverloop van experiment 4. De grafieken met het temperatuurverloop en stralingsverloop van experimenten 5 en 6 evenals de onderstaande grafieken van experiment 4 zijn ook nog weergegeven in bijlage 5.

Figuur 20: Stralingsverloop experiment 4



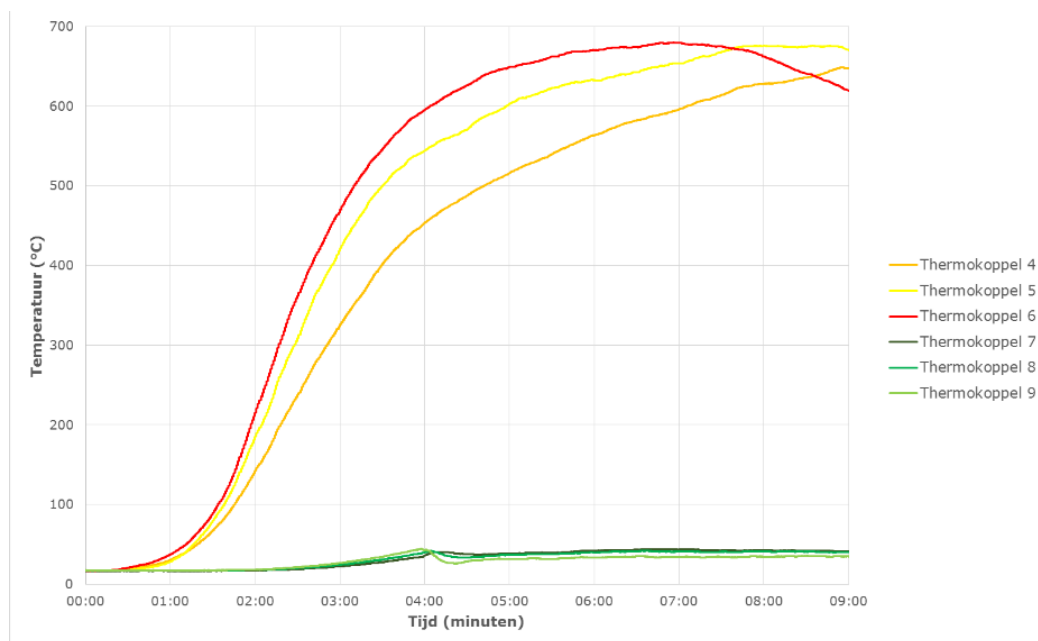
4.3 Experimenten waterscherm op wand gericht

In deze experimenten staat het waterscherm schuin op de wand gericht. Hierbij zorgt het waterscherm er voor dat de ontvangende wand nat gehouden wordt. Vanwege beperkingen aan de onderzoeksruimte is voor het uitvoeren van deze experimenten een constructie bedacht die een dergelijke opstelling simuleert (zie paragraaf 2.5).

Het waterscherm heeft tijdens deze experimenten steeds rond de 8 minuten aan gestaan, waarbij rond de 225 liter water per minuut gebruikt is. Via het geconstrueerde gootje stroomde gedurende dezelfde tijd ongeveer 13 liter water per minuut over de ontvangende wand (zie voor gedetailleerde gegevens bijlage 6).

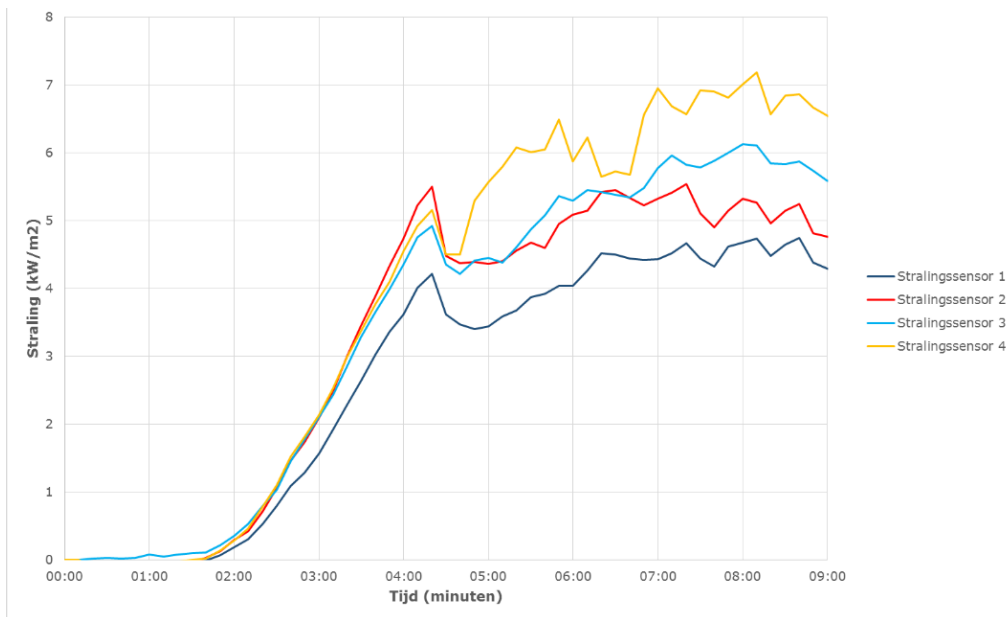
Omdat ook bij deze serie experimenten de meetresultaten niet wezenlijk van elkaar verschillen, is ook hier alleen het temperatuurs- en stralingsverloop van het eerste experiment uit de serie weergegeven (experiment 7). In figuur 21 geven thermokoppel 4, 5 en 6 het temperatuurverloop van de stralende wand aan en thermokoppel 7, 8 en 9 geven het temperatuurverloop van de belendende wand weer.

Figuur 21: Temperatuursverloop experiment 7



Het stralingsverloop van experiment 7 is uitgewerkt in figuur 22. De grafieken met het temperatuurverloop en stralingsverloop van experimenten 8 en 9 zijn weergegeven in bijlage 5.

Figuur 22: Stralingsverloop experiment 7



5 Analyse

De meetresultaten uit het vorige hoofdstuk worden in dit hoofdstuk nader beschouwd. Hoe kunnen deze resultaten geïnterpreteerd worden en wat valt er te zeggen over de reproduceerbaarheid en de validiteit van de experimenten?

5.1 Temperatuurmetingen

Om de reproduceerbaarheid van de experimenten te bepalen is allereerst onderzocht wat de maximale temperatuur van de stralende wand bij de verschillende experimenten is geweest. In tabel 7 staan deze maximumtemperaturen weergegeven.

Tabel 7: Maximale temperatuur stralende wand

Scenario	Experiment nr.	Maximale temperatuur (°C)
Zonder waterscherm	1	655,7
	2	702,8
	3	690,2
Met waterscherm	4	670,4
	5	689,5
	6	661,3
Met waterscherm en gootje	7	679,8
	8	649,8
	9	688,2

De gemiddelde temperatuur van de stralende wand bedroeg 676 °C. De grootste afwijking naar boven bedroeg 4 % (702,8 °C). De grootste afwijking naar beneden bedroeg eveneens 4 % (649,8 °C). Deze relatief kleine verschillen kunnen veroorzaakt zijn door de omstandigheden waaronder de experimenten zijn uitgevoerd en de materialen. Zoals het verschil in gewicht van de pallets, ventilatie in het pand en het opwarmen van materialen. Deze invloeden zijn echter nooit helemaal uit te sluiten als ervoor gekozen wordt om de stralende wand met brandende pallets te verwarmen.

Ook de maximale temperatuur van de belendende wand per scenario ligt dicht bij elkaar. Alleen bij het eerste experiment zonder watergordijn is de belendende wand minder warm geworden dan de overige twee experimenten zonder watergordijn. Dit is te verklaren doordat de wand bij dit experiment nog niet was opgewarmd. De temperatuur van de belendende wand is bij de start van het experiment 17 °C. Bij de overige experimenten is dit tussen de

30 °C en 40 °C. Dit levert een verschil van 10 % op ten opzichte van het gemiddelde. Wanneer deze beginwaarde wordt weggelaten, is de afwijking ten opzichte van het (nieuwe) gemiddelde bij de eerste opstelling minder dan 3 %. Bij de tweede opstelling is de afwijking ten opzichte van het gemiddelde maximumtemperatuur nooit meer dan 4 % en bij de derde opstelling is de afwijking maximaal 10 %.

Tabel 8: Maximale temperatuur belendende wand

Scenario	Experiment nr.	Maximale temperatuur (°C)
Zonder waterscherm	1	188,1
	2	225,8
	3	216,0
Met waterscherm	4	158,6
	5	150,7
	6	159,7
Met waterscherm en gootje	7	44,3
	8	51,1
	9	52,3

5.2 Straling

Hoewel er tijdens de experimenten gebruikgemaakt is van stralingsmeters, zijn uiteindelijk de meetwaarden van de thermokoppels gebruikt bij de verwerking van de resultaten. De waarden van de stralingsmeters zijn gebruikt ter referentie en om te bepalen of de berekeningen juist zijn uitgevoerd. De hoeveelheid straling kan afgeleid worden van de temperatuur met behulp van de wetten van de thermodynamica en de viewfactor. Dit is beschreven in bijlage 7.

5.3 Opstelling 1 (experiment 1, 2 en 3)

Voor het berekenen van de hoeveelheid straling die op de ontvangende wand is gevallen, is uitgegaan van de temperatuur van de stralende wand. Hierbij is gebruikgemaakt van thermokoppel 6 (de bovenste thermokoppel). Deze heeft tijdens de testen de hoogste temperatuur bereikt en wordt als ijkpunt genomen om de straling te berekenen. Deze berekende straling is samen met de gemeten straling van stralingsensor 1 en 2 uitgezet in de grafieken uit bijlage 5.

In de grafieken (zie bijlage 5) is te zien dat de gemeten en de berekende straling redelijk met elkaar overeenkomen. Op basis hiervan is het verdedigbaar om de hoeveelheid straling af te leiden van de gemeten temperatuur. Voor de verdere analyse zal voortaan de berekende straling het uitgangspunt zijn.

De grafieken laten zien dat de lijnen van de uitgerekende straling met als uitgangspunt de stralende wand en de uitgerekende straling met als uitgangspunt de belendende wand kleine verschillen vertonen. Deze verschillen zitten vooral in het gedeelte waarbij de straling weer afneemt. De oorzaak hiervan kan het afkoelen van de belendende wand zijn. Eerst zal de straling die op de wand valt afnemen, waarna de belendende wand afkoelt. Hier zit dus een vertraging in. Verder kunnen er ook verschillen ontstaan door de convectie langs de belendende wand en andere stralende objecten in de omgeving.

5.4 Opstelling 2 (experiment 4, 5 en 6)

Met behulp van de grafieken afkomstig van experiment 1, 2 en 3 (zie bijlage 5) is aangetoond dat zowel de stralende wand als de belendende wand gebruikt kan worden voor het uitrekenen van de straling. Voor experimenten 4, 5 en 6 is de uitgerekende straling in grafieken uitgezet (zie eveneens bijlage 5). De straling is berekend zowel met de belendende wand als de stralende wand als uitgangspunt. Beide berekeningen geven ongeveer hetzelfde resultaat. De bijbehorende berekeningen zijn te vinden in bijlage 7: 'Berekeningen thermodynamica en viewfactor'.

De grafieken van de berekende straling zijn in bijlage 5 weergegeven. De rode lijn is de uitgerekende straling met behulp van de stralende wand. Deze straling zou op de belendende wand vallen als er geen waterscherm tussen stond. Vanuit de belendende wand is de straling uitgerekend die uiteindelijk op de belendende wand is gevallen met het waterscherm tussen de twee wanden in. Dit is de blauwe lijn. Bij elk experiment heeft het rechtopstaande waterscherm iets meer dan de helft van de warmtestraling (rond de 55%) tegengehouden. In tabel 9 staat de maximale straling berekend vanuit de stralende wand en de maximale straling berekend vanuit de belendende wand weergegeven.

Tabel 9: Maximale berekende straling van zowel de stralende als belendende wand van experiment 4, 5 en 6

Experiment	Maximale berekende straling vanuit stralende wand	Maximale berekende straling vanuit belendende wand
4	Ca. 9,7 kW/m ²	Ca. 5,5 kW/m ²
5	Ca. 10,4 kW/m ²	Ca. 5,5 kW/m ²
6	Ca. 9,4 kW/m ²	Ca. 5,5 kW/m ²

5.5 Opstelling 3 (experiment 7, 8 en 9)

De grafieken van experiment 4,5 en 6 (zie bijlage 5) geven weer dat er ongeveer 5 kW/m² door het waterscherm is gegaan. Dit zal bij de experimenten 7, 8 en 9 dus op het laagje water afkomstig van het gootje vallen. Om in kaart te brengen wat er met deze straling gebeurd is, is er een berekening gemaakt. Hierbij is de wet van Lambert-Beer gebruikt. Deze wet heeft inzichtelijk gemaakt dat de straling die op het water op de wand valt, volledig wordt volledig geabsorbeerd door het water. De verder uitleg en berekeningen van deze wet staan vermeld in bijlage 7: 'berekeningen thermodynamica en viewfactor', onderdeel C.

Ondanks dat de wet van Lambert-Beer uitwijst dat alle warmtestraling geabsorbeerd zal worden, vindt er toch een lichte verhoging van de temperatuur van de stalen plaat plaats. Wat de exacte reden hiervan is, blijft speculatie (bijvoorbeeld over de mogelijkheid dat het waterlaagje niet het hele vlak volledig heeft afgedekt of dat er mogelijk sprake was van enige convectorie). De opwarming is echter slechts minimaal en voor praktische toepassing niet relevant. Vanuit natuurkundig oogpunt kan het echter wel wenselijk zijn om hier bij vervolgonderzoek aandacht aan te besteden.

6 Conclusies

In dit onderzoek zijn vijf onderzoeksvragen aan de orde gekomen:

1. Met welke natuurkundige principes moet rekening gehouden worden bij het ontwerpen van een proefopstelling voor het meten van de effectiviteit van een waterscherm bij het tegenhouden van warmtestraling?
2. Hoe ziet een dergelijke proefopstelling eruit voor de twee te onderzoeken varianten?
3. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer er geen gebruikgemaakt wordt van een waterscherm?
4. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer er gebruikgemaakt wordt van een verticaal geplaatst waterscherm tussen de twee wanden?
5. Hoezeer warmt de aangestraalde wand op wanneer het tussen de twee wanden geplaatste waterscherm zo wordt gekanteld dat het de aangestraalde wand nat kan houden (zie figuur 1)?

6.1 Natuurkundige principes

Onderzoeksvraag 1 is behandeld in hoofdstuk 1. De belangrijkste conclusie hieruit is dat brandoverslag op verschillende manieren kan plaatsvinden, maar dat brandoverslag door warmtestraling bij gebouwbranden waarschijnlijk het meeste voor zal komen. Vloeibaar water is een stof die goed in staat is warmtestraling (infraroodstraling) tegen te houden. Op basis van deze natuurkundige principes, mag verwacht worden dat een waterscherm (of een waterlaag) zeer geschikt zal zijn om brandoverslag te voorkomen.

6.2 Proefopstelling

In deze studie is onderzocht in hoeverre een volledig ontwikkelde brand een wand op drie meter afstand aanstraalt en in hoeverre het plaatsen van een waterscherm dit aanstralen kan reduceren. Het waterscherm (gecreëerd door een hydroschild) is daarbij op twee manieren precies tussen de brand en het aangestraalde object geplaatst:

1. verticaal, en
2. schuin op de aangestraalde wand (daarbij de aangestraalde wand nat houdend).

Wegens beperkingen van de testlocatie is manier twee gesimuleerd met behulp van een constructie waarbij het aangestraalde object nat gehouden werd, terwijl óók het waterscherm (verticaal) geplaatst was. Hierdoor ontstaat een situatie dat gebruikgemaakt kan worden van zowel de afschermende werking van het waterscherm als van het afschermende effect van het waterlaagje. Dit effect is bereikt door enerzijds het waterscherm verticaal te plaatsen en anderzijds vanuit een gootje gelijkmatig water over de stalen plaat te laten lopen.

Om te zorgen voor een egaal vlak waar een relatief controleerbare en reproduceerbare hoeveelheid warmtestraling van af zou komen, is gekozen voor een stalen wand van een zee-container en die (door middel van 33 brandende pallets) zodanig te verhitten dat hier een

voldoende grote hoeveelheid warmtestraling vanaf zou komen. Door steeds dezelfde zee-container te nemen, met dezelfde vuurlast en dezelfde verdeling van de vuurlast is dit gecreëerd. Deze zeecontainer is steeds op dezelfde afstand van de aangestraalde wand geplaatst.

6.3 Opwarming zonder waterschermb

Bij de eerste drie testen die gedaan zijn is geen waterschermb ingezet. Dit is gedaan om een 'referentiescenario' te hebben. Bij deze testen zien we dat de ontvangende wand zo'n 7 tot 11 kW/m² straling ontvangt. Dit leidt tot een temperatuurstijging van zo'n 180 graden Celsius.

6.4 Opwarming met verticaal waterschermb

Wanneer het waterschermb verticaal geplaatst wordt, zien we dat de stalen plaat met ongeveer 130 graden Celsius opwarmt. Dit is fors minder dan wanneer er geen waterschermb tussen geplaatst wordt.

6.5 Opwarming met 'gekanteld' waterschermb

Wanneer het waterschermb zo wordt opgesteld dat zowel gebruikgemaakt wordt van het afschermbende effect van het waterschermb als van het afschermbende effect van het nathouden van de aangestraalde wand (hier gesimuleerd door middel van een gootje), neemt de effectiviteit drastisch toe. Er vindt nu nog maar een opwarming van zo'n 25 graden Celsius plaats.

6.6 Eindconclusie

Geconcludeerd kan worden een opstelling waarbij behalve van het afschermbende effect van het waterschermb, ook de aangestraalde wand wordt nat gehouden, het meest effectief is. Bij deze opstelling vindt er nauwelijks opwarming van de aangestraalde wand plaats.

7 Discussie en vervolg

7.1 Discussie

Zoals in de inleiding is vermeld, maakt dit onderzoek deel uit van een veel breder onderzoek naar mogelijke inzetacties in het kader van het kwadrantenmodel. Dit onderzoek richt zich specifiek op de defensieve buiteninzet.

Om praktische redenen is dit onderzoek scherp afgebakend. Er is alleen gekeken naar de invloed van warmtestraling met een bepaalde intensiteit, op een bepaalde afstand, gegenereerd door een hete stalen wand en op de effectiviteit van water om de ontvangende wand af te schermen van deze warmtestraling.

Dit heeft opgeleverd dat we nu een duidelijker beeld hebben van de werking van een waterscherm en de effectiviteit hiervan. We weten nu ook dat het schuin plaatsen van het waterscherm om zodoende een egale laag water op de ontvangende wand aan te brengen, effectiever is dan om het waterscherm recht omhoog te plaatsen.

De dagelijkse praktijk van brandbestrijding is natuurlijk veel grilliger en onvoorspelbaarder dan de hier gecreëerde laboratoriumsituatie. In het echt heeft de brandweer meestal niet te maken met een stralende wand, maar met vlammen. Die vlammen wisselen in intensiteit en kunnen mogelijk ook convectie veroorzaken. De aangestraalde wand is meestal niet een egale stalen plaat, maar kan zeer grillig gevormd zijn en gemaakt zijn van uiteenlopende materialen. Het is niet altijd zeker dat het mogelijk is hier een egale laag water op aan te brengen. Denk hierbij bijvoorbeeld ook aan de aanwezigheid van (al dan niet gesprongen) ruiten. Bovendien is het niet altijd mogelijk om een waterscherm op de gewenste plek neer te zetten, bijvoorbeeld vanwege veiligheidsredenen. En tenslotte kunnen wind en neerslag invloed hebben op zowel de brand als op de effecten van de bestrijding (zo zou een waterscherm kunnen verwaaien).

Bovendien zijn 'slechts' twee mogelijke opstellingen van het hydroschild gebruikt. In de praktijk zijn er wellicht andere technieken denkbaar om een afscherming met behulp van water te realiseren. Of wellicht een afscherming met behulp van andere materialen (bijvoorbeeld een schuimlaag). Wat de effectiviteit hiervan is weten we niet en het verdient aanbeveling dit te onderzoeken.

Bij opstelling 3 is gekozen voor zowel een (verticaal) waterscherm, als het nathouden van de ontvangende wand. Op basis van de wet van Lambert-Beer (zie bijlage 7) zou verondersteld kunnen worden dat alleen het nathouden van de ontvangende wand voldoende is om overslag te voorkomen. Indien dit zo is, vergroot dat niet alleen de mogelijkheden die de brandweer heeft om een defensieve buiteninzet te doen (het plaatsen van een hydroschild is dan niet langer noodzakelijk), maar tegelijkertijd vergroot dat de mogelijkheden van gebouwegenaren om zelf brandrisicoreducerende maatregelen te nemen (zoals het aanbrengen van een gevelsprinkler). Verder onderzoek is echter noodzakelijk om na te gaan of dit inderdaad het geval is.

7.2 Vervolg

Het brandweerveld heeft behoefte aan concrete handelingsperspectieven. Op basis van een zeer specifiek en scherp afgebakend onderzoek als dit, is het lastig om verstrekkende en algemeen geldende aanbevelingen voor het brandweeroptreden in de praktijk te geven. Tegelijkertijd heeft dit onderzoek laten zien dat het schuin plaatsen van het waterscherm en het daarmee nat houden van de aangestraalde gevel vele malen effectiever is dan slechts een verticaal geplaatst waterscherm. Op basis hiervan ligt het voor de hand om – wanneer de mogelijkheid er is - de eerste methode de voorkeur te geven boven de tweede.

Maar tegelijkertijd hebben we geconstateerd dat er nog veel vragen niet beantwoord kunnen worden op basis van dit onderzoek. De belangrijkste aanbeveling is dan ook om aanvullend onderzoek te doen naar verschillende mogelijkheden om een defensieve buiteninzet te doen. In dit aanvullende onderzoek zal gekeken kunnen worden naar:

1. het effect van het alleen nathouden van de aangestraalde wand (dus zonder waterscherm er tussen)
2. het toepassen van alternatieve methoden om warmtestraling tegen te houden, zoals het aanbrengen van gel of schuim op de aangestraalde wand
3. onderzoek naar de mate van voorkomen van andere vormen van brandoverslag (bijvoorbeeld door convectie) en hoe hiertegen opgetreden kan worden.

8 Literatuurlijst

- Attenuation coefficient*. (2015). Opgehaald van Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Attenuation_coefficient
- Delta Ohm Benelux B.V. (z.j.). *Thermokoppel principe*. Opgehaald van
<https://www.deltaohm.nl/home/thermokoppel-principe>
- Giancoli, D. (2009). *Physics for scientist & Engineers*. New Jersey: Pearson Education.
- Hagen, R., Hendriks, A., & Molenaar, J. (2014). *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Herpen, i. R. (z.j.). *Warmtetransport door convectie*. Opgehaald van KLIMAPEDIA:
http://klimapedia.nl/kp_modules/convectief-warmtetransport/
- Klimatologie*. (z.d.). Opgehaald van KNMI:
<http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/selectie.cgi>
- Loock, W. v. (2007). *Veiligheid en gezondheid*. Gent: Academia Press.
- SBG01 (2011) Delft: Hukseflux Thermal Sensors B.V.

Bijlage 1: Gebruikte termen

<i>Brandoverslag</i>	Uitbreiding van brand van een ruimte naar een andere ruimte, uitsluitend via de buitenlucht
<i>(Brand)compartiment</i>	Het gedeelte van één of meer bouwwerken dat bestemd is als maximaal uitbreidingsgebied van brand
<i>CAS-nummer</i>	Een uniek identificatienummer voor chemische stoffen
<i>Convectie</i>	Bij convectie of stroming vindt warmtetransport plaats door een tussenstof, die in beweging is. Convectie vindt altijd plaats via een vloeistof of een gas
<i>DIN-EN-nummer</i>	Dit nummer is de Duitse weergave, en geeft aan dat het aan de Europese norm voldoet
<i>EC-nummer</i>	Ook wel het EG-nummer genoemd, het officiële nummer van de stof in de Europese Unie. Het nummer bestaat uit 7 cijfers in het formaat xxx-xxx-x
<i>Emissiecoëfficiënt</i>	Geeft de mate aan waarin een materiaal warmte uitstraalt
<i>Geleiding (conductie)</i>	De geleiding van warmte via een tussenstof, waarbij de tussenstof zich niet verplaatst
<i>Hydroschild</i>	Een constructie waarbij water tegen een halfronde plaat wordt gespoten, waardoor een ellipsvormig vlak met waterdruppels wordt gevormd.
<i>Inzettactiek</i>	De methode die wordt gebruikt om op basis van het gestelde doel een incident te bestrijden. De inzetstrategie bepaalt dus welke tactiek het meest geschikt is.
<i>Inzettechniek</i>	De manier waarop de inzettactiek wordt uitgevoerd, met welke middelen en technieken. Onder middelen kan ook de beschikbare menskracht worden verstaan.
<i>Thermische traagheid</i>	Geeft de mate aan waarin een materiaal van temperatuur verandert wanneer er warmte wordt toegevoegd.
<i>(Warmte)straling/radiatie</i>	Warmtetransport zonder toedoen van een tussenstof. Veelgebruikte synoniemen zijn: (nabij)IR-straling, hittestraling, hitteflux en heath flux.
<i>Valschaduw</i>	De afstand vanaf een muur, gelijk aan de hoogte van die muur.
<i>Viewfactor</i>	Geeft aan hoeveel straling van het stralend oppervlak er op een ander oppervlak valt. Voor verdere toelichting zie bijlage 7: <i>'Berekeningen thermodynamica en viewfactor'</i> .
<i>Vlamcontact</i>	Het contact tussen de uitslaande vlammen bij een brand en het tegenovergelegen gebouw.

Vliegvuur

Bestaat uit vaste brandende stoffen die bij een brand door de wind of door opstijgende hete gassen worden meegevoerd.

Warmteoverdracht

Het overbrengen van de energie van de ene op de andere stof. Er zijn drie soorten warmteoverdracht, namelijk convectorie, geleiding en straling.

Bijlage 2: Wet van Planck

De natuurkundige Max Planck (1858 – 1947) heeft de uitgestraalde intensiteit van een zwarte straler (een object dat alle straling absorbeert) bepaald, overwegende dat de elektromagnetische energie afkomstig is van de thermische beweging van atomen op de wand van die zwarte straler. Deze intensiteit is het de hoeveelheid straling per micrometer golflengte bij een thermisch evenwicht van het object met de omgeving. (Loock, 2007)

Tabel 10: formule wet van Planck

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

$B_{\lambda}(\lambda, T)$ = intensiteit (J/s × m³)
 h = constante van Planck (J/s)
 c = lichtsnelheid (in het beschouwd medium) (m/s)
 λ = golflengte (m)
 k_B = constante van Stefan Boltzmann (J/K)
 T = temperatuur (K)

De constante van Planck, lichtsnelheid (in het beschouwd medium) en de constante van Stefan-Boltzmann zijn constanten. In dit geval is het beschouwde medium lucht. In tabel 24 zijn de waarden voor deze constanten weergegeven. De temperatuur en golflengte zijn de variabelen.

Tabel 11: waarden constante van Planck, lichtsnelheid en de constante van Stefan-Boltzmann

Constante van Planck	6,62606957 × 10 ⁻³⁴ J/s
Lichtsnelheid	299792458 m/s
Constante van Stefan-Boltzmann	1,3806488 × 10 ⁻²³ J/K

Bijlage 3: Specificaties onderzoeksofstelling

Pallets

Om een indicatie te krijgen van het gewicht en de vochtigheid van de pallets is een aantal pallets gewogen en de vochtigheid van gemeten. De pallets waren op te delen in 3 categorieën. Deze staan vermeldt in tabel 14. Het middelde gewicht van de pallets staat vermeldt in tabel 15.

Tabel 12: pallet code met bijbehorende gewichtsklasse

<i>Pallet code</i>	<i>Gewichtsklasse</i>
091133	± 10 t/m 12 kg
17280P / 109416	± 13 t/m 16 kg
163079	± 18 t/m 21 kg

Tabel 13: gemiddeld gewicht en vochtigheid pallets

<i>Gemiddeld gewicht pallets</i>	
<i>Vochtigheid pallets</i>	10,0-14,4 %
<i>Gemiddelde vochtigheid pallets</i>	12,3 %

Tabel 14: Gewicht en vochtigheid van de pallets gebruikt bij de experimenten

Aantal gewogen pallets (minimaal 8)	16			
Gewicht per pallet (kg)	20,0	21,0	19,9	15,5
	13,3	20,3	14,2	13,9
	10,2	10,7	11,1	11,5
	11,1	18,0	18,0	11,5
Vochtigheid van de pallets	14,4	13,6	13,0	12,7
	11,1	13,8	10,0	10,5
	11,3	14,1	12,9	11,6
	12,7	12,5	12,5	10,9

Bijlage 4: Weersomstandigheden tijdens experimenten

Tabel 15: omstandigheden waaronder experiment 1, 2 en 3 hebben plaats gevonden (Klimatologie, z.d.)

<i>Experiment</i>	1	2	3
<i>Datum</i>	18-06-2015	18-06-2015	18-06-2015
<i>Tijdstip start experiment</i>	09:20:16	10:10:25	11:18:16
<i>Buiten Temperatuur betreffende uur</i>	16.7 °C	17.7 °C	17.9 °C
<i>Luchtvochtigheid</i>	68 %	64 %	55 %
<i>Uurgemiddelde windsnel- heid</i>	5.0 m/s	6.0 m/s	6.0 m/s
<i>Windrichting</i>	300 ° = NWNW	300 ° = NWNW	320 ° = NW

Tabel 16: omstandigheden waaronder experiment 4, 5 en 6 hebben plaatsgevonden (Klimatologie, z.d.)

<i>Experiment</i>	4	5	6
<i>Datum</i>	18-06-2015	18-06-2015	18-06-2015
<i>Tijdstip start experiment</i>	12:11:01	13:47:26	14:36:21
<i>Buiten Temperatuur betreffende uur</i>	16.5 °C	16.9 °C	16.5 °C
<i>Luchtvochtigheid</i>	58 %	58 %	52 %
<i>Uurgemiddelde windsnel- heid</i>	6.0 m/s	6.0 m/s	7.0 m/s
<i>Windrichting</i>	300 ° = NWNW	300 ° = NWNW	290 ° = WNW

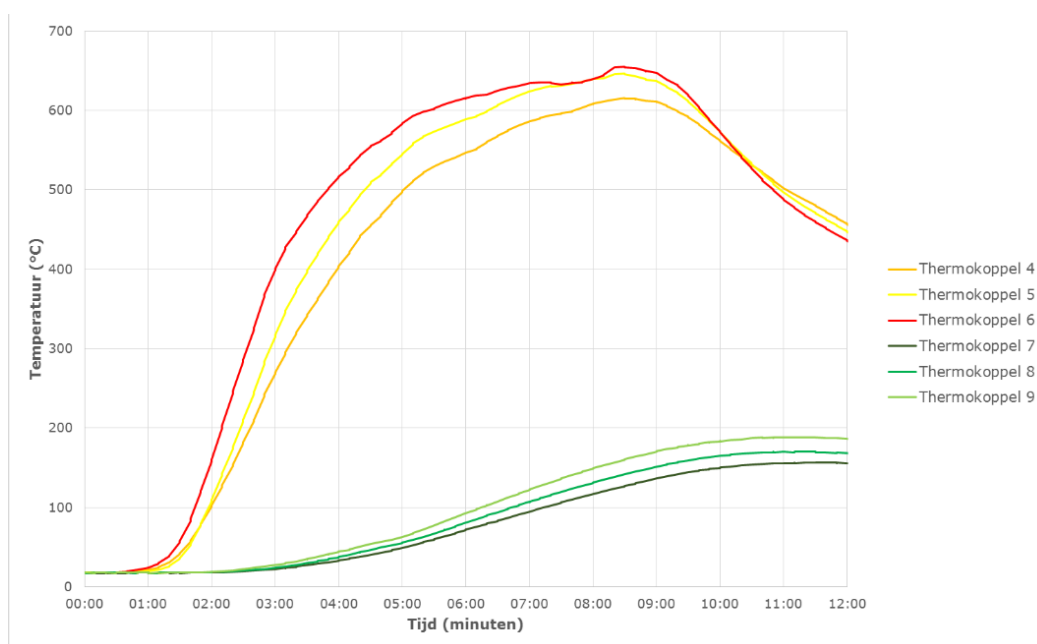
Tabel 17: omstandigheden waaronder experiment 7, 8 en 9 hebben plaatsgevonden (Klimatologie, z.d.)

<i>Experiment</i>	7	8	9
<i>Datum</i>	19-06-2015	19-06-2015	19-06-2015
<i>Tijdstip start experiment</i>	09:11:27	10:13:35	11:03:45
<i>Buiten Temperatuur betreffende uur</i>	14.2 °C	14.7 °C	11.6 °C
<i>Luchtvochtigheid</i>	77 %	67 %	93 %
<i>Uurgemiddelde windsnel- heid</i>	4.0 m/s	5.0 m/s	4.0 m/s
<i>Windrichting</i>	270 ° = W	240 ° = ZWZW	270 ° = W

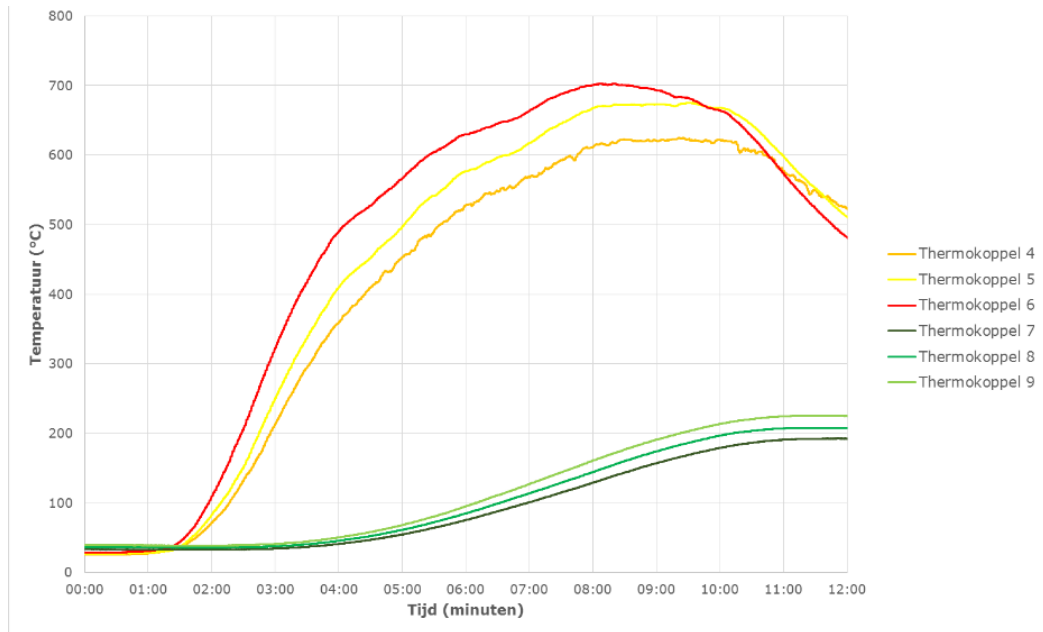
Bijlage 5: Meetresultaten per experiment

Opstelling 1

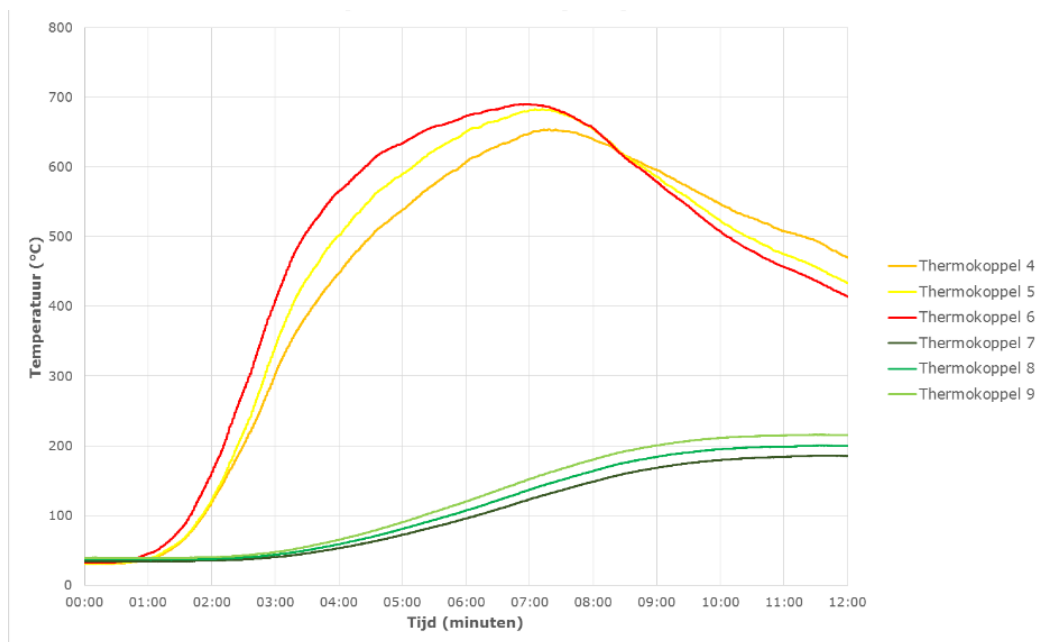
Figuur 23: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 1



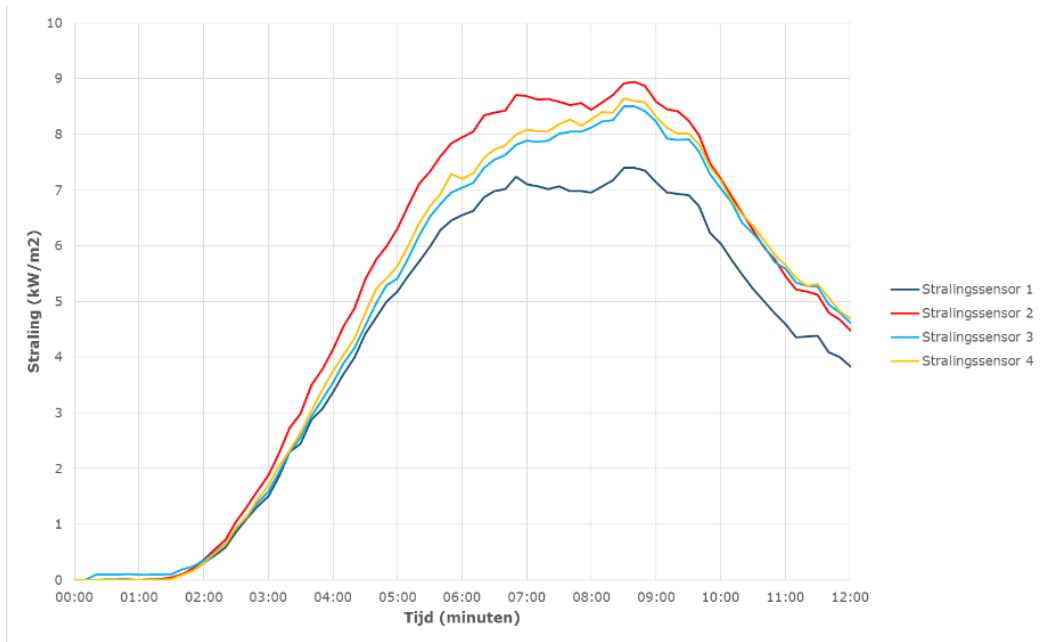
Figuur 24: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 2



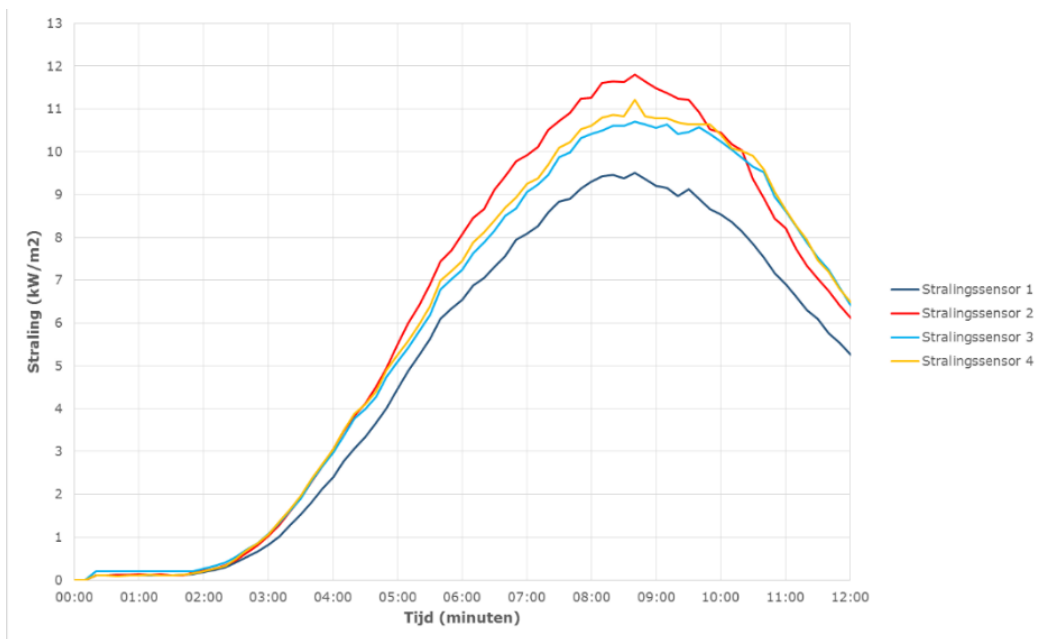
Figuur 25: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 3



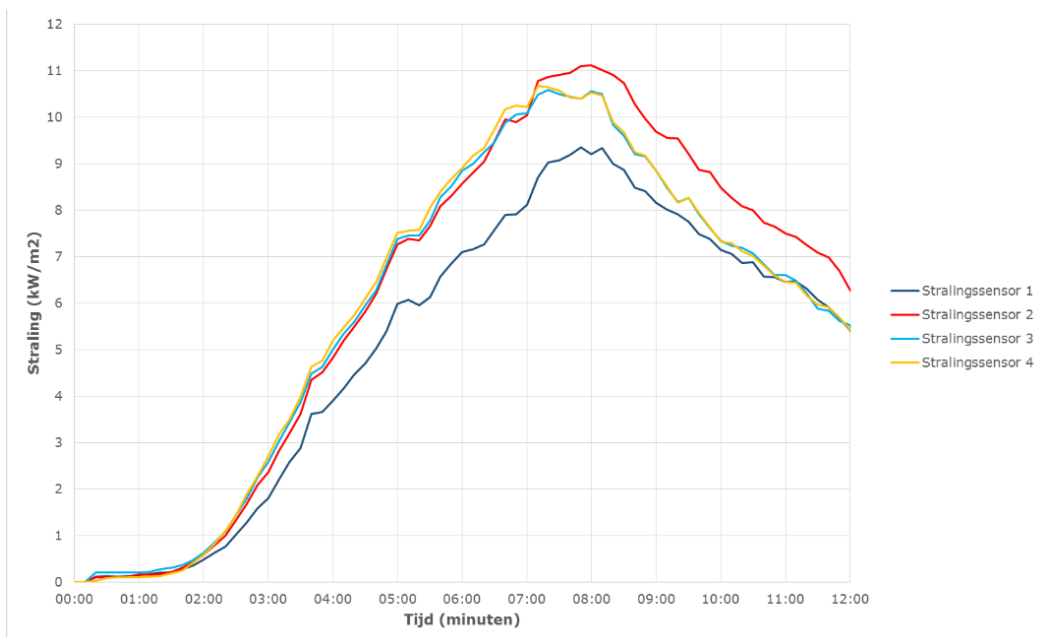
Figuur 26: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 1



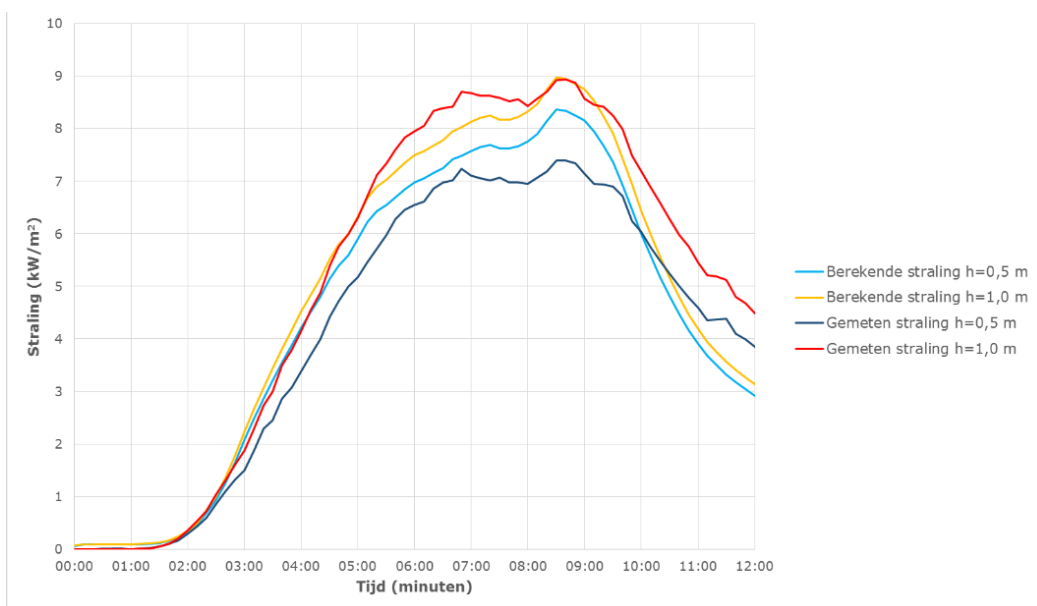
Figuur 27: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 2



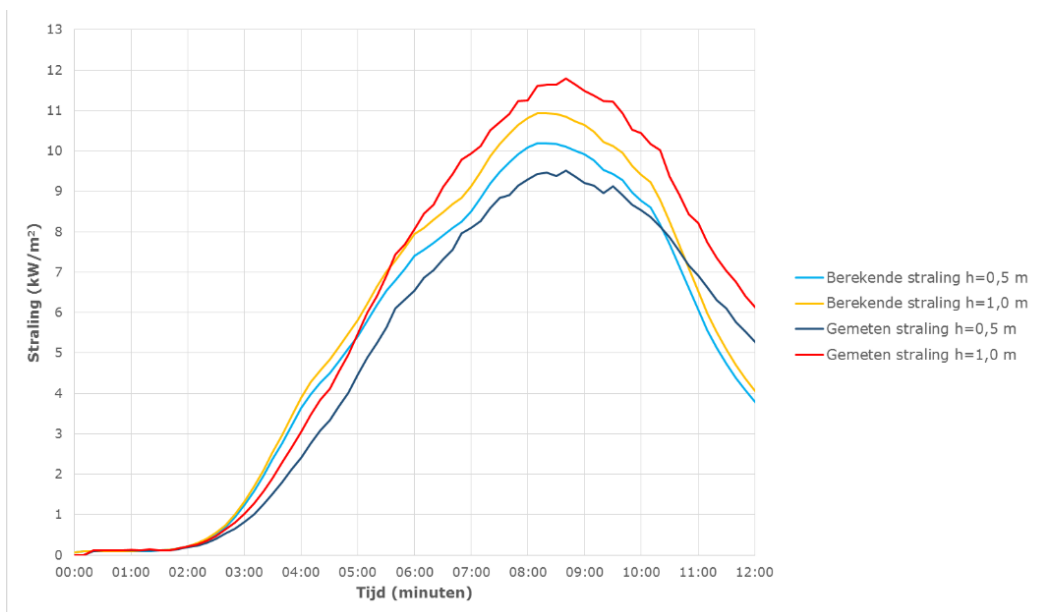
Figuur 28: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 3



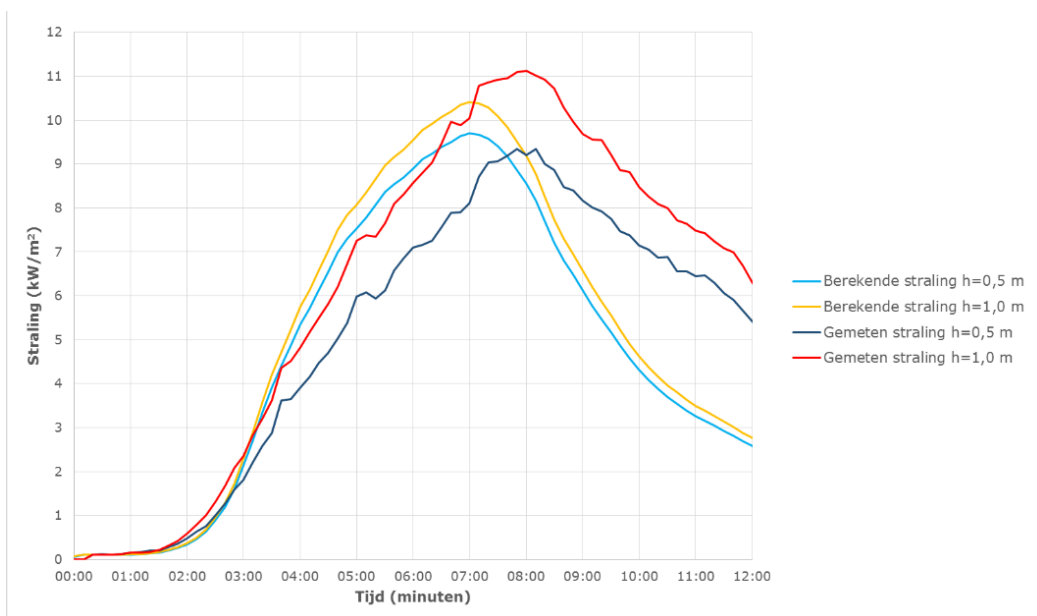
Figuur 29: grafiek vergelijking berekende en gemeten straling experiment 1



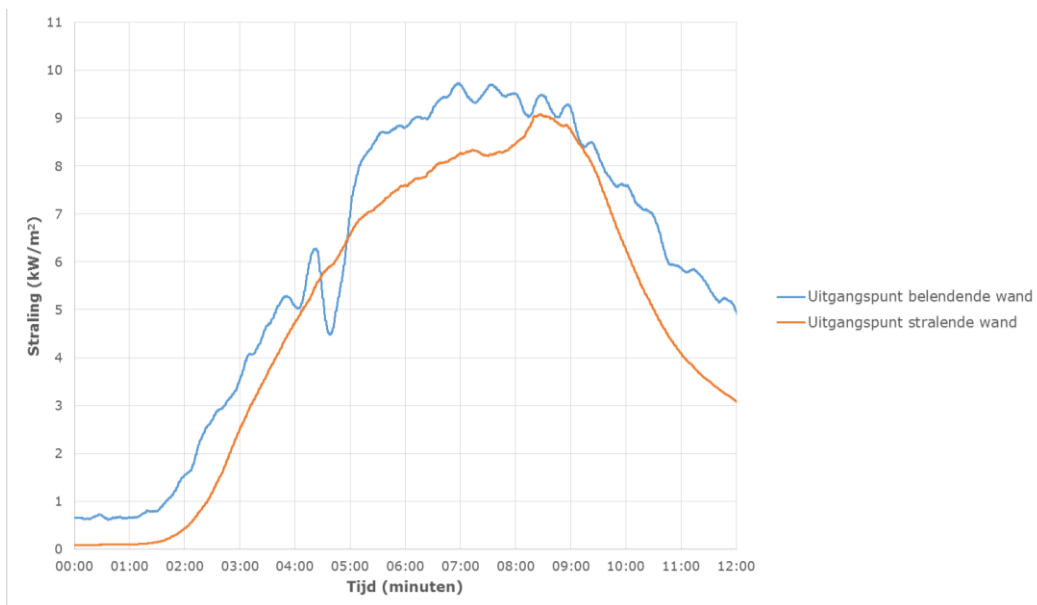
Figuur 30: grafiek vergelijking berekende en gemeten straling experiment 2



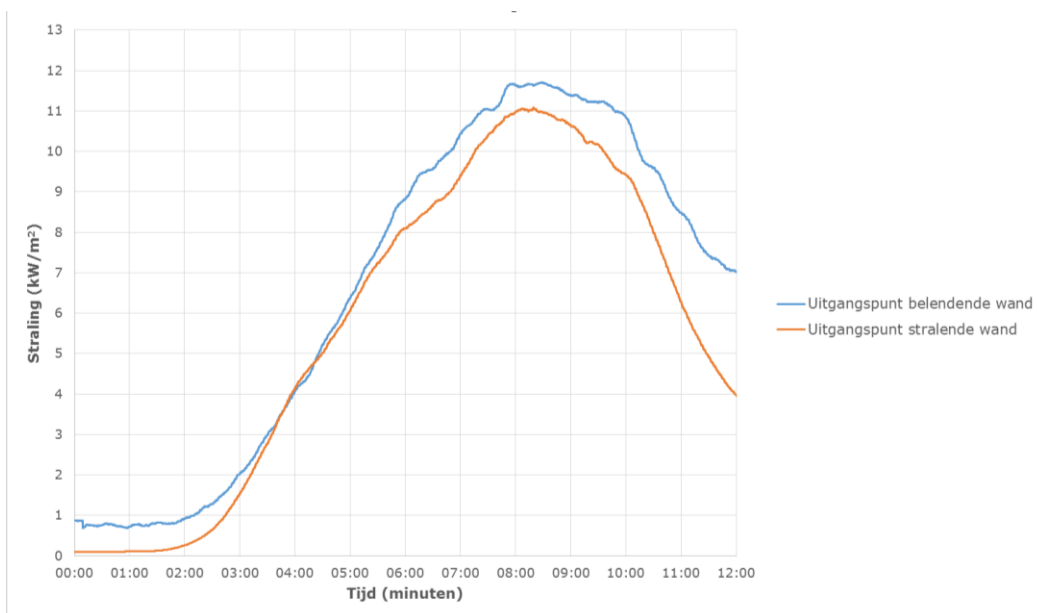
Figuur 31: grafiek vergelijking berekende en gemeten straling experiment 3



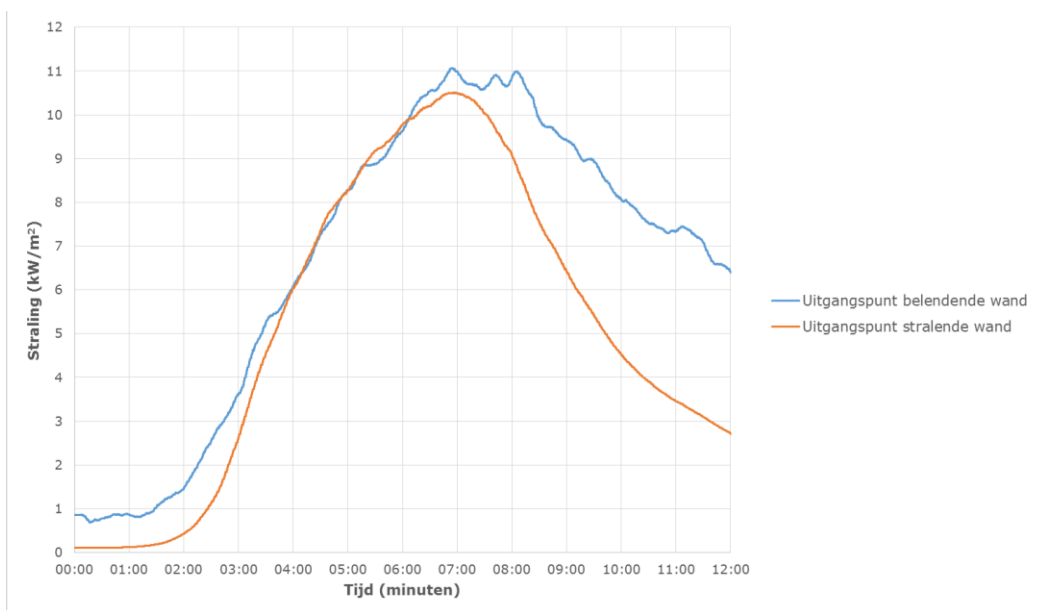
Figuur 32: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 1



Figuur 33: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 2

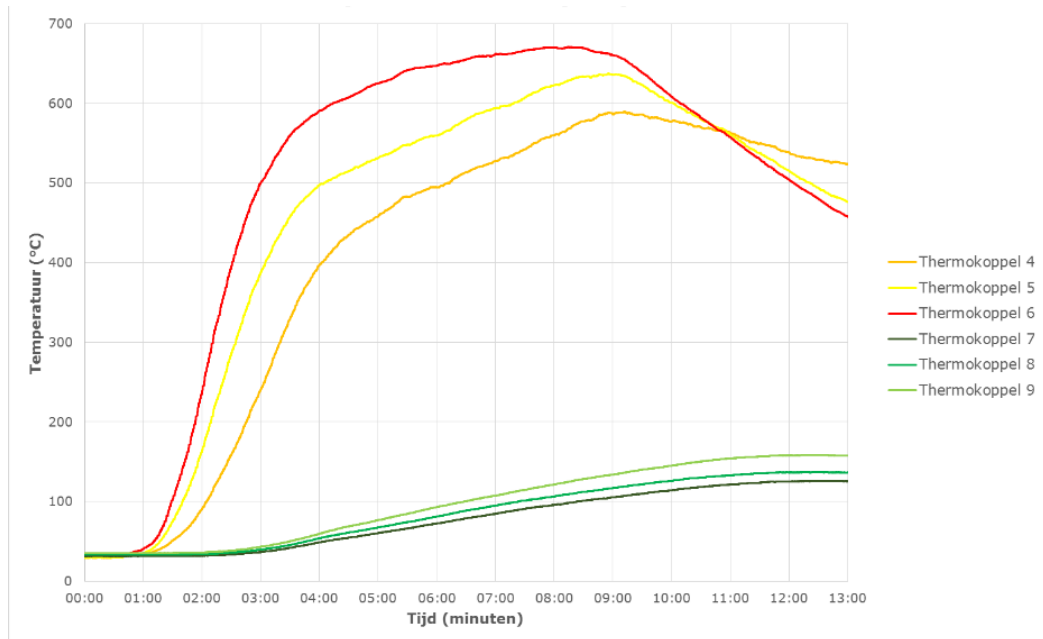


Figuur 34: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 3

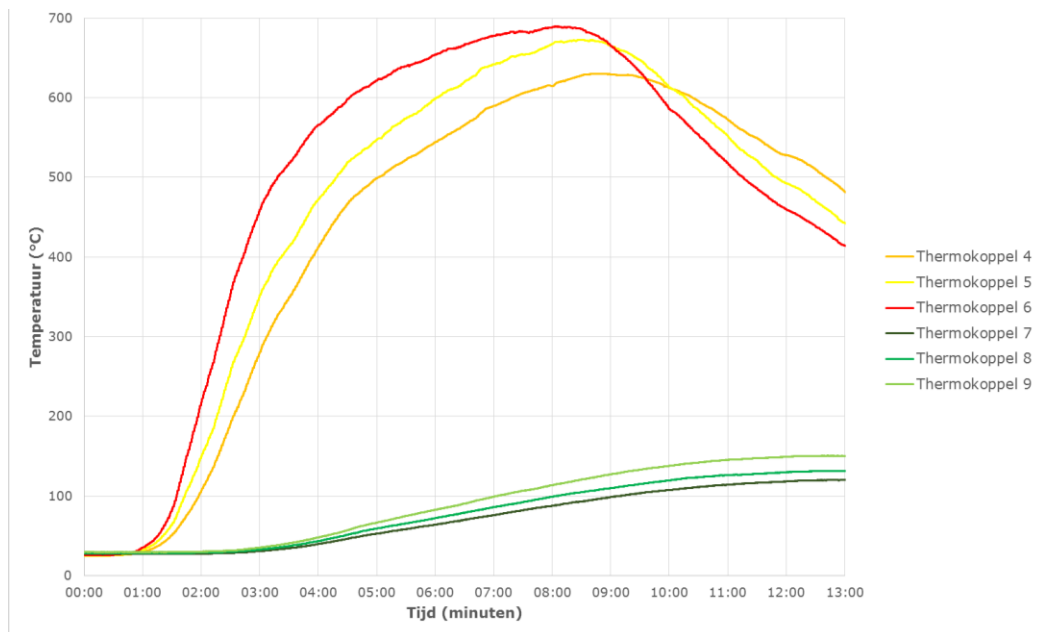


Opstelling 2

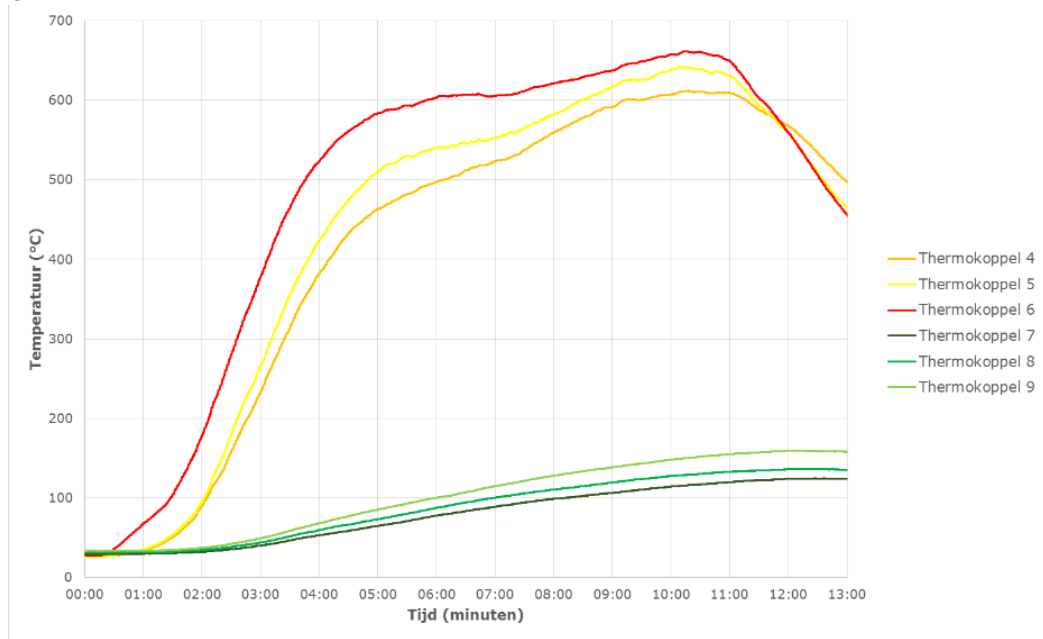
Figuur 35: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 4



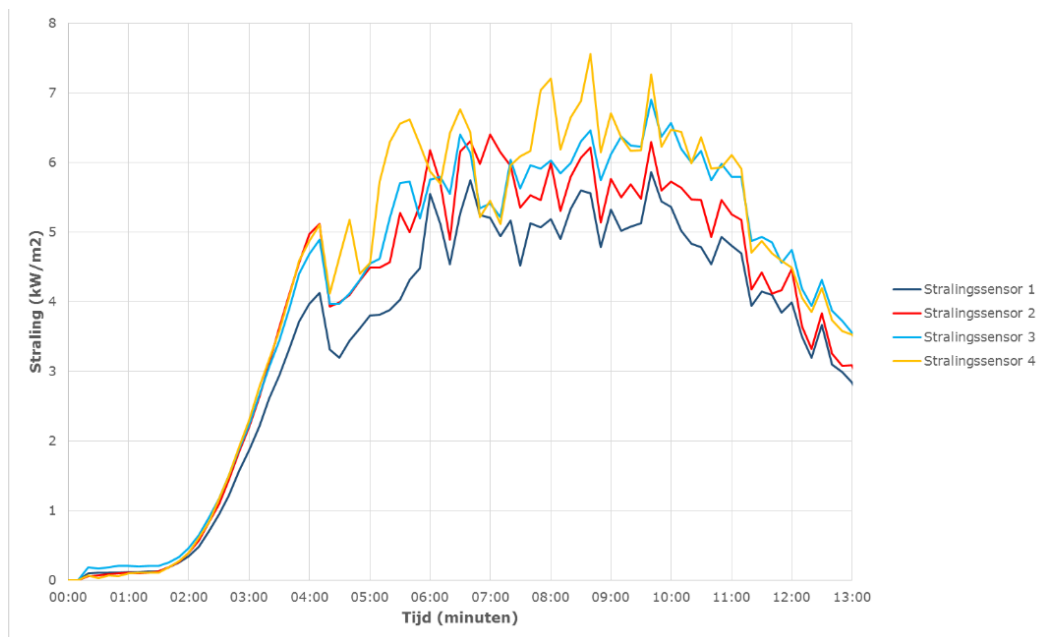
Figuur 36: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 5



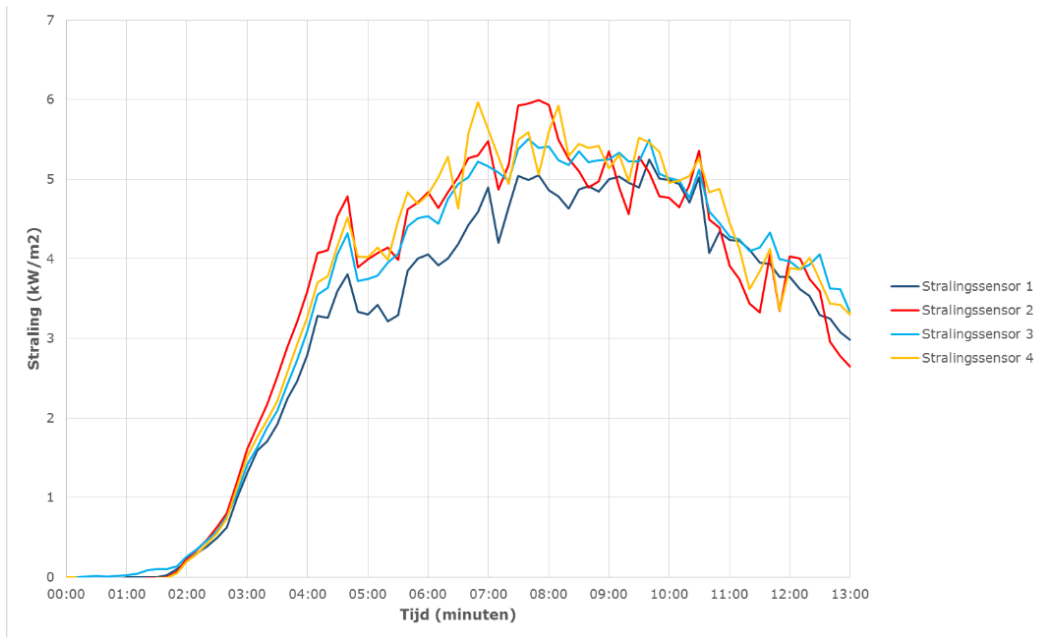
Figuur 37: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 6



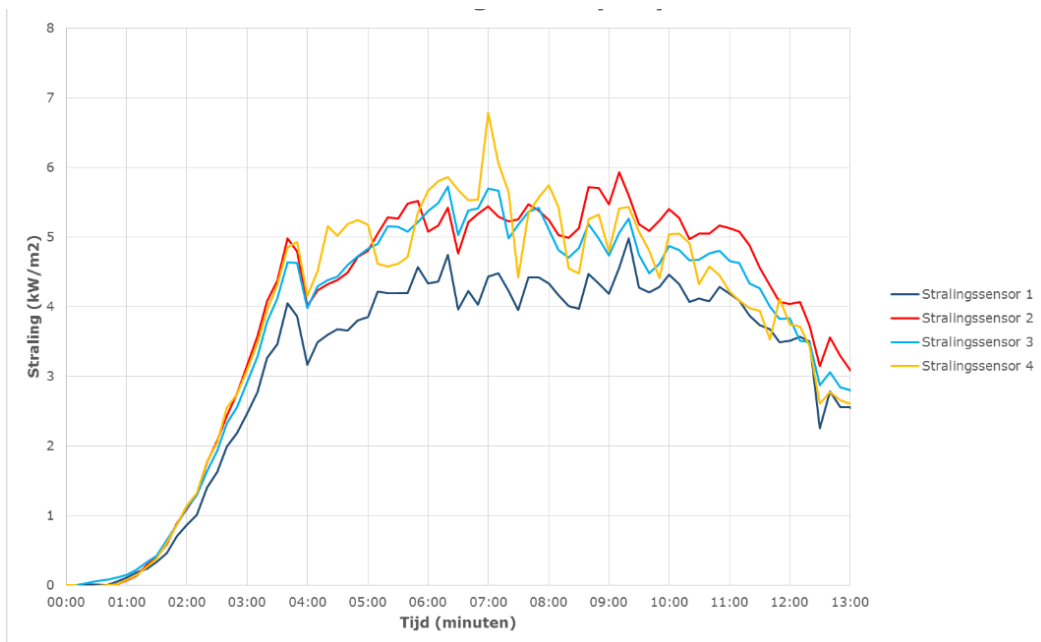
Figuur 38: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 4



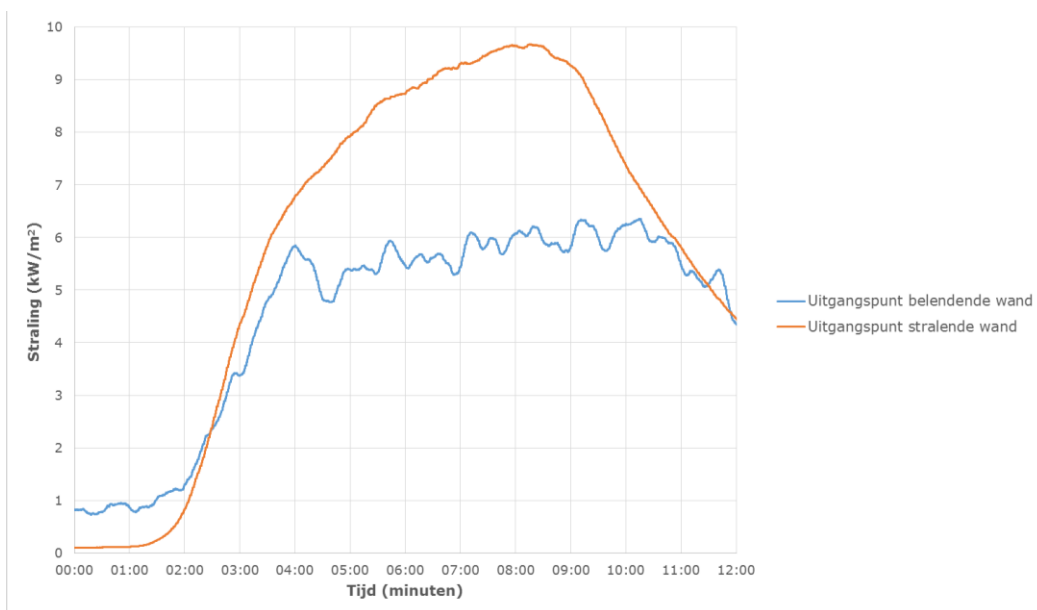
Figuur 39: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 5



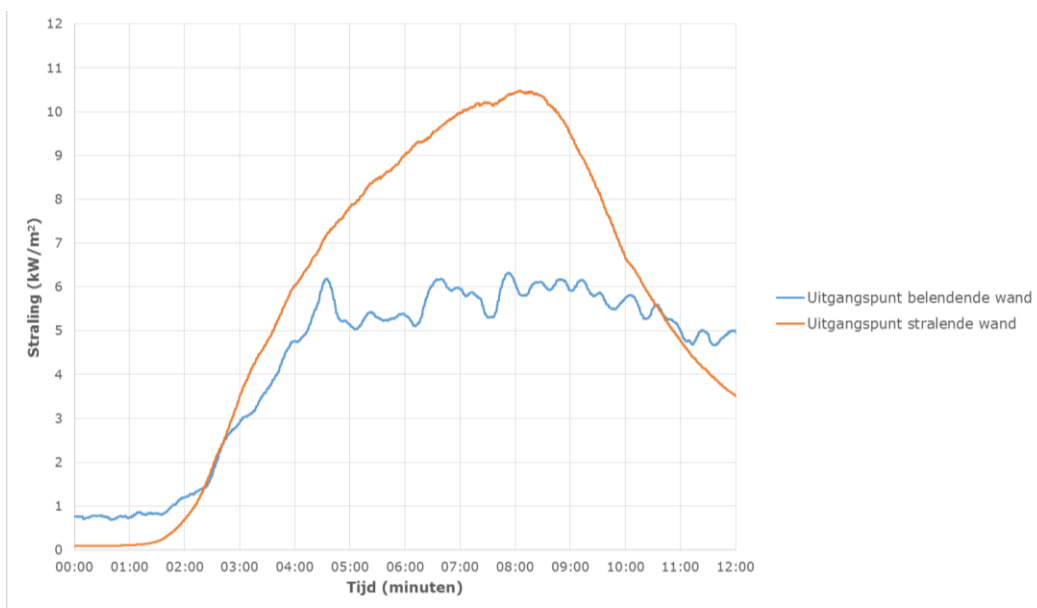
Figuur 40: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 6



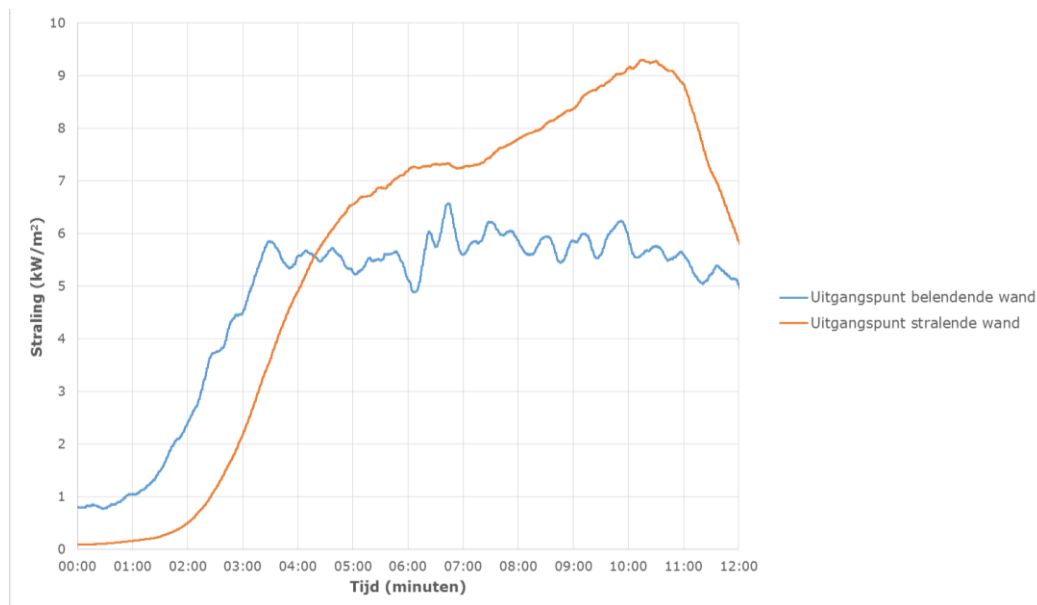
Figuur 41: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 4



Figuur 42: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 5

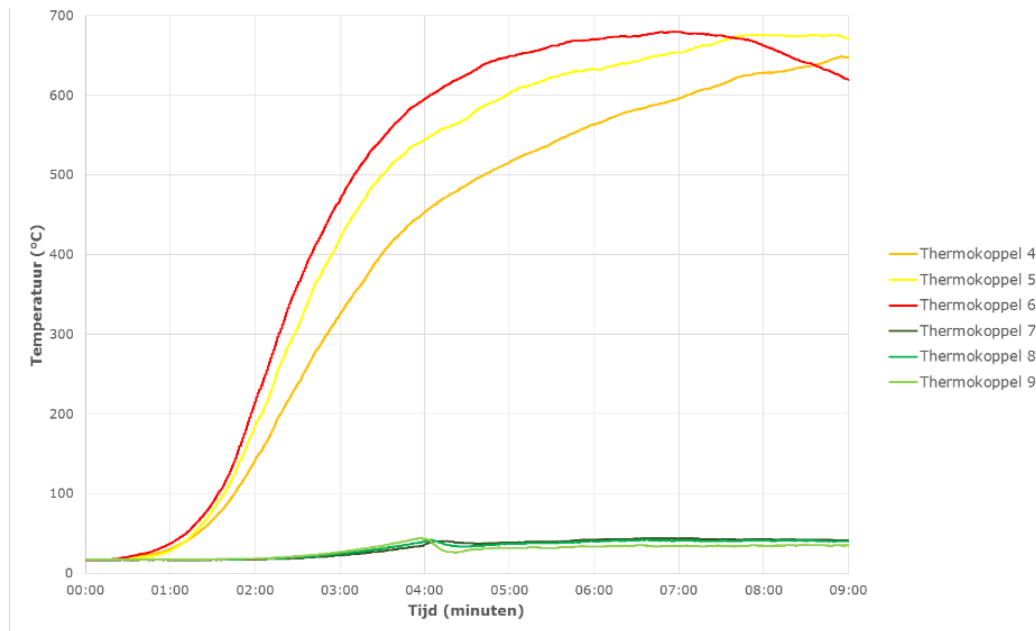


Figuur 43: grafiek berekende straling vanuit de stralende en de belendende wand experiment 6

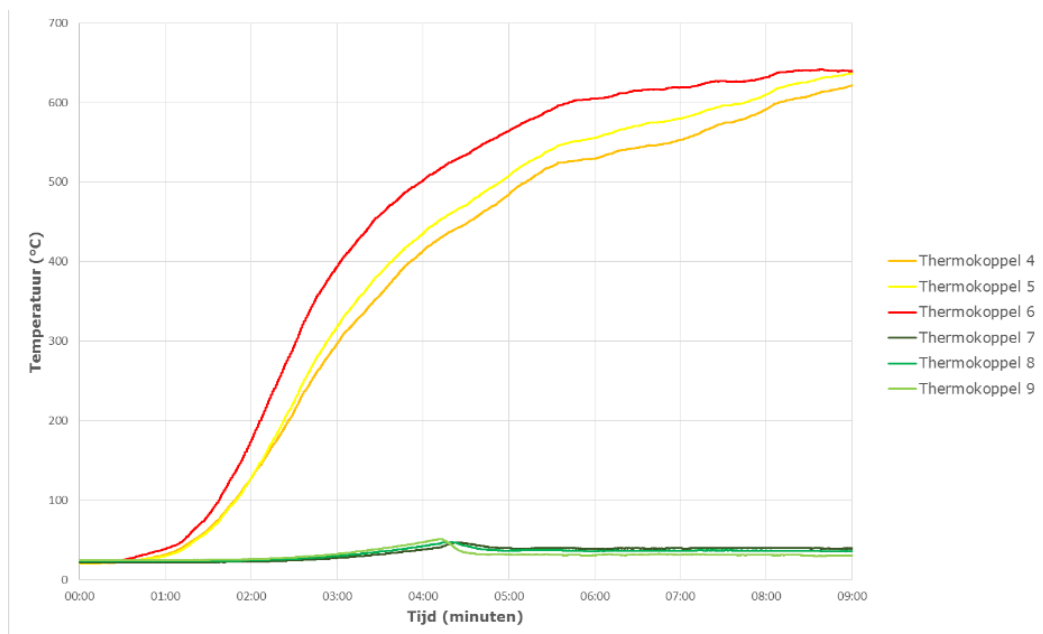


Opstelling 3

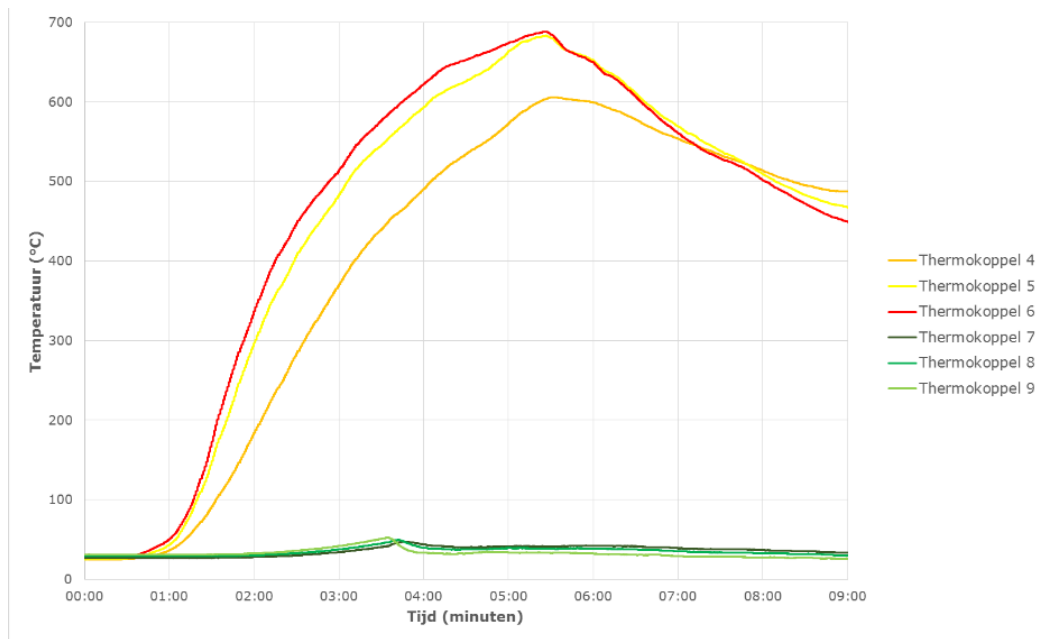
Figuur 44: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 7



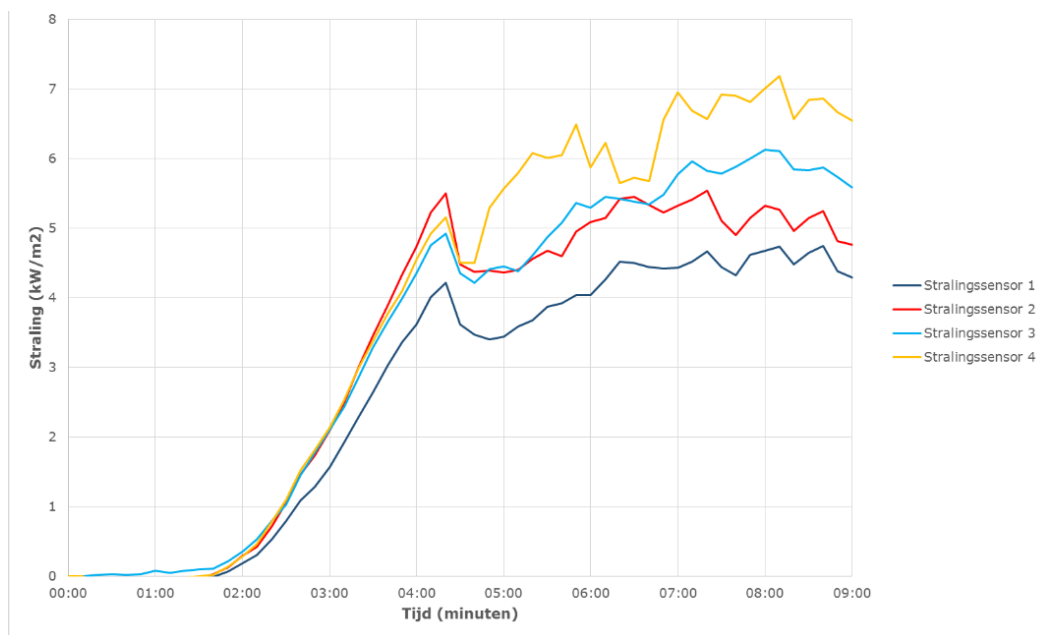
Figuur 45: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 8



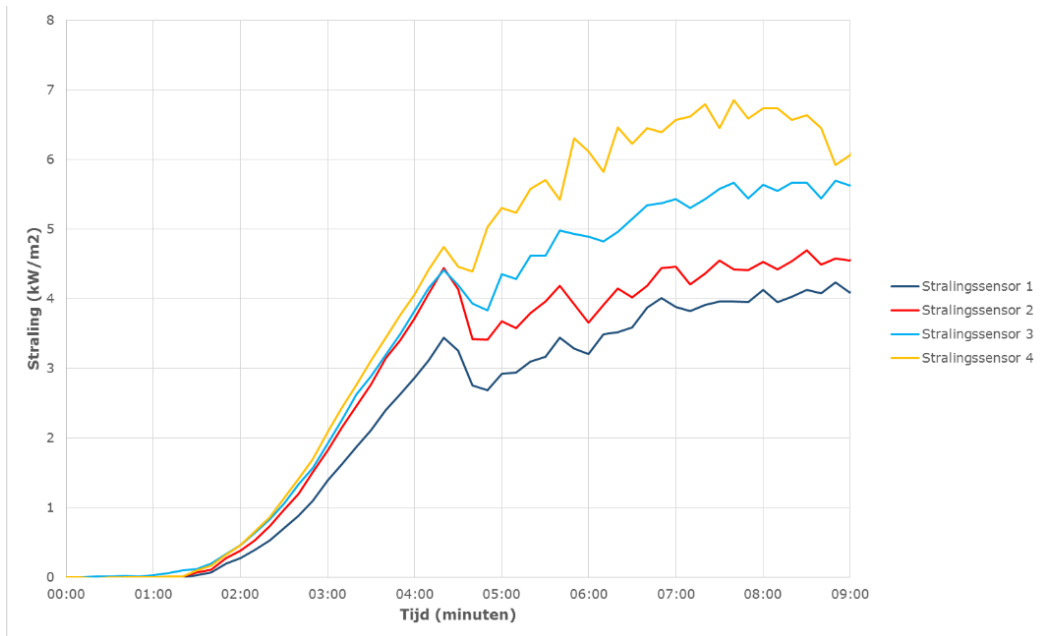
Figuur 46: grafiek temperatuurverloop stralende en belenende wand experiment 9



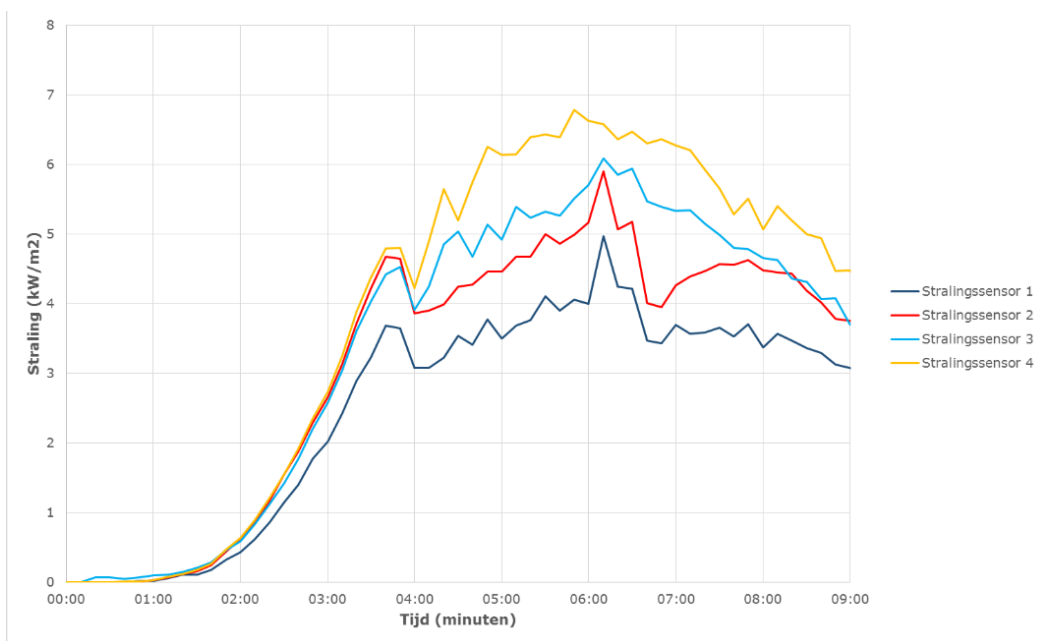
Figuur 47: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 7



Figuur 48: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 8



Figuur 49: grafiek gemeten stralingsverloop experiment 9



Bijlage 6: Waterverbruik

Tabel 18: waterverbruik watermeter waterscherm

Experiment	4	5	6
Waterverbruik waterscherm (watermeter A)	2225 L	2155 L	2240 L
Tijdsduur	11:06	11:10	11:08
Verbruik per minuut	200,5 L/min	193,0 L/min	201,2 L/min

Tabel 20: waterverbruik watermeters waterscherm en gootje

Experiment	7	8	9
Waterverbruik waterscherm (watermeter A)	1713 L	2087 L	1302 L
Waterverbruik gootje (watermeter B)	104 L	122 L	75 L
Tijdsduur	07:42	09:16	05:46
Verbruik per minuut (Watermeter A)	222,5 L/min	225,2 L/min	225,8 L/min
Verbruik per minuut (Watermeter B)	13,5 L/min	13,2 L/min	13,0 L/min

Bijlage 7: Berekeningen thermodynamica en viewfactor

Onderdeel A

1^e wet thermodynamica:

Deze wet staat ook wel bekend als de 'wet van behoud van energie'. Als bron voor deze formules is gebruik gemaakt van het boek *Physics for scientist & engineers*. (Giancoli, 2009)

$$\Delta E_{int} = Q + W$$

ΔE = toename van inwendige energie (J)

Q = toegevoerd vermogen (W)

W = arbeid (J)

Omdat er in deze situatie geen arbeid is, vervalt de W .

De Q is de netto warmte die naar een object stroomt. Dat is dus de warmte die op een object valt min de warmte die het object aan de omgeving afgeeft. De energie hierbij is afhankelijk van de tijd. Daarom wordt de formule in de differentiaalvorm geschreven.

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = Q'_{in} - Q'_{uit}$$

ΔE = toename van inwendige energie (J)

Δt = tijd (s)

Q'_{in} = toegevoegd vermogen (W)

Q'_{uit} = afgevoerd vermogen (W)

Omdat $\Delta E = mc\Delta T$ is, kan de formule zoals onderstaande worden genoteerd.

$$\frac{mc\Delta T}{\Delta t} = Q'_{in} - Q'_{uit}$$

m = massa (kg)

$c = \text{soortelijke warmte (J/kg} \cdot \text{K)}$
 $\Delta T = T_2 - T_1 \text{ (K of } ^\circ\text{C)}$

Warmteoverdracht kan plaats vinden door geleiding, convectie en straling. De formules om deze soorten van warmteoverdracht uit te rekenen staan hieronder vermeldt.

$$Q'_{\text{straling}} = \varepsilon \sigma_z A T^4$$

$Q' = \text{warmtestroom (W)}$
 $\varepsilon = \text{relatieve emissiecoëfficiënt}$
 $\sigma_z = \text{constante van Stefan Boltzmann (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 $A = \text{oppervlak (m}^2)$
 $T = \text{gemeten temperatuur (K)}$

$$Q'_{\text{geleiding}} = \frac{\lambda A \Delta T}{d}$$

$Q' = \text{warmtestroom (W)}$
 $\lambda = \text{warmtegeleidingscoëfficiënt (W/m}^2 \cdot \text{K)}$
 $A = \text{oppervlak (m}^2)$
 $d = \text{dikte (m)}$
 $\Delta T = T_2 - T_1 \text{ (K of } ^\circ\text{C)}$

$$Q'_{\text{convectie}} = \alpha A \Delta T$$

$Q' = \text{warmtestroom (W)}$
 $\alpha = \text{warmteoverdrachtscoëfficiënt (W/m}^2 \cdot \text{K)}$
 $A = \text{oppervlak (m}^2)$
 $\Delta T = T - T_0 \text{ (K of } ^\circ\text{C)}$

Zowel de relatieve emissiecoëfficiënt als de warmtegeleidingscoëfficiënt en warmteoverdrachtscoëfficiënt zijn materiaal afhankelijk.
De emissiecoëfficiënt geeft de mate aan waarin een materiaal warmte uit straalt.

Viewfactor

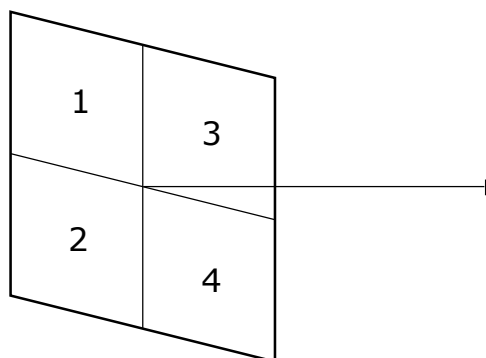
De uitgezonden straling vanuit de stralende wand kan met de viewfactor voor twee ongelijke vierhoekige vlakken worden omgerekend naar de straling die op de beledende wand valt. De viewfactor geeft namelijk aan hoeveel straling van de

stralingsbron er op de belendende wand valt. Door de straling afkomstig van de stralende wand te vermenigvuldigen met de viewfactor wordt de straling die op de belendende wand valt uitgerekend.

Voor het berekenen van de viewfactor is in deze situatie geen formule beschikbaar. Daarom is door Ivo Gebhardt (docent Saxion te Enschede) de viewfactor gesimuleerd met een eindige elementen methode. Hierbij is aangegeven dat de nauwkeurigheid van de viewfactor hoog is. De reden hiervoor is dat de afstand tussen de oppervlakken groot is ten opzichte van de grootte van de elementen. Een voorwaarde voor deze simulatie is dat de belendende wand parallel en in het midden voor de stralende wand moet worden geplaatst. De viewfactor bij deze opstelling is vastgesteld op 0,0392.

Er kan ook een viewfactor worden uitgerekend voor een bepaald ontvangend punt. Dit kan door het punt waarop de straling wordt uitgerekend door te trekken naar de stralende wand, zie afbeelding 43. Vervolgens wordt de stralende wand in vier kwadranten verdeeld.

Figuur 41: kwadranten voor uitrekenen viewfactor voor bepaald punt



Het uitrekenen van de viewfactor kan met behulp van het tabellarium fire safety engineering afkomstig van de stichting kennisbank bouwfysica. Door voor elk kwadrant de viewfactor uit te rekenen en dit bij elkaar op te tellen wordt de viewfactor voor het punt berekend.

Ook kan de viewfactor worden uitgerekend met behulp van het Excel bestand "stationaire brand volgens NEN 6068" van Ruud van Herpen. Hierbij moet alleen de afmetingen van de kwadranten en afstand tussen de wand en het punt worden ingevuld en dan wordt de viewfactor uitgerekend.

Onderdeel B

Omrekenen temperatuur stralende wand naar ontvangende straling op belendende wand

Hieronder staat de uitleg en de berekeningen die zijn gebruikt voor het omrekenen van de straling die afkomstig is van de stralende wand naar de straling die op de belendende wand valt.

$$Q'_{\text{straling}} = \varepsilon \sigma_z A T^4$$

Q' = warmtestroom (W)

ε = relatieve emissiecoëfficiënt

σ_z = constante van Stefan Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$)

A = oppervlak (m^2)

T = gemeten temperatuur (K)

De warmtestroom van de stralende wand wordt uitgerekend. De relatieve emissiecoëfficiënt van de zeecontainer is ca. 0,7. De constante van Stefan-Boltzmann is zoals de naam al zegt, een constante met een waarde van $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$. Het oppervlak van de stralende wand is 15,6. De hoogte van de stralende wand is 2,568 m en de breedte 6,058 m. De temperatuur die ingevuld moet worden is de gemeten temperatuur met thermokoppel 6.

Wanneer de warmtestroom is uitgerekend, is dus bekend hoeveel de wand uitstraalt. Deze straling (kW/m^2) neemt af naar mate de afgelegde afstand toe neemt. Hoeveel dit is kan uitgerekend worden met behulp van de viewfactor. De viewfactor voor deze situatie is 0,0392. Hiervoor is gebruik gemaakt van de berekening voor de viewfactor van twee vlakken. Door de viewfactor keer de warmtestroom te doen, wordt uitgerekend hoeveel er op de belendende wand valt. Het antwoord wat hier uit komt is in Watt (W). Om dit om te zetten naar kW/m^2 moet de uitkomst worden gedeeld door 1000 (van W naar kW) en worden gedeeld door het oppervlak van de belendende wand ($2 m^2$).

Hieronder staat een voorbeeld van de berekeningen met de maximale temperatuur van thermokoppel 6 van experimenten 1.

- De maximale temperatuur die bereikt is, is $655,7 \text{ }^\circ\text{C} = 928,7 \text{ K}$
- De begintemperatuur is $17,4 \text{ }^\circ\text{C} = 290,4 \text{ K}$
- Uitrekenen van de warmtestroom:
 $Q' = 0,7 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 15,6 \times (928,7^4) = 460583 \text{ W}$
- Uitrekenen ontvangende straling op belendende wand:
 $Q' \times \text{viewfactor} = 460583 \text{ W} \times 0,0392 = 18055 \text{ W}$
- Omrekenen van W naar kW/m^2 :
 $(18055 \text{ W} / 1000) / 2 = 9,0 \text{ kW/m}^2$

Omrekenen temperatuur stralende wand naar ontvangende straling op stralings-sensor

Hierbij wordt de warmtestroom afkomstig van de stralende wand op dezelfde wijze uitgerekend als bovenstaand. Alleen hier wordt de warmtestroom gelijk omgezet naar kW/m² door het oppervlak (A) uit de formule te laten.

Van de temperatuur evenals de gemeten straling door de stralingssensoren is over 10 seconden het gemiddelde van de metingen genomen. Op deze manier is er minder ruis bij de resultaten van de metingen van de stralingssensoren. Omdat het in dit een berekening is om de straling uit te rekenen op één punt, is viewfactor met behulp van de puntberekening uitgerekend.

Omrekenen temperatuur belendende wand naar ontvangende straling op belendende wand

Hieronder staat de uitleg en de berekeningen die zijn gebruikt voor het omrekenen van de gemeten temperatuur afkomstig is van de belendende wand naar de straling die op de belendende wand valt.

$\frac{mc\Delta T}{\Delta t} = Q'_{in} - Q'_{uit}$
<p><i>m</i> = massa (kg) <i>c</i> = soortelijke warmte (J/kg · K) $\Delta T = T - T_0$ (K of °C) Δt = tijd (s) <i>Q'</i> = warmtestroom (W)</p>

De warmtestroom die de belendende wand in gaat is in dit geval alleen de straling. De belendende wand verliest wel op twee manieren warmte namelijk, door straling en convectie langs de wand.

De wand wordt via één zijde aangestraald. De wand straalt echter aan twee kanten warmte uit. Wat er voor zorgt dat de straling in Q'_{uit} bestaat uit $Q'_{straling} \times 2$. Aan beide zijden van de belendende wand vindt convectie plaats. Hierdoor wordt voor de convectie in Q'_{uit} maal twee gedaan.

$$Q'_{in} = Q'_{straling}$$

$$Q'_{uit} = Q'_{straling} + Q'_{convectie}$$

$$Q'_{uit} = Q'_{straling} \times 2 + Q'_{convectie} \times 2$$

$$\frac{mc\Delta T}{\Delta t} = Q'_{in} - Q'_{uit}$$

$$\frac{mc\Delta T}{\Delta t} = (Q'_{in}) - (Q'_{straling} \times 2 + Q'_{convectie} \times 2)$$

De formule voor de straling is $Q'_{straling} = \epsilon\sigma_zAT^4$. De formule voor de convectie is $Q'_{convectie} = \alpha A\Delta T$. dit lever de onderstaande formule.

$$\frac{mc\Delta T}{\Delta t} = (Q'_{in}) - (\epsilon\sigma_zAT^4 \times 2 + \alpha A\Delta T \times 2)$$

Deze formule is gebruikt om de ontvangende straling (Q'_{in}) op de belendende wand uit te rekenen.

De massa (m) van de belendende kan worden uitgerekend door de dichtheid te vermenigvuldigen met het volume (V) van de wand. De dichtheid (ρ) van de wand staat vermeld in tabel 7 namelijk, $7,85 \text{ kg/m}^3$. Het volume van de wand is $2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,003 \text{ m} = 0,006 \text{ m}^3$ (lengte x breedte x hoogte). De massa wordt dan $7,85 \times 0,006 = 0,471 \text{ kg}$.

Ook de soortelijke warmte staat vermeld in tabel 7. Verder zijn waarde voor de emissiecoëfficiënt en de constante van Stefan-Boltzmann bekend.

De temperatuur in de formule voor de straling en de convectie kan worden ingevuld door de gemeten temperatuur in Kelvin ($^{\circ}\text{C}+273$) te nemen.

De $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ is de helling. Om dit uit te rekenen is de gemiddelde afgeleide genomen. Hiervoor zijn er telkens 50 punten van zowel de temperatuur als de tijd gebruikt. Door meerdere punten te gebruiken ontstaat er een soort ruisfilter voor de afgeleide.

Onderdeel C

Met behulp van de wet van Lambert-Beer kan de absorptiefactor worden uitgerekend. In dit geval is de absorptiefactor al bekend en wordt er gekeken hoe dik het laagje water zou moeten zijn bij een bepaalde absorptie. Hieronder staat de formule voor het rekenen met de wet van Lambert-beer. (Attenuation coefficient, 2015)

In afbeelding 2 is zichtbaar dat bij de $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de hoogste stralingsintensiteit rond de $3 \text{ }\mu\text{m}$ ligt. In afbeelding 3 is af te lezen dat de absorptiefactor 10000 1/cm bij $3 \text{ }\mu\text{m}$ is. Met behulp van de onderstaande formule kan worden uitgerekend hoe dik het laagje water zou moeten zijn om deze straling te absorberen.

$T = e^{-\mu \times l}$
$T = \text{transmissie door het materiaal (1/cm)}$ $\mu = \text{absorptiefactor}$ $l = \text{dikte laagje water (cm)}$

De T geeft de transmissie aan van het materiaal. De transmissie is de doorlating van de straling door het materiaal. Het getal 1 staat voor 100%. Hierbij wordt 100% tegen gehouden. De e is een exponentiele functie.

Om de l uit te rekenen kan de formule als volgt worden genoteerd.

$$l = \frac{\ln(T)}{-\mu}$$

Door $T = 0,99$ in te vullen dus 99 % wordt geabsorbeerd en voor de μ de factor 10000 1/cm komt er een dikte uit van 1×10^{-6} cm. Dit is zo laag dat er vanuit kan worden gegaan dat deze dikte met dit gootje over de wand wel bereikt is.

Omdat het vooral rond de $3 \mu\text{m}$ ligt, is ook de factor 1000 1/cm ingevuld. Er is voor 1000 1/cm gekozen omdat dit gemiddelde absorptiefactor voor de golflengten tussen de 2 en $5 \mu\text{m}$ is. De uitkomst voor de factor 1000 1/cm is 1×10^{-5} cm. Ook dit geeft aan dat ook bij deze factor het laagje over de wand heel dun moet zijn om alles te absorberen en kan er vanuit worden gegaan dat dit wel met het gootje is bereikt.

De lichte temperatuurstijging van de belendende wand wordt dus veroorzaakt door het opwarmen van het water en niet door de straling afkomstig van de stralende wand.