



**BRANDWEER**

Brandweeracademie

# Wanneer water in rook opgaat

Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen



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

## Colofon

Brandweeracademie (2021). *Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen* Arnhem: IFV.

Opdrachtgever: Lectoraat Brandweerkunde  
Contactpersoon: Ing. R. van den Dikkenberg MCDM  
Titel: Wanneer water in rook opgaat  
Datum: 7 december 2021  
Status: Definitief  
Versie: 1.0  
Auteurs: L. Wolfs BBA, V. Jansen MSc, ing. J. Ebus, T. Geertsema BBA  
Projectleider: ing. R. van den Dikkenberg MCDM  
Review: ing. L. de Witte  
Eindverantwoordelijk: dr.ir. R. Weewer

# Samenvatting

## Aanleiding

Er bestaat discussie over de wijze waarop een vuurhaard moet worden benaderd in geval deze niet direct kan worden geraakt met het blusmiddel en er door de (warme) rook moet worden voortbewogen. In Nederland wordt de zogenaamde 3D-pulsmethode (bijlage 1) toegepast als rookgaskoelingstechniek. Door instructeurs wordt waargenomen dat het aanleren van deze methode lastig is, dat ze veel oefening en training vraagt en door weinigen correct wordt uitgevoerd. Ook blijkt de pulsmethode in de praktijk nauwelijks te worden toegepast. Het algemene gevoel is dat ze te ingewikkeld is en eenvoudiger moet. Daarnaast zijn uit eerdere praktijkexperimenten naar rookgaskoeling aanwijzingen naar voren gekomen dat de 3D-pulsmethode tot gevaarlijke situaties voor de inzetploeg kan leiden, omdat lokaal wel de rookgassen gekoeld worden, maar achter de inzetploeg weer kunnen opwarmen. Hierdoor kan de ploeg als het ware ingesloten raken. Bovendien zijn er aanwijzingen dat de overlevingscondities voor slachtoffers (verder) verslechteren.

Het is dus nodig meer inzicht te krijgen in het effect van de 3D-pulsmethode op de omgevingscondities in het gebouw waarin de inzetploeg en/of eventuele slachtoffers zich bevinden. Ook is meer inzicht nodig in mogelijke andere methoden voor rookgaskoeling die ook effectief zijn en eenvoudiger zijn aan te leren. Daarom is in dit onderzoek de 3D-pulsmethode die wordt gebruikt in Nederland vergeleken met de boogmethode (bijlage 1) die in de Verenigde Staten van Amerika gebruikt wordt. Deze methoden worden vergeleken voor zowel hoge- als lage-druk-systemen. Omdat een deel van de Nederlandse brandweer is uitgerust met DLS (drukluchtschuim), is dit blussysteem ook meegenomen in dit onderzoek. Met dit systeem wordt schuim op wanden en plafond aangebracht. Daarnaast is ook de effectiviteit van de deurprocedure onderzocht.

De centrale vraag van dit onderzoek luidt:

*In welke mate worden, bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode, rookgassen gekoeld, en de vuurhaard en veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag?*

## Onderzoeksopzet

De verschillende methoden zijn alleen toegepast in een scenario met een dynamische rooklaag. De reden hiervoor is dat bij een statische rooklaag de temperatuur in de ruimte al snel te laag wordt als gevolg van het smoren van de brand door zuurstofgebrek, omdat bij een statische rooklaag sprake is van een dichte ruimte. Tijdens de experimenten is uitgegaan van één basisscenario:

*Een flinke woonkamerbrand (6 – 8 MW) met de deur van de woning naar de gang open, waarbij rook de aangrenzende gang instroomt en met de voordeur van de woning open; hierbij wordt geen brandweerinzet gedaan.*

Alle experimenten zijn in duplo uitgevoerd evenals de nulmeting (het basisscenario) en met ervaren brandweermensen uit het veld.

Om de praktijk het beste te benaderen is het onderzoek uitgevoerd in een stenen gebouw. Dit gebouw heeft een L-vorm, waarvan het lange deel bestaat uit een gang van 2 meter breed en 20 meter lang. In het korte deel van de L-vorm is de brandruimte gesitueerd. Voor deze vorm is gekozen om te voorkomen dat tijdens het uitvoeren van de rookgaskoelingsmethoden de vuurhaard rechtstreeks kan worden geraakt.

Tijdens de experimenten zijn diverse parameters gemeten op verschillende plaatsen en/of hoogtes binnen en buiten het gebouw. Het gaat daarbij om de temperatuur, straling, gasconcentraties en het visueel beeld binnen en buiten. Daarnaast is de subjectieve beleving gemeten van de inzetploeg door middel van een vragenlijst die direct na de inzet is afgenomen.

Voor de analyse is de testruimte opgedeeld in verschillende segmenten (lengterichting: plaats in de ruimte ten opzichte van de ingang) en zones (hoogterichting: warm en koud). Voor het effect van de verschillende methoden op de rookgassen is gekeken naar de temperatuurmetingen in die verschillende segmenten en zones in de gang tijdens het vorderen. De metingen per zone en segment zijn hierbij gemiddeld. De gemiddelde temperatuur in een zone of segment is een maat voor de koeling die is verkregen door opname van warmte vanaf de brandhaard. De energie-inhoud is vooral gebruikt om te zien of er in die zone of dat segment sprake is van een toe- of afname van energie. De energie-inhoud is samen met de temperatuur gebruikt om inzichtelijk te maken of er sprake is van (permanente) koeling binnen een zone of segment. De metingen zijn geanalyseerd voor de duur van de inzet, dat wil zeggen vanaf het moment van binnentreden van de gang tot het bereiken van de vuurhaard. Het aflussen van de vuurhaard is hierin niet meegenomen.

Een belangrijk aspect van deze experimentele opzet is de herhaalbaarheid. Deze is nodig om een goede onderlinge vergelijking tussen de verschillende methoden mogelijk te maken. Als eerste is daarom gekeken naar de startcondities. Door steeds gebruik te maken van eenzelfde vuurlast en een vast experimentprotocol is de variatie in startcondities zoveel mogelijk beperkt. Uit de metingen blijkt dat in het algemeen de spreiding beperkt is (ongeveer 10%), wat aangeeft dat de condities goed reproduceerbaar zijn.

## Onderzoeksresultaten

### Koelen van rookgassen

Het blijkt dat over het algemeen de boogmethode een betere koeling geeft dan de 3D-pulsmethode. De reikwijdte van de voorwaartse en achterwaartse koeling is voor de boogmethode ook groter dan voor de 3D-pulsmethode. In een paar testen neemt de temperatuur achter de inzetploeg toe met de 3D-pulsmethode, maar met de boogmethode blijft de temperatuur laag in alle uitgevoerde testen. Hoewel de 3D-pulsmethode als standaardmethode wordt aangeleerd, blijkt uit de filmbeelden dat de boogmethode eenvoudiger uit te voeren is dan de 3D-pulsmethode en minder afhankelijk is van de straalpijpoerder.

## Vorderen naar de vuurhaard

Bij alle inzetten daalt de temperatuur in de brandruimte en bij de opening naar de gang tijdens het vorderen ten opzichte van de nulmeting. Alle blussystemen en methoden hebben dus een koelend effect op de brandruimte tijdens het vorderen.

## Veiligheid van brandweermensen en slachtoffers

Op basis van de gehanteerde methode voor blootstelling (warmtestralingsdosis) wordt de grenswaarde voor veilig optreden bij geen van de onderzochte rookgaskoelingsmethoden overschreden. Verder blijkt dat de blootstelling over het algemeen iets hoger is bij de testen met de 3D-methode dan bij de testen met de boogmethode.

Uit de gemiddelde scores van de subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de inzetten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de inzetploegen. Bij de inzet met LD 450 heeft de inzetploeg het meeste discomfort ervaren door waterdamp, de hoeveelheid water, geen zicht, de kracht die nodig is om de straalpijp fatsoenlijk te bedienen en een gebrek aan communicatiemogelijkheden.

De inzet van de brandweerploeg heeft, ongeacht het blussysteem of de methode, altijd negatieve gevolgen voor slachtoffers (door een stijging van CO-waarden). Voor kwetsbare en zeer kwetsbare slachtoffers ontstaan dieper in de gang levensbedreigende of zelfs fatale situaties. Voor personen die in de algemene groep vallen, ontstaan geen levensbedreigende situaties, op één uitzondering na. Tijdens beide nulmetingen, waarbij dus geen inzet is gedaan, is te zien dat het langer duurt voordat er een levensbedreigende situatie ontstaat. In de praktijk kan iemand achter al langere tijd in een gevaarlijke situatie aanwezig zijn, zodat levensbedreigende of fatale situaties al bereikt kunnen zijn voordat de brandweer ter plaatse is.

## Deurprocedure

Bij alle meetpunten in de gang is een daling van de temperatuur waargenomen, maar het is niet te zeggen of dat een direct gevolg is van de deurprocedure. Een mogelijke verklaring zou namelijk ook kunnen zijn dat, omdat beide voordeuren voorafgaand aan de deurprocedure zijn gesloten, de brand minder zuurstof krijgt en zo ondergeventileerd raakt, waardoor de temperatuur al daalt voor de start van de deurprocedure. Ook de experimentele opzet kan een rol spelen, omdat bij gesloten deuren geen of weinig stroming optreedt van hete rookgassen langs de thermokoppels. Verder is geen effect te zien van het koudeblok boven de deur op de meetpunten aan de buitenzijde boven de deur.

## Beantwoording van de hoofdvraag

Beide methoden zorgen voor een koeling van de rookgassen; het uitvoeren van rookgas-koeling is dus altijd beter dan geen inzet doen. Zowel wat betreft de koeling over de hoogte en de lengte van de gang, als de voorwaartse koeling en de achterwaartse koeling geeft de boogmethode een gunstiger resultaat dan de 3D-pulsmethode. De resultaten van de boogmethode zijn ook consistent, wat erop lijkt te wijzen dat deze methode eenvoudiger uit te voeren is. De reikwijdte van de voorwaartse en achterwaartse koeling is voor de boogmethode groter dan voor de 3D-pulsmethode, waardoor de veiligheid voor brandweermensen bij gebruik van eerstgenoemde methode wordt verhoogd. Daarnaast is de inzetduur bij de boogmethode korter (althans in de gekozen testopstelling).

Alle blussystemen en inzetmethoden hebben een koelend effect op de brandruimte tijdens het vorderen. Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de proefpersonen, waarbij wordt aangegeven dat de inzetten met LD 450 het meeste discomfort opleveren. Er zijn tijdens de experimenten geen onveilige situaties voor brandweerpersoneel ontstaan. Door het toepassen van de onderzochte methoden en blussystemen voor rookgaskoeling verslechteren de condities voor potentiële slachtoffers. Voor kwetsbare en zeer kwetsbare personen kan dit leiden tot een levensbedreigende of fatale situatie. Over het algemeen zorgt de boogmethode voor minder verslechtering dan de 3D-pulsmethode, met name voorin in de gang. Er zijn duidelijke verschillen tussen beide testen per blussysteem wat betreft de overleefbaarheid, wat duidt op een sterke invloed van de straalpijpvoerder op de condities die de overleefbaarheid bepalen.

Uit de analyse van de filmbeelden blijkt dat de boogmethode, hoewel de 3D-pulsmethode als standaardmethode wordt aangeleerd, eenvoudiger volgens protocol uit te voeren is dan de 3D-pulsmethode en minder afhankelijk is van de straalpijpvoerder.

Op basis van dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat zowel de boogmethode als de 3D-methode een effectieve manier is om rookgassen te koelen, maar dat de boogmethode meer koeling geeft, en bovendien makkelijker aan te leren en uit te voeren is.

# Voorwoord

Daar is het dan! Het rapport waar niet alleen nationaal maar ook internationaal met grote belangstelling naar is uitgekeken. Ik presenteer met vreugde en trots het rapport met de eindresultaten van een uniek onderzoek naar methoden en blussystemen om rookgassen te koelen.

Het onderwerp rookgaskoeling is wereldwijd een favoriet onderwerp van discussie onder brandweerexperts en instructeurs. Soms lijkt het wel of er verschillende 'geloven' zijn waar het gaat om de beste en effectiefste methode van rookgaskoeling. Pulstechnieken of een gebonden straal, oppervlaktekooling of 3D koeling? En elke keer als je denkt dat je het snapt, is er weer een nieuw argument om te twijfelen over wat je dacht te weten. Daarom heeft het lectoraat Brandweerkunde van de Brandweeracademie van het IFV besloten dit onderzoek uit te voeren. In een stenen gebouw om de praktijk zo goed mogelijk te benaderen, en niet in een container zoals veelal gebruikelijk is voor oefeningen, passen we verschillende straalpijptechnieken toe en meten wat het grootste koelend effect oplevert. Dat is nog niet eerder vertoond, en daarom is dit onderzoek uniek.

Het heeft lang geduurd voordat dit rapport kon worden gepubliceerd. Dat komt omdat het verwerken van alle meetgegevens veel meer tijd kostte dan we hadden gedacht. Behalve dat we enorm veel meetgegevens hadden, is het best lastig gebleken om de resultaten op een begrijpelijke wijze te presenteren. Daarnaast hebben we ons er niet zomaar vanaf gemaakt. Behalve de gemeten temperaturen is ook gekeken naar het koelend effect in termen van energieverandering. Daarvoor moest een compleet nieuw algoritme worden ontwikkeld. Ook is er gekeken naar de invloed van de verschillende methoden op de overlevingskans voor slachtoffers en is (beperkt) de impact onderzocht van de verschillende technieken op brandweerpersoneel.

De resultaten en conclusies van dit onderzoek zijn spraakmakend en zullen wereldwijd tot discussie, verbazing en hopelijk bewondering leiden. Met dit onderzoek zijn we erin geslaagd om een lastig onderwerp te verhelderen en de technieken voor brandweermensen in de praktijk opnieuw te vereenvoudigen. Het rapport wordt vertaald in het Engels en we leggen het aan de internationale gemeenschap voor ter bespreking. We zijn erg benieuwd naar de reacties.

Inmiddels zijn de resultaten ook al verwerkt in de nieuwe ELO over straalpijptechnieken voor de opleiding manschap. Zo is er een directe verbinding gelegd tussen praktijkgericht participerend onderzoek en de les-en leerstof. Dat gebeurt bij mijn weten nergens in de wereld, en daar kunnen we met recht trots op zijn.

Het onderzoek is wederom een mooi voorbeeld van de intensieve samenwerking tussen de onderzoekers van de Brandweeracademie, mensen van Troned en instructeurs en brandweermensen uit het veld en de Community of Practice Brand. Ik wil iedereen die meegewerkt heeft enorm bedanken, zonder jullie zou dit onderzoek niet mogelijk zijn. Mooi werk!

Ik wens iedereen veel genoegen bij het lezen van dit rapport.

Ricardo Weewer  
Lector Brandweerkunde  
Brandweeracademie (IFV)



# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Inleiding</b>	<b>12</b>
<b>1 Onderzoeksopzet</b>	<b>16</b>
1.1 Algemene informatie over de opzet	16
1.2 Locatie	16
1.3 Brandstof	18
1.4 Onderzochte blussystemen en inzetmethodes	18
1.5 Meetopstelling	22
1.6 Experimentprotocol	25
1.7 Data-analyse	26
1.8 De kwaliteit van het onderzoek	31
<b>2 Resultaten</b>	<b>35</b>
2.1 Herhaalbaarheid	35
2.2 Invloed van rookgaskoeling op temperatuur en energie	36
2.3 Invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard	52
2.4 Invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van brandweerpersoneel en slachtoffers	55
2.5 Invloed van de deurprocedure	62
2.6 Inzettijd en waterverbruik	67
<b>3 Conclusie</b>	<b>69</b>
3.1 Beantwoording van de deelvragen	69
3.2 Beantwoording van de hoofdvraag	71
<b>4 Discussie</b>	<b>73</b>
<b>Literatuurlijst</b>	<b>75</b>
<b>Bijlage 1 Inzetprotocol experimenten rookgaskoeling</b>	<b>76</b>
<b>Bijlage 2 Meetapparatuur</b>	<b>84</b>
<b>Bijlage 3 Vragenlijst Subjectieve beleving thermoregulatie, pijn en inspanning</b>	<b>96</b>
<b>Bijlage 4 Herhaalbaarheid</b>	<b>98</b>
<b>Bijlage 5 Nulmeting</b>	<b>101</b>
<b>Bijlage 6 Temperatuur versus hoogte</b>	<b>103</b>
<b>Bijlage 7 Voorwaartse en achterwaartse koeling</b>	<b>107</b>

<b>Bijlage 8 Veiligheid brandweerpersoneel</b>	<b>114</b>
<b>Bijlage 9 Veiligheid slachtoffers</b>	<b>115</b>



# Inleiding

## Aanleiding

De aanleiding om dit onderzoek uit te voeren is tweeledig. In de eerste plaats is er een voortdurende wereldwijde discussie over de wijze waarop een vuurhaard moet worden benaderd in geval deze niet direct kan worden geraakt met het blusmiddel en er door de (warme) rook moet worden voortbewogen. In de tweede plaats wordt door instructeurs waargenomen dat het aanleren van de in de Nederlandse les- en leerstof aanbevolen 3D-pulsmethode (rookgaskoelingstechniek, bijlage 1) zeer lastig is, dat de methode veel oefening en training vraagt en door zeer weinigen correct wordt uitgevoerd. Daarnaast blijkt ze in de praktijk nauwelijks te worden toegepast. Het algemene gevoel is dat de huidige methodiek van rookgaskoeling te ingewikkeld is en eenvoudiger moet. Rekening houdend met de basisprincipes voor brandbestrijding is rookgaskoeling overigens alleen van toepassing als de vuurhaard niet direct kan worden bereikt én de inzetdiepte klein is (of de ruimte niet groter dan 70m<sup>2</sup>).

Zoals vermeld, wordt in de les- en leerstof van de Brandweeracademie ingegaan op een methode die toegepast kan worden om rookgassen in een gebouw te koelen, de zogenaamde 3D-pulsmethode. Deze wordt als 'standaardmethode' aan instructeurs aangeleerd, die de kennis op hun beurt doorgeven aan de cursisten. De brandbestrijding bij binnentreding is opgedeeld in drie delen: deurprocedure, fase van rookgaskoeling en fase van brandbestrijding. In de fase van rookgaskoeling is de 3D-pulsmethode de standaardmethode. Hiervoor wordt ook een instructiefilmje gebruikt.

Bij rookgaskoeling wordt ervan uitgegaan dat het risico op rookgasontbranding kleiner wordt als de temperatuur daalt (voorkomen van zelfontbranding), omdat het water in de rookgassen energie opneemt en dat de rookgassen worden geïnertiseerd. Dit is nodig om op een veilige wijze te kunnen binnentreden met als doel om mensen in het brandende pand te redden en/of om de brand te blussen.

Uit eerdere praktijkexperimenten naar rookgaskoeling (Brandweeracademie, 2013, 2015) zijn aanwijzingen naar voren gekomen dat de methode voor rookgaskoeling die wordt aangeleerd (3D-methode), tot gevaarlijke situaties voor de inzetploeg kan leiden. Tijdens de fase van rookgaskoeling wordt de directe omgeving van de inzetploeg gekoeld, maar blijkt de temperatuur in de ruimte achter de ploeg weer op te kunnen lopen. Daardoor kan de ploeg ingesloten raken. Verder kan de rookgaskoeling onbedoeld een negatief effect hebben op eventuele slachtoffers in de ruimte. In een ander onderzoek (Brandweeracademie, 2020) is onderzocht in welke mate de inbreng van water een bijdrage levert aan het niet ontbranden van de rooklaag.

Om rookgaskoeling veilig te kunnen toepassen, is het nodig meer inzicht te krijgen in het effect van de 3D-pulsmethode op de omgevingscondities in het gebouw waarin de inzetploeg en/of eventuele slachtoffers zich bevinden. Daarnaast is meer inzicht nodig in

andere methoden voor rookgaskoeling die ook effectief zijn en eenvoudiger zijn aan te leren dan de huidige methode. Daarom is in dit onderzoek de 3D-pulsmethode vergeleken met de boogmethode die in de Verenigde Staten van Amerika gebruikt wordt. Omdat een deel van de Nederlandse brandweer is uitgerust met DLS (drukluchtschuim), is dit blussysteem ook meegenomen in het onderzoek.

Dit praktijkonderzoek is de laatste fase van het onderzoek naar rookgaskoeling. Eerdere fases bestonden uit een literatuuronderzoek (Brandweeracademie, 2018) en het hierboven aangehaalde onderzoek naar het voorkomen van rookgasontbrandingen (Brandweeracademie, 2020).

## Doel

Het doel van dit onderzoek is te bepalen op welke wijze en in welke mate diverse methoden (3D-pulsmethode en boogmethode) van rookgaskoeling invloed hebben op de ruimtecondities (zowel temperatuur- als energieafname), de vuurhaard, de veiligheid van brandweermensen en eventuele slachtoffers tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag.

## Hoofd- en deelvragen

De centrale vraag van dit onderzoek luidt:

*In welke mate worden, bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode, rookgassen gekoeld, en de vuurhaard en veiligheid van brandweermensen en slachtoffers<sup>1</sup> beïnvloed bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag?*

Deze centrale vraag wordt beantwoord aan de hand van de volgende deelvragen:

- 1. In welke mate is het bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode mogelijk om rookgassen te koelen bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag, in termen van:*
  - a. temperatuur versus hoogte*
  - b. energieafname*
  - c. voorwaartse en achterwaartse koeling?*
- 2. In welke mate is het bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode mogelijk om tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag de vuurhaard te beïnvloeden?*
- 3. In welke mate wordt de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed tijdens het koelen van rookgassen bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag?*
- 4. Welke invloed heeft een van buiten uitgevoerde deurprocedure op de condities binnen?*

---

<sup>1</sup> Dit is een gebruikelijke term bij de brandweer; iedereen die nog binnen is, wordt beschouwd als slachtoffer.

## Afbakening

Het onderzoek richt zich uitsluitend op methoden van rookgaskoeling waarbij gebruikgemaakt wordt van lage druk, hoge druk en Oneseven (DLS). De 3D-pulsmethode voor rookgaskoeling uit de les- en leerstof wordt tijdens de praktijkexperimenten uitgevoerd en vergeleken met de boogmethode. De boogmethode is een Amerikaanse methode die daar goede resultaten geeft. Andere blussystemen die mogelijk voor rookgaskoeling kunnen worden gebruikt maken geen onderdeel uit van dit onderzoek.

Daarnaast zijn de methoden alleen toegepast in een scenario met een dynamische rooklaag. De reden hiervoor is dat bij een statische rooklaag de temperatuur in de ruimte al snel te laag wordt als gevolg van het smoren van de brand door zuurstofgebrek, omdat bij een statische rooklaag sprake is van een dichte ruimte. Daarnaast is een dynamische rooklaag een worst case scenario (maximale opwarming rooklaag).

Het onderzoek richt zich op de offensieve binneninzet vanaf de aankomst van de inzetploeg bij de buitendeur tot aan het blussen van de brandhaard. De handelingen die in een vaste volgorde worden uitgevoerd, worden niet als één noodzakelijk doorlopend proces gezien en worden daarom afzonderlijk onderzocht.

## Betrokkenheid van het brandweerveld

Om maximaal gebruik te maken van de kennis en ervaring die in het veld aanwezig zijn, is voor de opzet en uitvoering van het onderzoek een expertgroep gevormd. De expertgroep bestond uit leden van de Community of Practice Brand. De leden van de expertgroep hebben samen met onderzoekers van de Brandweeracademie het onderzoeksprotocol vastgesteld. Daarnaast hebben brandweermensen uit verschillende veiligheidsregio's de blussystemen en methodes toegepast in het onderzoek en andere ondersteuning geboden tijdens de experimenten. De brandweermensen die de hogedruk- en lagedrukexperimenten hebben uitgevoerd, hebben ruime ervaring in het uitvoeren van de 3D-pulsmethode. Voor de experimenten met DLS zijn brandweermensen ingezet die opgeleid en getraind zijn in het gebruik van DLS.



# 1 Onderzoeksopzet

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het onderzoek beschreven, te beginnen met algemene informatie. Vervolgens wordt er nader ingegaan op de locatie, waarna een overzicht wordt gegeven van de vuurlast, de onderzochte blussystemen (hogedruk, lagedruk 250, lagedruk 450 en drukluchtschuim) en inzetmethodes (3D-pulsmethode en boogmethode), de praktijkexperimenten en meetopstelling. Ten slotte komen het experimentprotocol, de data-analyse en de kwaliteit van het onderzoek aan bod.

## 1.1 Algemene informatie over de opzet

De praktijkexperimenten hebben plaatsgevonden van 14 tot en met 18 oktober 2019. Elke dag, met uitzondering van 16 en 18 oktober, zijn vier experimenten uitgevoerd. Op 16 oktober hebben vijf experimenten plaatsgevonden en op 18 oktober twee experimenten. In totaal zijn 19 experimenten uitgevoerd, zie ook tabel 1.2 op pagina 21.

Tijdens de experimenten is uitgegaan van één basisscenario:

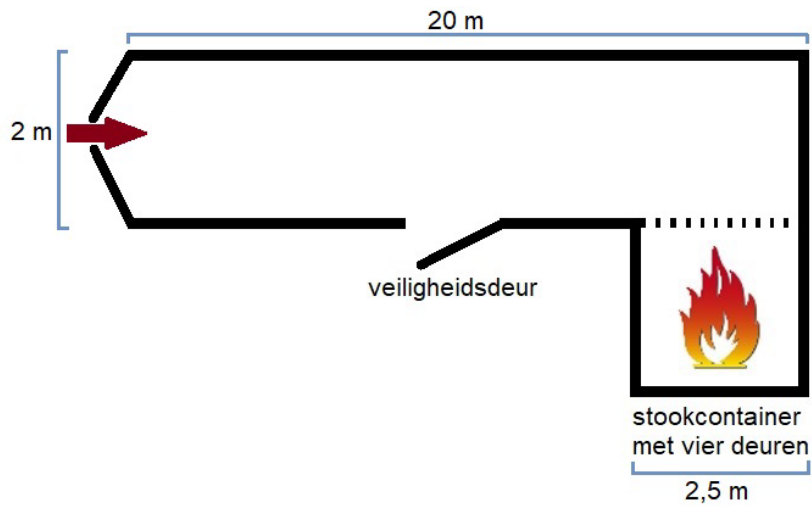
*Een flinke woonkamerbrand (6 – 8 MW) met de deur de woning naar de gang open, waarbij rook de aangrenzende gang instroomt, en met de voordeur van de woning open; hierbij wordt geen brandweerinzet gedaan.*

Dit basisscenario (de nulmeting) is twee keer uitgevoerd (experimenten 18 en 19, zie tabel 1.2). Tijdens de overige experimenten heeft er een inzet plaatsgevonden en is er gevarieerd met verschillende blussystemen en inzetmethodes (zie paragraaf 1.4).

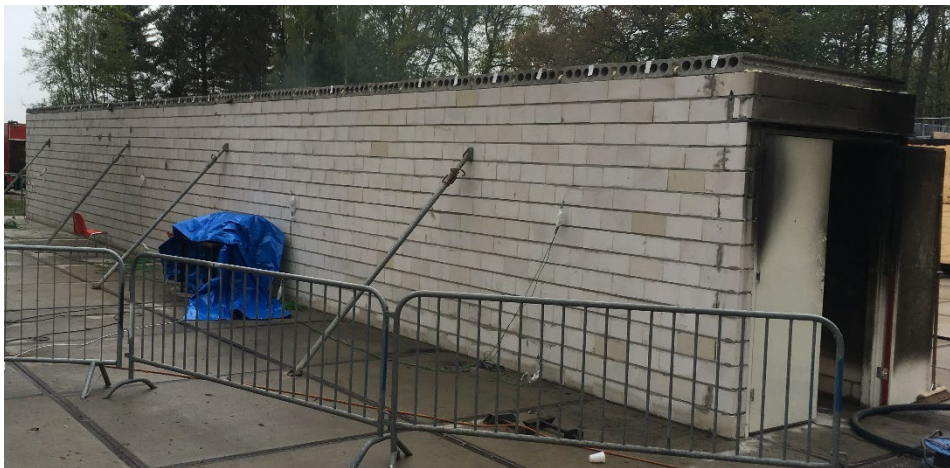
## 1.2 Locatie

De experimenten zijn uitgevoerd op Troned (locatie vliegveld Twente), een trainingscentrum voor professionele hulpdiensten, in een speciaal voor dit experiment gebouwd pand. Het gebouw is L-vormig, met een gang van 20 meter lang en 2 meter breed. De gang is opgebouwd uit kalkzandsteen (wanden) en betonkanaalplaten (dak). Halverwege de gang zit een veiligheidsdeur naar buiten. De korte kant van de L wordt gevormd door een aangepaste stalen zeecontainer waarin de vuurhaard is geplaatst. Dit stookgedeelte met een totale afmeting van 2,4 bij 2,4 meter heeft vier deuren en een schuifluik (afmeting circa 0,4 x 0,6 m) voor ventilatie. Boven de deuren van de gang is een rookschot van 50 cm aangebracht. De plattegrond van de locatie, het buitenaanzicht en het bovenaanzicht zijn weergegeven in figuur 1.1, figuur 1.2 en figuur 1.3.

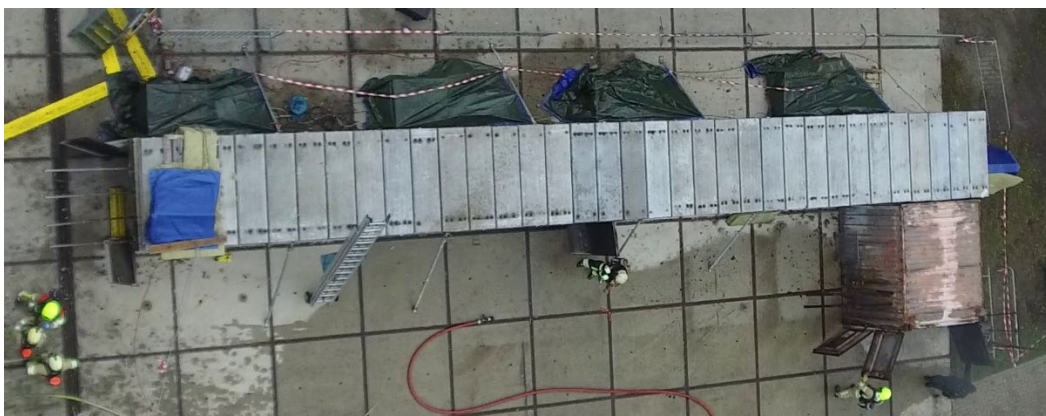




Figuur 1.1 Plattegrond van de testlocatie

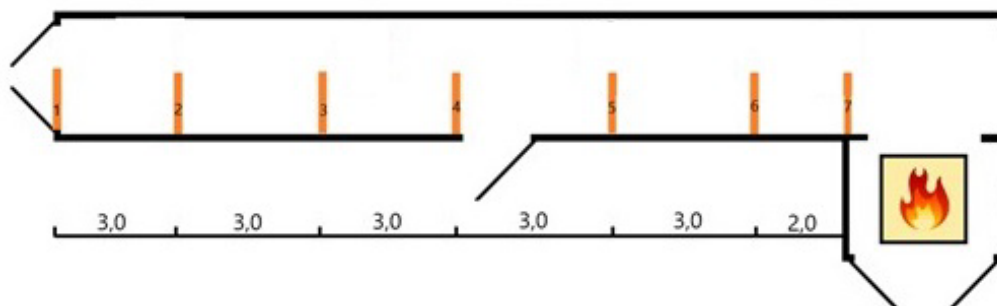


Figuur 1.2 Buitenaanzicht van de testlocatie



Figuur 1.3 Bovenaanzicht van de testlocatie

In het gebouw bevinden zich 7 drempels. Tussen alle drempels zit 3 meter, met uitzondering van de ruimte tussen drempel 6 en 7, waar 2 meter tussen zit, zie figuur 1.4.



Figuur 1.4 Locaties van drempels in de testlocatie

### 1.3 Brandstof

Als brandstof is gebruikgemaakt van een representatieve brandlast (pallets, spaanplaat en kunststof). De positionering van de vuurhaard is zodanig, dat bij een inzet in de gang de vuurhaard niet direct geraakt kan worden. De opbouw van de brandstof (van boven naar beneden) is als volgt:

- > spaanplaat (1220 x 1220 x 18 mm)
- > 2 dwarsliggers van pallets
- > spaanplaat
- > 2 dwarsliggers van pallets
- > spaanplaat
- > 3 pallets
- > spaanplaat
- > schuimblok (100 x 100 x 21 cm)
- > spaanplaat
- > 5 pallets.



Figuur 1.5 Hoeveelheid brandstof

Verder is aan beide zijden een spaanplaat schuin geplaatst (onderin tegen vuurhaard) en boven de vuurhaard tegen het plafond. Het aansteken is gebeurd door het besproeien van twee latten zachtboard met aanmaakvloeistof. De latten zijn aangestoken en in de tweede pallet van onderen geschoven, één links en één rechts. De hoeveelheid brandstof is weergegeven in figuur 1.5. In totaal bestaat de brandstof uit circa 180 kg vurenhout, 143 kg spaanplaat en 9 kg schuim. Het potentieel brandvermogen ligt tussen de 6 en 8 megawatt, vergelijkbaar met dat van een brand in een woonkamer.

### 1.4 Onderzochte blussystemen en inzetmethodes

In het praktijkonderzoek zijn de volgende blussystemen onderzocht:

- > Hogedruk (HD)
- > Lagedruk 250 (LD 250)
- > Lagedruk 450 (LD 450)
- > Oneseven (DLS).

Een overzicht van de blussystemen en hun eigenschappen is te vinden in tabel 1.1.

Tabel 1.1 Onderzochte blussystemen

Blussysteem	Merk / type blusmiddel	Gemiddeld debiet, gemeten voorafgaand aan de experimenten	Pompdruk	Type straalpijp
HD	Water	119 l/min	33 bar hoge druk	Akron trigger
LD 250	Water	252 l/min	10 bar	TFT F06
LD 450	Water	433 l/min	12 bar	TFT F06
DLS	A-klasse OneSeven Bijmengpercentage 0,3%	130 l/min	9 bar lage druk 8 bar luchtdruk	TFT G-force fliptip

Met elk blussysteem, met uitzondering van DLS, zijn twee rookgaskoelingsmethodes uitgevoerd: de 3D-pulsmethode en de boogmethode. Met DLS is alleen de boogmethode uitgevoerd. Daarnaast is tijdens twee experimenten de deurprocedure toegepast. Hieronder is kort beschreven wat de methodes inhouden. Een stap- voor-stap-beschrijving van de methodes is te vinden in het inzetprotocol in bijlage 1.

### 3D-pulsmethode

De 3D-pulsmethode zoals gebruikt in dit onderzoek is gebaseerd op de les- en leerstof van Manschap A uit 2019. De straalpijpvoerder geeft aan het begin van de gang een lange puls van drie seconden in de rooklaag met een kegelhoek van 30 graden. Na de puls vordert de ploeg richting de vuurhaard. Om de drie meter wordt er een puls van drie seconden gegeven, totdat de ploeg de vuurhaard heeft bereikt. Daar wordt gestart met het blussen van de vuurhaard met de ‘pencilling en painting (schilderen) methode’, zoals beschreven in de les- en leerstof.

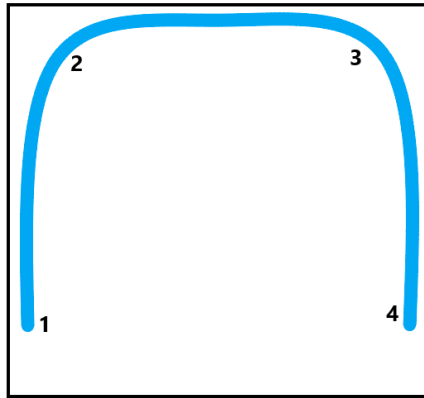
#### Pencilling en painting

“Bij pencilling spuit je een rechte straal naar de vlammen en maak je een vegende beweging. Denk maar aan het inkleuren van een tekening met een potlood. De methode pencilling gebruik je dus om de brandhaard zelf af te blussen.

Bij painting/schilderen breng je een dunne laag water aan op een oppervlak. Dit lijkt op een dunne laag verf die je met een kwast aanbrengt. Je gaat schilderen om te voorkomen dat niet-brandende materialen gaan branden of uitgassen (pyrolyseren). De methode schilderen gebruik je dus om nieuwe brandhaarden te voorkomen” (E-module Af- en nablissing, Leergang Manschap A 1.0, 2018).

### Boogmethode

De boogmethode is gebaseerd op de methode ‘flow and move’ die in de Verenigde Staten wordt toegepast (Zevotek, Stakes, & Willi, 2018). De naam is gebaseerd op de beweging die wordt gemaakt met de straalpijp, namelijk het patroon 1-2-3-4-3-2-1 zoals weergegeven in figuur 1.6.



**Figuur 1.6 Boogpatroon**

De straalpijpvoerder zet aan het begin van de gang de straalpijp open. Hij begint het boogpatroon te maken met een gebonden straal, terwijl de straalpijp open staat. Tijdens het (steeds opnieuw) maken van het patroon blijft de ploeg vorderen richting de vuurhaard. De straalpijpvoerder begint vrij dicht voor zich (1 meter) met koelen, maar koelt gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit. Als de ploeg is aangekomen bij de vuurhaard, wordt gestart met het blussen daarvan volgens de 'penciling en painting methode'.

#### **Deurprocedure en temperatuurcheck**

Tijdens twee experimenten (experimenten 16 en 17) zijn voorafgaand aan de rookgaskoeling de deurprocedure en temperatuurcheck uitgevoerd, zoals is beschreven in de les- en leerstof die ten tijde van het onderzoek (2019) was opgenomen in de leergang Manschap A (Manschap A 1.0).<sup>2</sup> De straalpijpvoerder controleert de deur op temperatuur door een korte puls te geven op het bovenste deel van de deur. Vervolgens plaatst hij een koudeblok: twee korte pulsen op de scheiding van de bovenkant tussen deur en kozijn.

**Koudeblok**



“Het openen van de deur is bedoeld om te controleren of er brandstof achter de deur aanwezig is. Voordat de deur wordt geopend, geeft de straalpijpvoerder eerst twee korte stoten met een nevelstraal boven de deur. Eerst bovenaan de scharnierkant van de deur, vervolgens bovenaan de kant van de deur waar de klink zit. Brandgassen die door de kier aan de bovenkant van de deur naar buiten komen, worden op deze manier direct gekoeld en verdund. Dit noemen wij het maken van een koudeblok” (E-module Verkenningstechnieken, Leergang Manschap A 1.0, 2018).

<sup>2</sup> Vooruitlopend op deze rapportage is de les- en leerstof aangepast in Manschap A 2.0.

Nadat de nummer twee van de inzetploeg de deur iets open heeft gedaan, gaat de straalpijpvoerder (nummer 1) in de deuropening zitten en geeft een korte puls van één seconde in de ruimte. Direct na de puls trekt de straalpijpvoerder zich terug, sluit de deur en bespreekt met de nummer twee wat ze beiden gezien hebben. Als er rook is, dan moet er eerst bij binnentreden een temperatuurcheck worden uitgevoerd. Bij de temperatuurcheck geeft de straalpijpvoerder wederom een korte puls van één seconde om te kijken of het water verdampt of naar beneden valt. Ook na deze puls trekt de straalpijpvoerder zich terug en bespreekt met de nummer 2 wat ze beiden gezien en gehoord hebben.

### 1.4.1 Overzicht van de experimenten

In tabel 1.2 is een overzicht opgenomen van alle experimenten die uitgevoerd zijn.

**Tabel 1.2** Overzicht praktijkexperimenten

Experiment	Datum	Blussysteem (druk/debiet)	Inzetmethode
1	14-10-2019	HD	3D-pulsmethode
2	14-10-2019	LD 250	3D-pulsmethode
3	14-10-2019	LD 250	3D-pulsmethode
4	14-10-2019	HD	3D-pulsmethode
5	15-10-2019	LD 450	3D-pulsmethode
6	15-10-2019	HD	Boogmethode
7	15-10-2019	HD	Boogmethode
8	15-10-2019	LD 450	3D-pulsmethode
9	16-10-2019	LD 250	Boogmethode
10	16-10-2019	LD 250	Boogmethode
11	16-10-2019	DLS	Boogmethode
12	16-10-2019	DLS	Boogmethode
13	16-10-2019	DLS	Boogmethode
14	17-10-2019	LD 450	Boogmethode
15	17-10-2019	LD 450	Boogmethode
16	17-10-2019	HD	Deurprocedure gevolgd door 3D-pulsmethode
17	17-10-2019	LD 250	Deurprocedure gevolgd door 3D-pulsmethode
18	18-10-2019	Nulmeting	geen
19	18-10-2019	Nulmeting	geen

## 1.5 Meetopstelling

Tijdens de experimenten zijn diverse parameters gemeten. Het gaat daarbij om de temperatuur, straling, gasconcentraties en het visuele beeld binnen en buiten. Daarnaast is de perceptie gemeten van de inzetploeg (de straalpijpvoerder en nummer 2).

### 1.5.1 Temperatuur

De temperatuur is tijdens de experimenten op verschillende locaties gemeten met behulp van thermokoppels (type K). In de gang zijn vier meetbomen (B1 tot en met B4) met in totaal 28 thermokoppels geplaatst op verschillende hoogtes: 0,3 meter, 0,9 meter, 1,5 meter, 1,8 meter, 2 meter, 2,2 meter en 2,4 meter. Daarnaast zijn in de brandruimte vijf losse thermokoppels geplaatst voor het meten van de temperatuur aldaar.

Verder zijn er op vier vlaggenstokken boven de voordeuren thermokoppels geplaatst. Per vlaggenstok (van 2,5 meter lang) zijn er vier thermokoppels geplaatst voor het meten van de uitstromende gassen en het effect van de deurprocedure. De data van deze thermokoppels zijn geregistreerd met behulp van het systeem LabVIEW.

De thermokoppels zijn afgeschermd van de omgeving door een stalen koker met daarin isolatie van steenwol. De warme las van de thermokoppel meet daardoor de temperatuur van de warme gassen die door de koker stromen, zonder te worden beïnvloed door straling of water. Een voorbeeld hiervan is met rood omcirkeld in figuur 1.7.

### 1.5.2 Straling

Er zijn twee typen warmtestralingsmeters gebruikt om de straling te meten: vier watergekoelde fluxmeters (Schmidt-Boelter) en vier plaatfluxmeters (PTHFM). De warmtestralingsmeters zijn geplaatst in meetbomen B1 tot en met B4. De watergekoelde fluxmeters zijn gevoeliger en hebben een kleiner meetbereik dan de plaatfluxmeters. Omdat er op lagere hoogte minder straling wordt verwacht zijn de watergekoelde fluxmeters op 0,3 meter hoogte geplaatst en de plaatfluxmeters op 1,5 meter. De data van deze warmtestralingsmeters zijn ook geregistreerd met behulp van LabVIEW. De plaatfluxmeter is met groen omcirkeld in figuur 1.7.



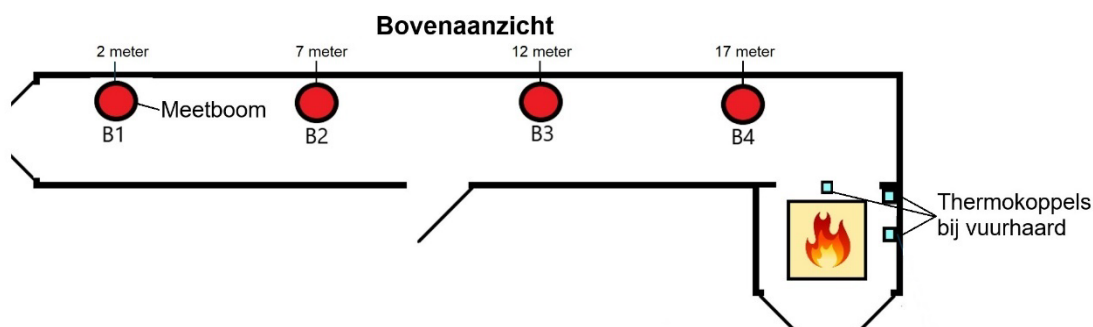
Figuur 1.7 Meetboom met sensoren

### 1.5.3 Gasconcentraties

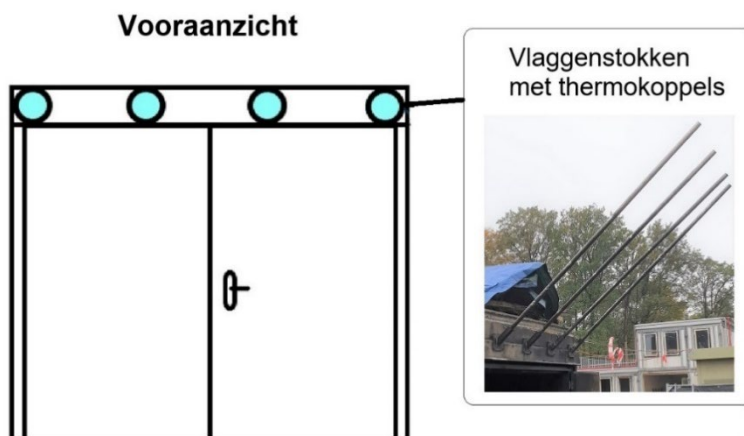
De gasconcentraties van zuurstof (O<sub>2</sub>), koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) zijn gemeten met Testo-meetapparatuur. In figuur 1.7 is de Testo-sonde met geel omcirkeld. In totaal zijn op drie posities gasmetingen gedaan. Alle gasmetingen zijn op 0,3 meter hoogte uitgevoerd bij meetboom B1 tot en met B3. De data van de gasmetingen zijn geregistreerd met behulp van het systeem van Testo. Gasmeters zijn omwille van de temperatuur alleen bij meetboom 1, 2 en 3 geplaatst. In tabel 1.3 is weergegeven welke parameter is gemeten, waarmee deze is gemeten en op welke locatie dit is gebeurd. De gegevens over de gebruikte meetapparatuur zijn opgenomen in bijlage 2. De meetlocaties zijn weergegeven in figuur 1.8 en figuur 1.9.

Tabel 1.3 Overzicht van parameters, meetwijze en meetlocatie

Parameter	Meetwijze	Meetlocatie	Meethoogte (m)
Temperatuur	Thermokoppels type K	B1 t/m B4	0,3 - 0,9 - 1,5 - 1,8 - 2,0 - 2,2 - 2,4
		Brandruimte	2,0 - 2,2 - 2,4
		Boven voordeuren	≥ 2,5
Straling	Plaatfluxmeter (PTHFM)	B1 t/m B4	1,5
	Watergekoelde fluxmeter (SB)	B1 t/m B4	0,3
Gasconcentraties	Rookgasanalyser Testo 350	B1 t/m B3	0,3



Figuur 1.8 Plattegrond (bovenaanzicht) met locatie van meetapparatuur



Figuur 1.9 Vooranzicht gebouw met locatie van meetapparatuur

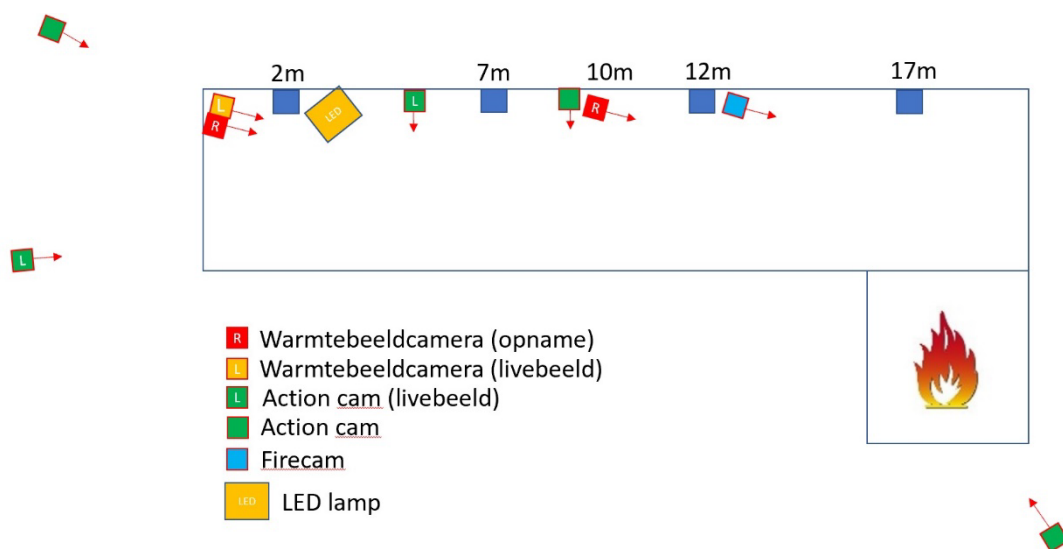
### 1.5.4 Camerabeelden

De experimenten zijn geregistreerd met tien videocamera's: zes action camera's, drie warmtebeeldcamera's en een FireCam. De FireCam is het dichtst bij de vuurhaard geplaatst, omdat deze (kortstondig) temperaturen tot ruim 400 °C kan weerstaan. De camerabeelden zijn gebruikt om de metingen te ondersteunen.



Figuur 1.10 Warmtebeeldcamera in beschermhoes

Zeven camera's zijn in de gang van het gebouw op de grond geplaatst. Daarnaast zijn drie camera's buiten geplaatst, twee gericht op de deuren van de gang en één op de deuren van de stookcontainer. De locaties van deze camera's staan weergegeven in figuur 1.11.



Figuur 1.11 Plattegrond met locaties van de camera's

### 1.5.5 Subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning

Om de subjectieve beleving te meten, hebben de straalpijpvoerder en de nummer 2 na elke inzet een korte vragenlijst ingevuld over warmtebeleving en eventuele pijsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning tijdens de inzet. De vragenlijst bestond uit vijf vragen waarbij een score gegeven moest worden en twee open vragen. De vragenlijst is te vinden in bijlage 3.



## 1.6 Experimentprotocol

De brand is aangestoken en kreeg door middel van het open laten van alle deuren van de container (brandruimte) voldoende zuurstof. Op het moment dat de vlammen het schuimblok hadden bereikt, zijn de bovenste twee deuren van de stookcontainer gesloten, zie figuur 1.12.



**Figuur 1.12** Bovenste deuren van de stookcontainer zijn gesloten

Zodra de rooklaag bij de veiligheidsdeur een dikte van 30 tot 50 cm had bereikt, werd de veiligheidsdeur (halverwege de gang) gesloten. De linker onderdeur van de stookcontainer werd gesloten wanneer de vuurhaard volledig in brand was. Het luik in de deur bleef open staan. Vervolgens werd de temperatuur over de gehele gang gecontroleerd aan de hand van de temperatuurmetingen. Als de temperatuur in de hele gang boven de 100 graden Celsius was, werd ook de rechteronderdeur van de stookcontainer gesloten, zie figuur 1.13.



**Figuur 1.13** Alle deuren van de stookcontainer zijn gesloten

Als de rooklaag bij de ingang van de gang een dikte van meer dan 50 cm had bereikt, werd de linker deur van de gang gesloten. De temperatuur werd continu gemonitord om te kijken of in de hele gang de temperatuur op 2.20 hoogte meer dan 200 graden Celsius had bereikt. Zodra de temperatuur een minuut lang boven de 200 graden Celsius bleef, kon er worden gestart met de inzet. De rechterdeur van de gang bleef tijdens de inzetten openstaan.

### 3D-pulsmethode

De inzetploeg startte bij de eerste drempel in de gang en gaf daar een puls van drie seconden. Vervolgens vorderde de ploeg naar de volgende drempels. Bij het bereiken van elke volgende drempel werd dit door de ploeg doorgegeven aan de commandoruimte, zodat de vorderingen geregistreerd konden worden. Vervolgens werd een puls gegeven van drie seconden, behalve bij drempel 7. Het bereiken van drempel 7 werd eveneens doorgegeven aan de commandoruimte.

### Boogmethode

De inzetploeg begon bij de eerste drempel in de gang. De straalpijpoerder zette de straalpijp open en begon het boogpatroon te maken. Tijdens het maken van het patroon bleef de ploeg vorderen richting de vuurhaard.

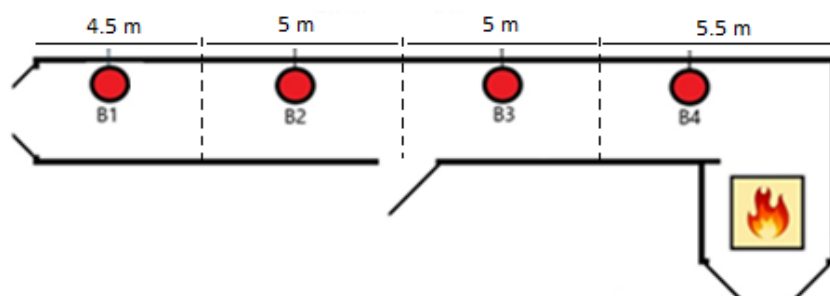
### Blussing

Bij het bereiken van drempel 7 werd gestart met het blussen van de vuurhaard volgens de les- en leerstof. Als er een knockdown<sup>3</sup> werd bereikt, werd dit doorgegeven ter registratie.

Het inzetprotocol met daarin beide methoden voor rookgaskoeling zijn stap voor stap uitgewerkt en te vinden in bijlage 1.

## 1.7 Data-analyse

Voor het beantwoorden van de hoofdvraag wordt met name gebruikgemaakt van de temperatuurmetingen. Om uitspraken te kunnen doen over het effect van de inzet in de gang wordt de gang in de lengterichting opgedeeld in segmenten. De grens tussen elk segment bevindt zich in het midden van twee meetlocaties. Hierdoor ontstaan twee segmenten (B2 en B3) met de meetlocatie in het midden van het segment en een lengte van 5 m, en twee segmenten met de meetlocatie iets naast het midden, met een lengte van 4,5 m (B1) en 5,5 m (B4).



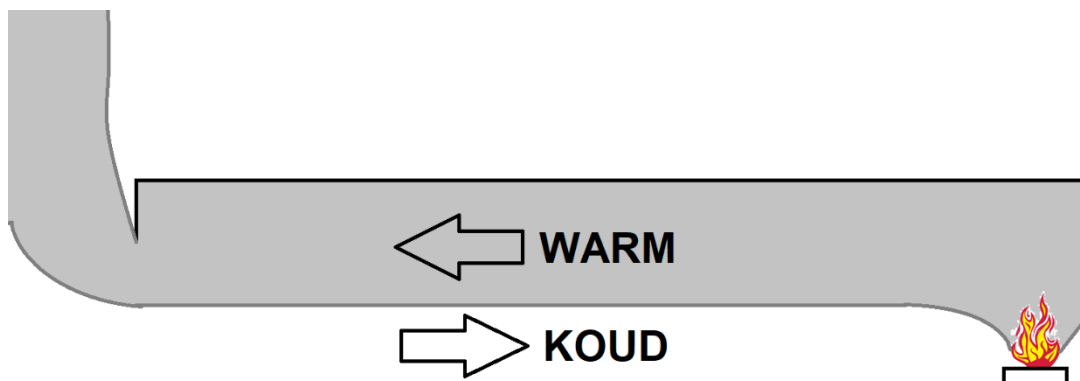
Figuur 1.14 Bovenaanzicht verdeling van de gang in verticale segmenten

### 1.7.1 Warme en koude zone

Naast de indeling in segmenten in de lengterichting van de gang wordt er gebruikgemaakt van principes uit zonemodellering vanuit Fire Safety Engineering (FSE) voor de hoogterichting. Hierbij wordt een verdere tweedeling gemaakt in een warme en koude zone. Deze zones ontstaan doordat de vuurhaard hete rookgassen produceert, de aanwezige lucht opwarmt en daarnaast lucht aanzuigt richting de brandhaard. Onder invloed van

<sup>3</sup> Knockdown: er zijn geen zichtbare vlammen meer, maar vuurhaard is niet gedoofd.

temperatuurverschillen ontstaan drukverschillen die ervoor zorgen dat warme gassen naar buiten stromen. Tegelijk komt er een stroming op gang van buiten naar de vuurhaard, door de vraag van zuurstof van de vuurhaard. Hierdoor ontstaat een tegengestelde stroming onder en boven de neutrale zone, met boven de hete rookgassen (de warme zone) en onder de aanzuiging van (koudere) buitenlucht (de koude zone).

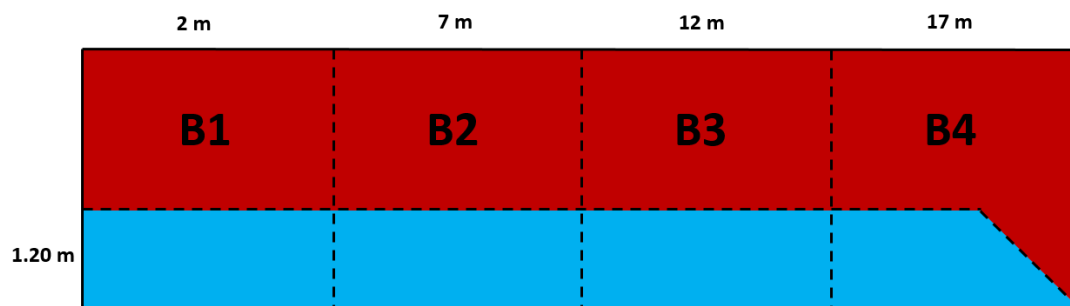


**Figuur 1.15** Zijaanzicht verdeling warme en koude zone

Om het effect van de verschillende inzetmethoden op rookgaskoeling te onderzoeken, is het nodig om te weten op welke hoogte de neutrale zone zich bevindt. De neutrale zone bevindt zich ongeveer ter hoogte van de onderkant van de rooklaag. De precieze hoogte van de rooklaag is echter moeilijk te definiëren en fluctueert gedurende de inzet. Daarnaast is in de praktijk sprake van een temperatuurverloop van de warme naar de koude zone (ook wel de 'mengzone' genoemd in een driezone model) rondom de neutrale zone. Op basis van de meetresultaten is ervoor gekozen om de grens tussen de warme en koude zone vast te stellen op één hoogte voor alle experimenten.

De gecontroleerde opzet van de experimenten leidt over het algemeen tot een constante rooklaag waarbij het grootste temperatuurverloop is waargenomen tussen 1,5 en 0,9 m. Op basis hiervan en van visuele waarnemingen is besloten om de grens tussen de zones vast te stellen op 1,2 m, zoals weergegeven in figuur 1.16.

Omdat bij segment B4 nog uitstroom van rook uit de brandruimte plaatsvindt, is de temperatuur ook laag bij de grond nog hoog. De grens tussen de warme en koude zone wordt daarom doorgetrokken tot de grond (0 m) in plaats van op 1,2 m hoogte gehouden.



**Figuur 1.16** Zijaanzicht verdeling van de gang in verticale segmenten en horizontale warme zone (rood) en koude zone (blauw)

## 1.7.2 Rookgaskoeling

Om het effect te bepalen van de verschillende methoden op de rookgassen wordt gekeken naar de temperatuurmetingen in de verschillende segmenten en zones tijdens het vorderen. De metingen per zone en segment worden hierbij gemiddeld. Temperatuur is echter lokaal gemeten en binnen een zone of segment kunnen verschillende temperaturen aanwezig zijn. De gemiddelde temperatuur in een zone of segment is een maat voor de koeling die is verkregen door opname van warmte vanaf de brandhaard. De energie-inhoud is een globale eigenschap van het hele segment en wordt vooral gebruikt om te zien of er in dat segment sprake is van een energie toe- of afname. In principe is sprake van een energiebalans. De verschillende energiestromen naar bijvoorbeeld scheidingsconstructies zijn echter niet gemeten; er is alleen gekeken naar de energie-inhoud van de zone en/of het segment. De energie-inhoud is samen met de temperatuur gebruikt om inzichtelijk te maken of er sprake is van (permanente) koeling binnen een zone of segment. De metingen zijn geanalyseerd voor de duur van de inzet, dus vanaf het moment van binnentreden van de gang tot het bereiken van de vuurhaard (drempel 7). Het afblussen van de vuurhaard is hierin niet meegenomen. Omdat elke combinatie van inzetmethoden twee keer is uitgevoerd, is gerekend met het gemiddelde van beide experimenten. Daarbij is de standaarddeviatie bepaald. Met twee herhalingen kan de standaarddeviatie weliswaar niet kwantitatief betrouwbaar vastgesteld worden, maar geeft wel een maat voor de spreiding tussen beide experimenten.

### Temperatuur versus hoogte

De invloed van rookgaskoeling op de temperatuur op verschillende hoogtes wordt als volgt bepaald: er wordt per hoogte gekeken naar het verschil in temperatuur tussen het bereiken van opeenvolgende drempels tijdens het vorderen door de gang. De som van deze verschillen is de netto verandering tijdens het vorderen. Deze sommen zijn vervolgens per blussysteem gemiddeld om tot een algemeen effect voor de gebruikte methode te komen. Omdat de nadruk hier ligt op het effect van rookgaskoeling over de verschillende hoogtes, wordt hier over de hele gang gemiddeld.

### Energieafname

Voor het bepalen van de energieafname wordt per segment en zone de energie-inhoud bepaald. Door een vaste grenshoogte aan te houden, blijft het volume van elk segment en zone constant. De energie-inhoud van een segment is dan alleen afhankelijk van de temperatuur van de rooklaag in dat segment op een bepaald moment. Voor de temperatuur van de rooklaag in een segment worden alle thermokoppels van dat segment gemiddeld. Door te kijken naar de energie-inhoud op verschillende momenten tijdens het vorderen kan zo een energieverandering worden bepaald veroorzaakt door het vorderen. Ook maken gelijke volumes het mogelijk om de energieveranderingen van de verschillende experimenten met elkaar te vergelijken.

$$Q = C_v \cdot M \cdot T$$

Hierin is Q de energie,  $C_v$  de (temperatuurafhankelijke) soortelijke warmte bij constant volume, M de massa en T de temperatuur. De soortelijke warmte wordt bepaald door:

$$C_v(T) = a \cdot T + b$$

Met de temperatuur T in Kelvin en de constante  $a = 0.187 \text{ J/kg/K}^2$  en  $b = 665 \text{ J/kg/K}$  (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2011).

De massa wordt bepaald door de soortelijke massa en het volume. Het volume wordt berekend op basis van de vastgestelde grenshoogte en de afmetingen van de gang. Voor de relatie tussen soortelijke massa en temperatuur kan worden uitgegaan van de volgende formule (Nederlands Normalisatie-Instituut, 2011):

$$\rho = \frac{1.293 \cdot 273}{T} = \frac{353}{T}$$

Samen wordt dit:

$$Q = (0.187 \cdot T + 665) \cdot 353 \cdot V$$

Met Q de energie in Joule, T de temperatuur in Kelvin en V het volume in m<sup>3</sup>.

### Voorwaartse en achterwaartse koeling

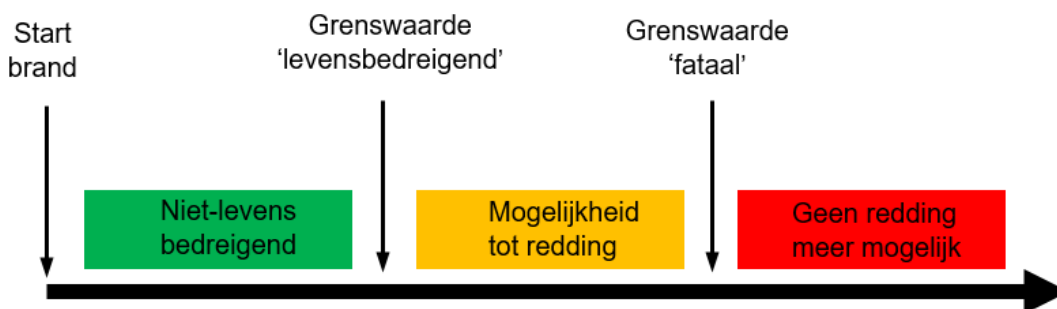
Om uitspraken te kunnen doen over voorwaartse en achterwaartse koeling is gekeken naar de temperatuur tijdens de inzet per meetlocatie. Deze is afgezet tegen de momenten waarop de drempels bereikt zijn, en dus de positie van de ploeg in de gang. Hierbij is gelet op temperatuurveranderingen wanneer elke drempel bereikt wordt bij de meetlocaties die zich op dat moment voor of achter de ploeg bevinden. Per experiment is kwalitatief geobserveerd of de temperatuur steeg of daalde, en hoe lang het effect zichtbaar bleef in termen van 'drempels gevorderd'. Bijvoorbeeld: op het moment dat de inzetploeg drempel 2 (op 3 m) bereikt, wordt bij B3 (ter hoogte van drempel 5, op 12 m) een temperatuurdaling waargenomen in de warme zone. De voorwaartse koeling is dan ongeveer 9 m (of 3 drempels). Als vervolgens weer een temperatuurstijging wordt waargenomen bij drempel 2 op het moment dat de ploeg bij drempel 5 is, is de achterwaartse koeling ook ongeveer 3 drempels. Met andere woorden: de temperatuur blijft laag tot ongeveer 9 m achter de ploeg.

### 1.7.3 Vuurhaard

Bij de vuurhaard zijn metingen uitgevoerd met 5 thermokoppels: een boven de scheiding tussen de brandruimte en de gang (de uitstroomopening) en vier aan de wand in de brandruimte zelf. Ook hier is gekeken naar het verschil in temperatuur tijdens de fase van rookgaskoeling (het vorderen), dus vanaf de start van de inzet tot het bereiken van de vuurhaard (drempel 7). Het daadwerkelijk afblussen van de vuurhaard is hierin niet meegenomen. De metingen van de vier thermokoppels in de brandruimte zijn gemiddeld. Per blussysteem is het gemiddelde over beide experimenten bepaald.

### 1.7.4 Veiligheid

De overlevingsmogelijkheden worden in drie fasen opgedeeld, zie in figuur 1.17.



Figuur 1.17 Schema van overlevingsmogelijkheden van slachtoffers bij brand

Voor de overlevingsmogelijkheden voor eventuele slachtoffers wordt uitgegaan van de metingen op 0,3 m hoogte. Hier zijn gassen en warmtestraling gemeten. Volgens de ISO-norm (ISO 13571, 2012) en het SFPE-handboek (Purser & McAllister, 2016) zijn de onderstaande methodes van belang voor het bepalen van het moment waarop de overlevingsmogelijkheden van personen worden bedreigd.

- > De Fractional Effective Concentration (FEC) of Fractional Irritant Concentration (FIC). Dit is de verhouding tussen de concentratie van een bepaalde stof en de concentratie die de overlevingsmogelijkheden bedreigt.
- > De Fractional Effective Dose (FED) of Fractional Lethal Dose (FLD). Dit is de verhouding tussen de dosis – de concentratie en duur van de blootstelling – van een bepaalde stof en de dosis die de overlevingsmogelijkheden bedreigt.

Om te kunnen bepalen vanaf welke FED-/FLD- of FEC-/FIC-waarde blootgestelde personen niet meer kunnen overleven, is een grenswaarde vastgesteld. Deze grenswaarde is afhankelijk van de kwetsbaarheid van de personen en de brandcondities waaraan zij worden blootgesteld. Er wordt volgens het SFPE-handboek onderscheid gemaakt in drie groepen: 'zeer kwetsbaar', 'kwetsbaar' en 'algemeen', dit is weergegeven in tabel 1.4.

**Tabel 1.4 Overzicht van grenswaarden volgens het SFPE-handboek**

Brandconditie	Methode	Levensbedreigend			Fataal		
		Zeer kwetsbaar	Kwetsbaar	Algemeen	Zeer kwetsbaar	Kwetsbaar	Algemeen
Irriterende gassen	FIC/FLD	0,5	1,5	5,0	0,1	0,3	1,0
Verstikkende gassen	FED <sub>IN</sub>	0,1	0,3	1,0	0,2	0,6	2,0
Warmte	FED <sub>heat</sub>	0,8	2,4	8,0	1,2	3,6	12,0

Op basis van deze grenswaarden is per experiment bepaald welke grenswaarde voor welke methode als eerste overschreden wordt. Grafieken van alle experimenten en alle methoden zijn opgenomen in bijlage 8 Veiligheid Slachtoffers.

Voor de veiligheid van brandweerpersoneel zijn geen standaardiseerde methoden ontwikkeld zoals voor slachtoffers. Er is gebruik gemaakt van het stralingsdeel uit de FED<sub>heat</sub> methode, waarbij voor de bepaling van de blootstelling een formule is ontwikkeld. Deze formule is gebaseerd op de blootstelling aan warmtestraling volgens onderstaande tolerantie (Brandweeracademie, 2016):

- Maximale stralingsbelasting van 3 kW/m<sup>2</sup> gedurende 20 minuten
- Maximale stralingsbelasting van 4,6 kW/m<sup>2</sup> gedurende 5 minuten

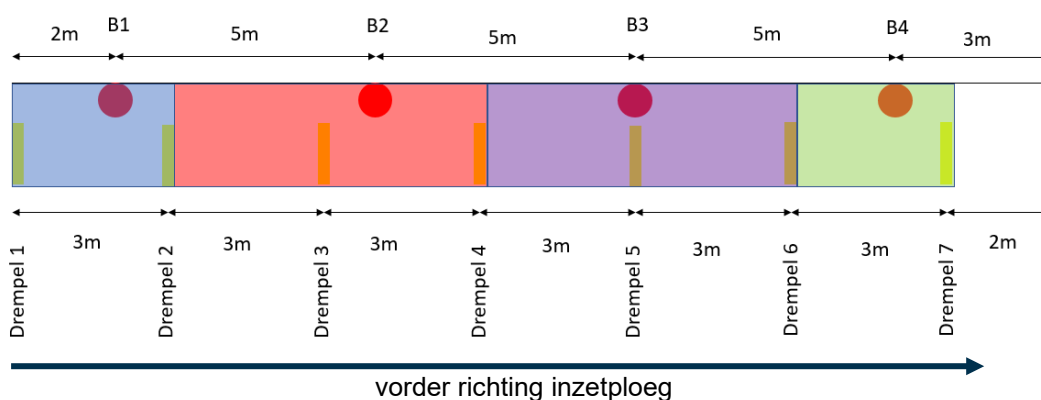
Met de ontwikkelde formule wordt voor beide toleranties een FED van 1,0 bereikt. Om de daadwerkelijke blootstelling te bepalen wordt gebruik gemaakt van de gemeten straling op

1,5 m hoogte. Deze hoogte kan gezien worden als de maximale hoogte (bovenzijde van de helm) tijdens het laag vorderen in de gang.

Deze methode en ontwikkelde formule moet niet gezien worden als een daadwerkelijke bepalingsmethode voor de veiligheid van brandweerpersoneel, maar dient in dit onderzoek als methode om de verschillende technieken relatief te kunnen vergelijken.

Om te bepalen welke blootstelling aan warmtestraling de ploeg oploopt tijdens het vorderen zijn de metingen van elke meetlocatie opgedeeld naar het moment dat de inzetploeg passeert en bij elkaar opgeteld zoals weergegeven in

Figuur 18. Tussen drempel 1 en drempel 2 bevindt de ploeg zich in het blauwe gebied en wordt de straling van meetlocatie B1 meegenomen, tussen drempel 2 en drempel 4 de straling van B2, enzovoort. Zo kan de totale dosis berekend worden over de gehele gang, opgedeeld in vier delen. De blootstelling aan warmtestraling tijdens het afblussen van de brand is buiten beschouwing gelaten, omdat het onderzoek zich richt op de inzet vanaf de aankomst van de inzetploeg bij de buitendeur tot aan het blussen van de brandhaard.



**Figuur 18. Verdeling van de metingen voor het berekenen van de stralingsblootstelling van de inzetploeg**

### 1.7.5 Deurprocedure

In twee experimenten is de deurprocedure onderzocht. Per experiment is de deurprocedure drie keer uitgevoerd, waarnaar verder werd gegaan met een gewone inzet. Per experiment is de temperatuur in de warme en koude zone en per meetlocatie berekend. Vervolgens is gekeken of er tijdens het uitvoeren van de deurprocedure enige verandering in temperatuur plaatsvindt. Bij de deurprocedure worden ook de metingen beoordeeld van de uitstromende rook, uitgevoerd met de thermokoppels boven de deuren.

## 1.8 De kwaliteit van het onderzoek

De kwaliteit van het onderzoek wordt in belangrijke mate bepaald door de mate waarin vooraf en tijdens de uitvoering aandacht wordt besteed aan uniformiteit en betrouwbaarheid. In deze paragraaf komt eerst de uniformiteit van de experimentcondities aan bod, gevolgd door de betrouwbaarheid.

### 1.8.1 Uniformiteit van de experimentcondities

Het nastreven van uniformiteit van de experimentcondities is van belang om het beïnvloeden van de experimenten door (ongewenste) variabelen uit te sluiten of ten minste zoveel mogelijk te beperken. Concreet zijn de volgende maatregelen genomen om te zorgen voor zo uniform mogelijke experimentcondities.

- > Het bevorderen van een uniforme brandontwikkeling door:
  - Het beperken van het aantal experimenten op één dag, zodat het gebouw vrijgemaakt kon worden van rook en de temperatuur van het gebouw voorafgaand aan elk experiment weer voldoende was gedaald tot ongeveer de omgevings-temperatuur, zodat er sprake was van een gelijkwaardige startsituatie voor alle experimenten.
  - Dezelfde hoeveelheid brandstof op exact dezelfde locatie in de brandruimte te plaatsen en op dezelfde wijze aan te steken.
  - Het gelijk houden van het ventilatieprofiel en van deursluitingen.
  
- > Het bevorderen van uniforme (start)condities waaronder de rookgaskoeling kon plaatsvinden door:
  - Het plaatsen van windschermen om zoveel mogelijk te voorkomen dat wind effect zou hebben op de rookontwikkeling en rookgaskoeling. Uiteraard was het niet mogelijk om het gebouw volledig af te schermen van de wind.
  - Strak omschrijven, uitvoeren en controleren welke deuren bij de start van en tijdens het experiment gesloten dienden te zijn of te worden.
  - Voorafgaand aan elk experiment de temperatuur over de gehele gang op 2.2 m hoger dan 200 graden te laten zijn voor een periode van langer dan één minuut.
  - Voorafgaand aan elk experiment alle sensoren en camera's te controleren op positie en werking.
  - Na afloop van elk experiment de gang zoveel mogelijk schoon te maken en brandresten, water en/of schuim te verwijderen.
  
- > Het bevorderen van uniforme condities betreffende de brandweerinzet door:
  - Een protocol te gebruiken waarin omschreven stond welke handelingen voorafgaand, tijdens en na afloop van een experiment dienden te worden uitgevoerd.
  - Het instrueren en oefenen van het protocol voorafgaand aan de daadwerkelijke inzet.
  
- > Het bevorderen van een uniforme analyse door de data te verwerken met geautomatiseerde tools.

### 1.8.2 Betrouwbaarheid

Bij de betrouwbaarheid van een onderzoek gaat het om de vraag of de resultaten hetzelfde zijn als het onderzoek op exact dezelfde wijze nog een keer wordt uitgevoerd. Door het wisselen van straalpijpvoerder per experiment is hieraan een concessie gedaan. De voordelen van het wisselen van de straalpijpvoerder voor het bereiken van het doel van het onderzoek werden echter van groter belang geacht. Zo kon door te wisselen van straalpijpvoerder voorkomen worden dat er systematische fouten zouden ontstaan bij de uitvoering. Tevens verlichtte het wisselen de personele belasting op een experimentdag. Welke gevolgen dit heeft gehad voor de herhaalbaarheid is beschreven in paragraaf 2.2.



Bij de rest van het ontwerp en de uitvoering van de experimenten, evenals bij het gebruik van de meetapparatuur is bij dit onderzoek een zo groot mogelijke betrouwbaarheid nagestreefd op de onderstaande manieren.

- > Het ontwerp en de uitvoering van de experimenten:
  - Het onderzoeksteam dat de experimenten heeft ontworpen, heeft tevens de meetopstelling gerealiseerd en had de supervisie over de uitvoering. Hiermee is een hoge mate van consistentie gerealiseerd in de verschillende fasen van het onderzoek.
  - Er was sprake van een klein, compact onderzoeksteam en op elk aspect van het onderzoek (onder andere meetapparatuur, dataverzameling en -analyse) is een vast (sub)team gezet, waardoor de kans op verschillende interpretaties gedurende de experimenten beperkt is gebleven.
  - Er is enkele maanden voorafgaand aan de experimenten een experiment (pre-test) uitgevoerd om de onderzoeksopzet en meetapparatuur te testen.
  - Alle varianten zijn ten minste dubbel uitgevoerd in het kader van herhaalbaarheid.
  - Alle varianten zijn uitgevoerd volgens duidelijk omschreven protocollen.
  - Er is een logboek bijgehouden waarin alle cruciale momenten gedurende een experiment zijn genoteerd. Daarnaast zijn afwijkingen van het onderzoeksprotocol genoteerd.
  
- > Metingen en meetapparatuur
  - Alle meetapparatuur is voorafgaand aan iedere experiment gecontroleerd op de juiste werking en de juiste registratie van meetresultaten.
  - Voor alle experimenten zijn op meerdere posities in de gang en op meerdere hoogtes metingen uitgevoerd.
  - De meetresultaten zijn gekoppeld aan de camerabeelden op basis van de tijdstempels en visuele waarneming.

### **1.8.3 Verloop van het onderzoek**

Ondanks de controle van de meetapparatuur voorafgaand aan iedere experiment, is tijdens één experiment met LD 450 volgens de 3D-pulsmethode (experiment 5) het meetprogramma van de gasmetingen vastgelopen. Hierdoor zijn alleen de gasmetingen van experiment 8 LD 450 volgens de 3D-pulsmethode meegenomen in het onderzoek.



## 2 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de praktijkexperimenten besproken. Als eerste wordt ingegaan op de herhaalbaarheid van de experimenten (paragraaf 2.1). In de paragrafen 2.2 tot en met 2.5 zijn de resultaten beschreven.

### 2.1 Herhaalbaarheid

Een belangrijk aspect van deze experimentele opzet is de mogelijkheid om herhaalbare resultaten te produceren. Als eerste is daarom gekeken naar de startcondities. Door steeds gebruik te maken van eenzelfde vuurlast en een vast experimentprotocol is de variatie in startcondities al zoveel mogelijk beperkt. Zodoende wordt elk experiment gestart in een vergelijkbare situatie, zodat de verschillende blussystemen en inzetmethodes zo objectief mogelijk met elkaar vergeleken kunnen worden. De gemeten temperatuurverdeling in de gang bij de start van de inzet laat zien in hoeverre vergelijkbare startcondities zijn gerealiseerd.

In tabel 2.1 zijn per locatie en hoogte de temperatuur en standaarddeviatie weergegeven bij start van de inzet gemiddeld over alle experimenten. De locatie is gegeven als het aantal meter vanaf het begin van de gang. De vuurhaard bevindt zich dus op 20 m (aan het eind van de gang om de hoek).

**Tabel 2.1 Gemiddelde temperatuur bij start inzet over alle experimenten per locatie en hoogte**

Hoogte / locatie	B1 (2 m) [°C]	B2 (7 m) [°C]	B3 (12 m) [°C]	B4 (17 m) [°C]
2,4 m	221 ± 15	265 ± 24	352 ± 26	462 ± 30
2,2 m	217 ± 13	265 ± 28	339 ± 16	478 ± 34
2,0 m	206 ± 14	219 ± 25	317 ± 34	449 ± 37
1,8 m	160 ± 19	202 ± 23	267 ± 23	393 ± 40
1,5 m	105 ± 19	122 ± 14	145 ± 18	259 ± 32
0,9 m	42 ± 10	29 ± 7	39 ± 13	53 ± 13
0,3 m	23 ± 2	23 ± 3	28 ± 8	46 ± 4

Over het algemeen is de spreiding 10-12% van de meetwaarde, wat wil zeggen dat de condities goed reproduceerbaar zijn. De grafieken van de startcondities zijn te vinden in bijlage 4.

## 2.2 Invloed van rookgaskoeling op temperatuur en energie

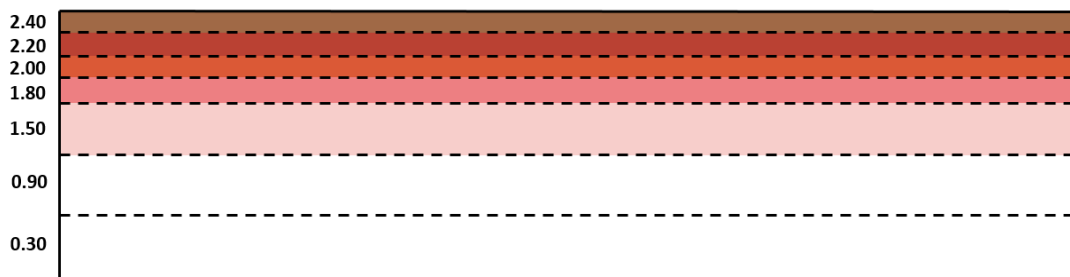
In deze paragraaf staat beschreven welke invloed de rookgaskoeling heeft op de temperatuur (lokaal effect) en de aanwezige energie (warme en koude zone over de gehele gang). Daarnaast komt de reikwijdte van de rookgaskoeling aan bod, waarbij is gekeken hoe ver de rookgassen vóór de inzetploeg worden gekoeld en of de rookgassen achter de inzetploeg na de toepassing van rookgaskoeling in temperatuur toe- of afnemen.

### 2.2.1 Temperatuur versus hoogte

Hoewel de condities zo reproduceerbaar mogelijk zijn opgebouwd (zie paragraaf 1.8.1), start elk experiment niet met exact dezelfde temperaturen. Daarom is gekeken naar de temperatuurverandering per hoogte tussen de start van de inzet en het bereiken van de brandruimte. De temperatuurtoe- of afname is gemiddeld over alle meetlocaties. Hierdoor ontstaat er een gemiddelde temperatuurverandering per hoogte voor elk blussysteem en elke inzetmethode.

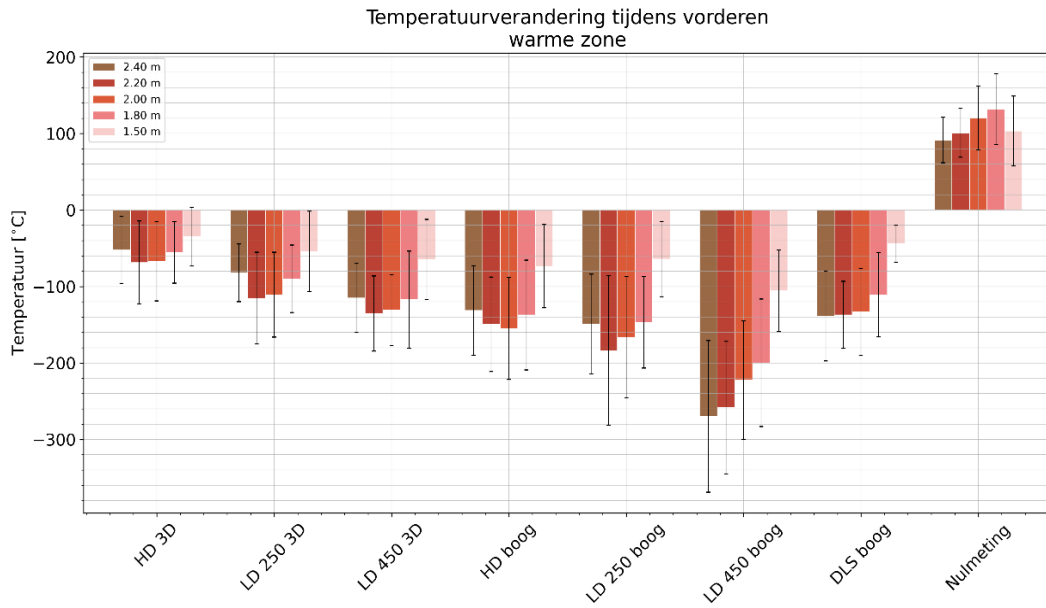
#### Warme zone

Voor de warme zone is gekeken naar de temperaturen tussen het plafond van de gang en een hoogte van 1,5 m (figuur 2.1, gekleurde delen).

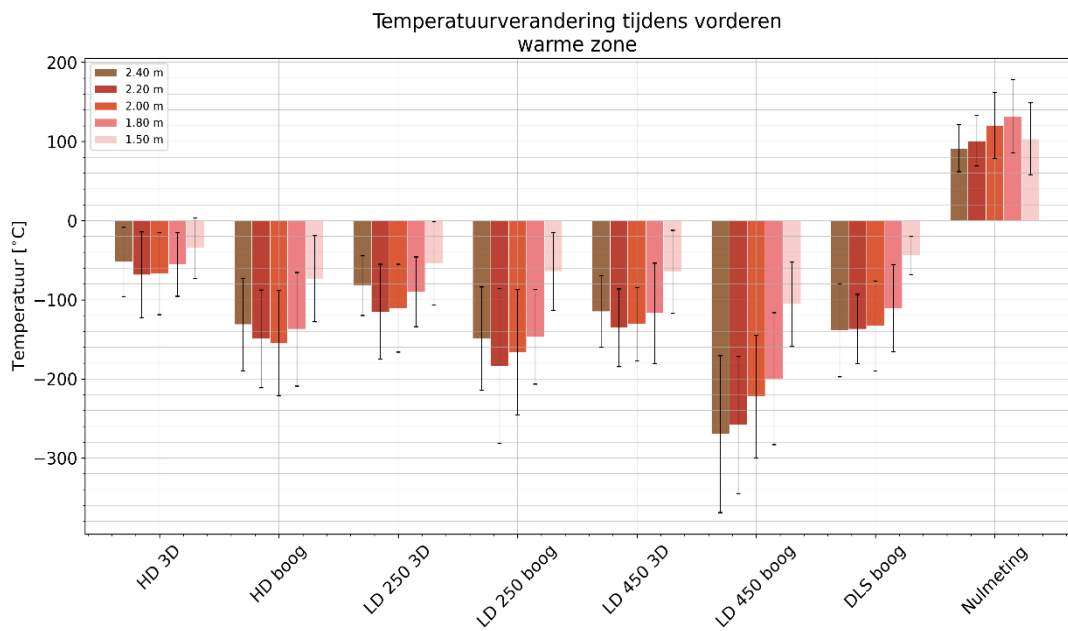


**Figuur 2.1** Verdeling van de warme zone over gelijke hoogtes (gekleurde delen)

De resultaten van de temperatuurverandering zijn opgenomen in figuur 2.2 figuur 2.3 en tabel 2.2. De figuren verschillen alleen in de volgorde van blussysteem en methode, zodat ze visueel makkelijker met elkaar te vergelijken zijn. In beide grafieken en in de tabel is tevens een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis van de metingen van alle meetlocaties van de twee experimenten per blussysteem. In de grafieken zijn ook de nulmetingen opgenomen, zodat duidelijk is wat er gebeurt als er geen inzet plaatsvindt. In bijlage 5 en 6 zijn de grafieken opgenomen per nulmeting en blussysteem of inzetmethode.



**Figuur 2.2** Temperatuurverandering per blussysteem en methode in de warme zone, gegroepeerd per inzetmethode



**Figuur 2.3** Temperatuurverandering per blussysteem en methode in de warme zone, gegroepeerd per blussysteem

**Tabel 2.2 Temperatuurverandering per blussysteem per meethoogte**

Blussysteem	Temp (2,4 m) [°C]	Temp (2,2 m) [°C]	Temp (2,0 m) [°C]	Temp (1,8 m) [°C]	Temp (1,5 m) [°C]
HD 3D-pulsmethode	-52 ± 44	-68 ± 54	-67 ± 52	-55 ± 40	-35 ± 38
HD boogmethode	-131 ± 59	-149 ± 62	-155 ± 67	-137 ± 72	-73 ± 55
LD 250 3D-pulsmethode	-82 ± 38	-115 ± 60	-111 ± 55	-90 ± 44	-54 ± 53
LD 250 boogmethode	-149 ± 65	-184 ± 98	-166 ± 79	-147 ± 60	-64 ± 49
LD 450 3D-pulsmethode	-115 ± 45	-136 ± 49	-131 ± 46	-117 ± 63	-65 ± 52
LD 450 boogmethode	-270 ± 99	-258 ± 87	-222 ± 77	-200 ± 83	-106 ± 53
DLS boogmethode	-139 ± 59	-137 ± 44	-133 ± 57	-111 ± 55	-44 ± 24
Nulmeting	92 ± 30	101 ± 32	120 ± 42	132 ± 46	103 ± 46

### Analyse warme zone

Voor alle experimenten geldt dat de temperatuurverandering in de warme zone negatief is gedurende de inzet. Dit wil zeggen dat de warme zone bij alle inzetten gekoeld wordt. Zoals verwacht, is de temperatuurverandering bij de nulmeting positief en neemt de temperatuur in de warme zone dus toe zonder inzet. De temperatuurverandering op 2,4 m is in de meeste gevallen lager dan voor 2,2 m. Aan het plafond is de stromingssnelheid lager, doordat daar sprake is van wervelingen. Daarnaast kan de afscherming van de thermokoppels een rol spelen. De kokers kunnen de stroming of wervels afremmen of beïnvloeden. Aan het plafond wordt ook warmte afgegeven aan de constructie, waardoor de temperatuur en daarmee ook de temperatuurverandering daar lager is. In figuur 2.2 is te zien dat met de boogmethode een grotere temperatuurafname wordt bereikt dan met de 3D-pulsmethode. Daarnaast wordt met een toenemend debiet ook een grotere afname gerealiseerd. Bij de boogmethode is de relatieve afname groter dan bij de 3D-methode.

Figuur 2.3 laat zien dat over het algemeen de temperatuurafname groter is bij een hoger debiet. Zo wordt voor de 3D-pulsmethode met LD 250 een grotere temperatuurafname bereikt dan met HD, maar is de temperatuurafname voor LD 450 niet veel groter dan voor LD 250. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn:

- > Hoewel er meer water wordt gebruikt, wordt er niet of nauwelijks meer water verdampt door verzadiging.
- > De pulsen zijn niet altijd evenwijdig aan de gang gegeven.
- > Een combinatie van voorgaande punten.

De resultaten met DLS zijn vergelijkbaar met HD met de boogmethode. De grootste temperatuurafname is gemeten bij de inzetten met de LD 450 en boogmethode.

In tabel 2.2 op de vorige pagina zijn de resultaten van figuur 2.2 en figuur 2.3 kwantitatief weergegeven.

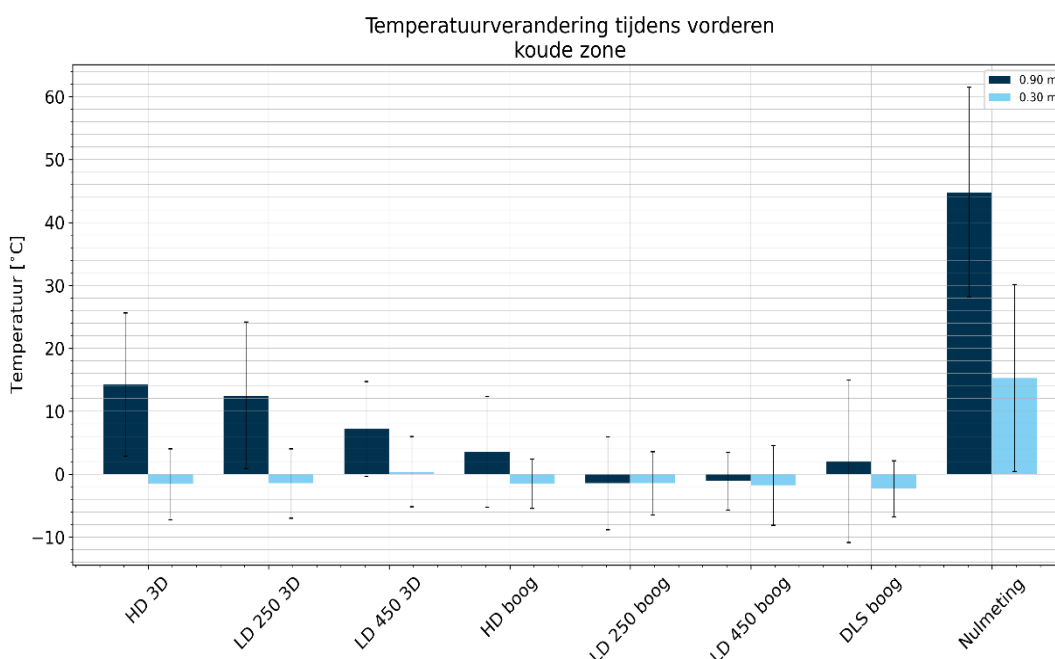
### Koude zone

Voor de koude zone is gekeken naar de temperaturen tussen de vloer en een hoogte van 0,9 m (figuur 2.4).

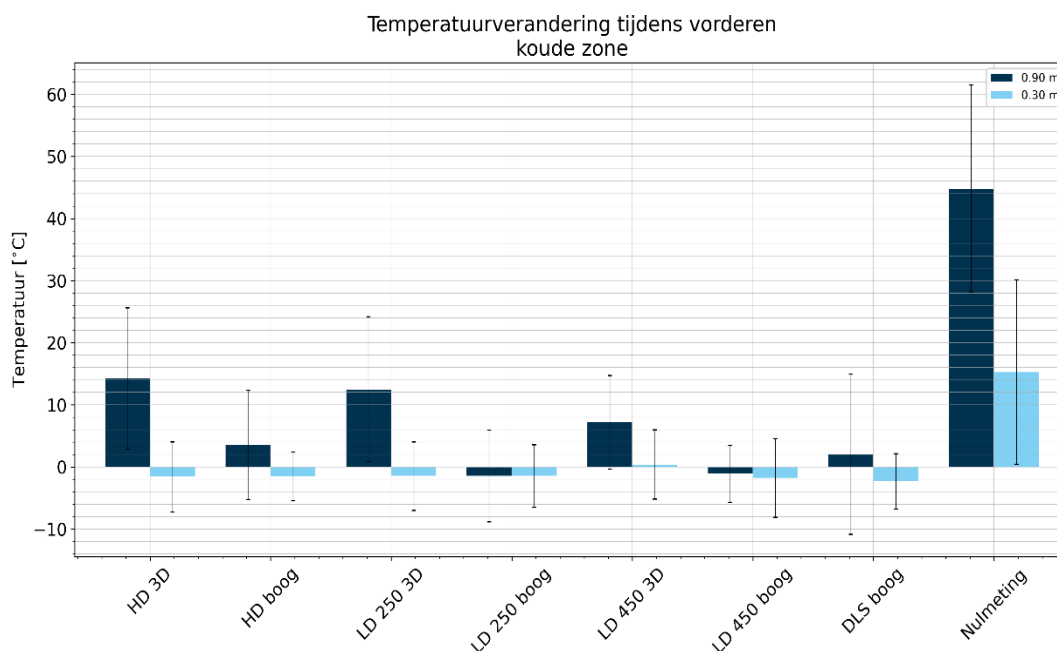


**Figuur 2.4** Verdeling van de koude zone over gelijke hoogtes

De resultaten van de temperatuurverandering zijn opgenomen in figuur 2.5, figuur 2.6 en tabel 2.3. De figuren verschillen alleen in de volgorde van blussysteem en methode, zodat ze visueel makkelijker met elkaar te vergelijken zijn. In beide grafieken en in tabel 2.3 is tevens een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis de metingen van alle meetlocaties van de twee experimenten per blussysteem.



**Figuur 2.5** Temperatuurverandering per blussysteem en inzetmethode in de koude zone, gegroepeerd per inzetmethode



**Figuur 2.6** Temperatuurverandering per blussysteem en inzetmethode in de koude zone, gegroepeerd per blussysteem

**Tabel 2.3** Temperatuurverandering per blussysteem per meethoogte

Blussysteem	Temp (0,9 m) [°C]	Temp (0,3 m) [°C]
HD 3D-pulsmethode	14 ± 11	-2 ± 6
HD boogmethode	4 ± 9	-2 ± 4
LD 250 3D-pulsmethode	13 ± 12	-1 ± 6
LD 250 boogmethode	-1 ± 7	-1 ± 5
LD 450 3D-pulsmethode	7 ± 8	0 ± 6
LD 450 boogmethode	-1 ± 5	-2 ± 6
DLS boogmethode	2 ± 13	-2 ± 4
Nulmeting	45 ± 17	15 ± 15

### Analyse koude zone

Zoals in figuur 2.5 is te zien, zijn de temperatuurveranderingen in de koude zone veel kleiner dan die in de warme zone. Bij de nulmeting neemt de temperatuur in de koude zone toe met enkele tientallen graden. De temperatuurverandering op 0,3 m hoogte is maximaal een paar graden voor alle blussystemen. Op 0,9 m zijn de meeste temperatuurveranderingen positief, wat wil zeggen dat de temperatuur in de koude zone toeneemt tijdens de rookgaskoeling. De toename bij alle inzetten is echter lager dan de toename bij de nulmeting. Bij de 3D-pulsmethode neemt de temperatuur op 0,9 m hoogte meer toe dan bij de boogmethode. Bij de boogmethode is niet of nauwelijks sprake van een temperatuurtoename in de koude



zone. Voor LD 250 en LD 450 daalt de temperatuur op 0,9 m hoogte met de boogmethode zelfs een paar graden.

In figuur 2.6 is te zien dat de temperatuurtoename op 0,9 m hoogte kleiner wordt naarmate het debiet hoger wordt bij de 3D-pulsmethode. Met de boogmethode is er een minimale toename voor HD, maar die slaat om in een minimale afname bij een hoger debiet. De LD 250 en LD 450 boogmethode hebben het minste effect op de koude zone. Er was in zeer beperkte mate sprake van temperatuurafname van de koude zone.

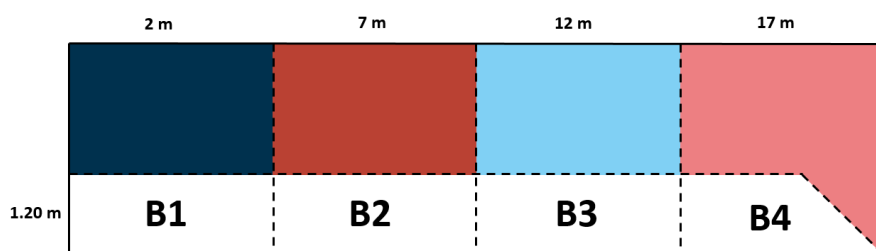
In tabel 2.3 zijn de resultaten van figuur 2.5 en figuur 2.6 kwantitatief weergegeven.

## 2.2.2 Energieafname

Om de energieafname als gevolg van rookgaskoeling te bepalen, is gekeken naar de energie-inhoud per zone. Dit zijn de segmenten B1 tot en met B4 zoals aangegeven in figuur 1.14 in paragraaf 1.7. Net als bij de temperatuur is gekeken naar de energieverandering tussen de start van de inzet en het bereiken van de brandruimte. De energieverandering is gemiddeld over alle segmenten van de gang en over beide experimenten.

### Warme zone

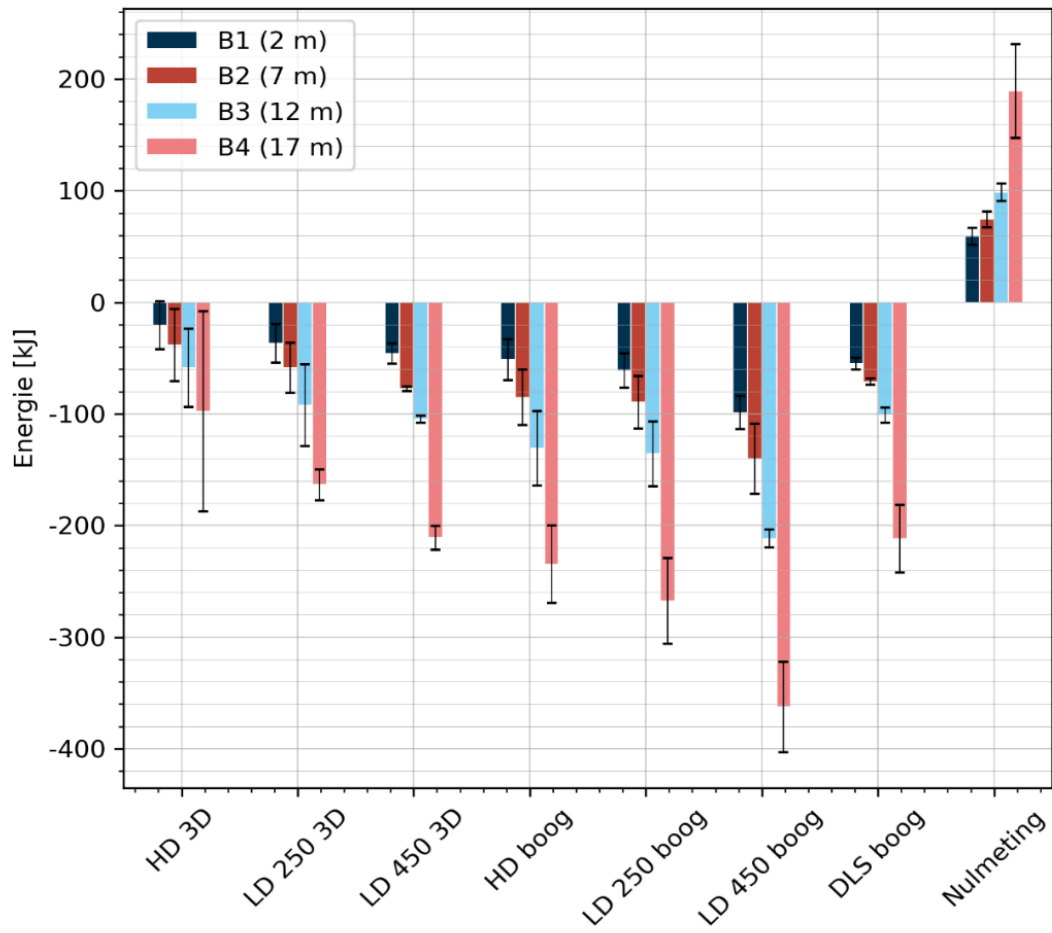
Voor de warme zone is per segment gekeken naar de energie-inhoud boven de 1,2 m (figuur 2.7).



Figuur 2.7 Verdeling van de warme zone per meetlocatie

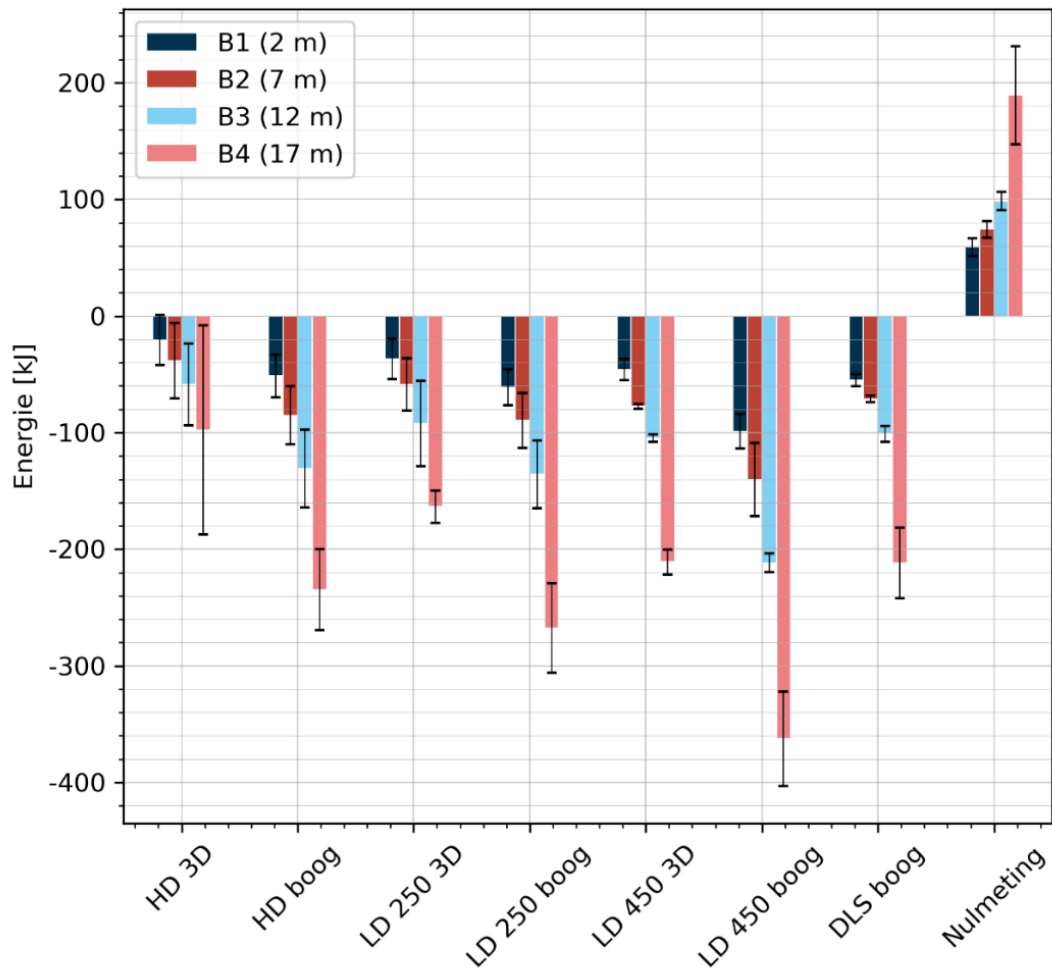
De gemiddelde energieverandering voor elk blussysteem is weergegeven in figuur 2.8, figuur 2.9 en tabel 2.4. De figuren verschillen alleen in de volgorde van blussysteem en inzetmethode, zodat ze visueel makkelijker met elkaar te vergelijken zijn. De hoogte van de staven geeft de energieafname en dus de effectiviteit weer. In beide grafieken en de tabel is tevens een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis de metingen van alle thermokoppels in een segment en van de twee experimenten per blussysteem.

### Energieverandering tijdens vorderen warme zone



Figuur 2.8 Energieverandering per blussysteem en inzetmethode in de warme zone, gegroepeerd per inzetmethode

## Energieverandering tijdens vorderen warme zone



Figuur 2.9 Energieverandering per blussysteem en inzetmethode in de warme zone, gegroepeerd per blussysteem

**Tabel 2.4 Energieverandering per blussysteem per meetlocatie**

Blussysteem	B1 (2 m) [kJ]	B2 (7 m) [kJ]	B3 (12 m) [kJ]	B4 (17 m) [kJ]
HD 3D-pulsmethode	-21 ± 21	-38 ± 32	-59 ± 35	-98 ± 90
HD boogmethode	-51 ± 18	-85 ± 25	-131 ± 33	-235 ± 35
LD 250 3D-pulsmethode	-37 ± 17	-59 ± 22	-92 ± 37	-163 ± 14
LD 250 boogmethode	-61 ± 15	-90 ± 24	-136 ± 29	-268 ± 38
LD 450 3D-pulsmethode	-46 ± 9	-78 ± 2	-105 ± 3	-211 ± 11
LD 450 boogmethode	-99 ± 15	-140 ± 31	-212 ± 8	-363 ± 41
DLS boogmethode	-55 ± 5	-71 ± 3	-101 ± 7	-212 ± 30
Nulmeting	59 ± 8	74 ± 7	98 ± 8	189 ± 42

### Analyse warme zone

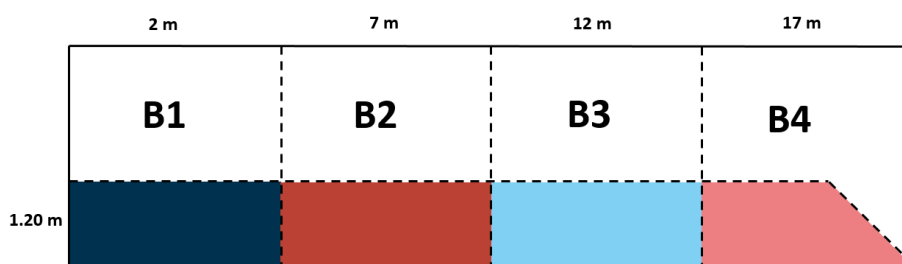
Voor alle inzetten geldt dat de energie in de warme zone in alle segmenten afneemt gedurende de inzet, in tegenstelling tot de nulmeting, waarbij de energie in alle segmenten toeneemt (figuur 2.8). In de warme zone geldt over het algemeen dat de energieafname verder in de gang groter wordt. Hier is de temperatuur ook hoger en kan er dus meer energie opgenomen worden door het water. Procentueel is er ook meer energieafname verder in de gang. De energieafname in de warme zone is met de boogmethode groter dan 3D-pulsmethode in alle segmenten van de gang. Verder valt op dat de spreiding (SD) afneemt naarmate het debiet toeneemt

De energieafname in de warme zone is groter naarmate het debiet groter wordt, zoals te zien in figuur 2.9. Zo wordt voor zowel de 3D-pulsmethode als de boogmethode een grotere energieafname bereikt voor opeenvolgend de HD, LD 250 en LD 450-blussystemen. De grootste energieafname werd bereikt bij de inzetten met de LD 450 en boogmethode. De resultaten met DLS zijn vergelijkbaar met HD met de boogmethode.

In tabel 2.4 zijn de resultaten van figuur 2.8 en figuur 2.9 kwantitatief weergegeven.

## Koude zone

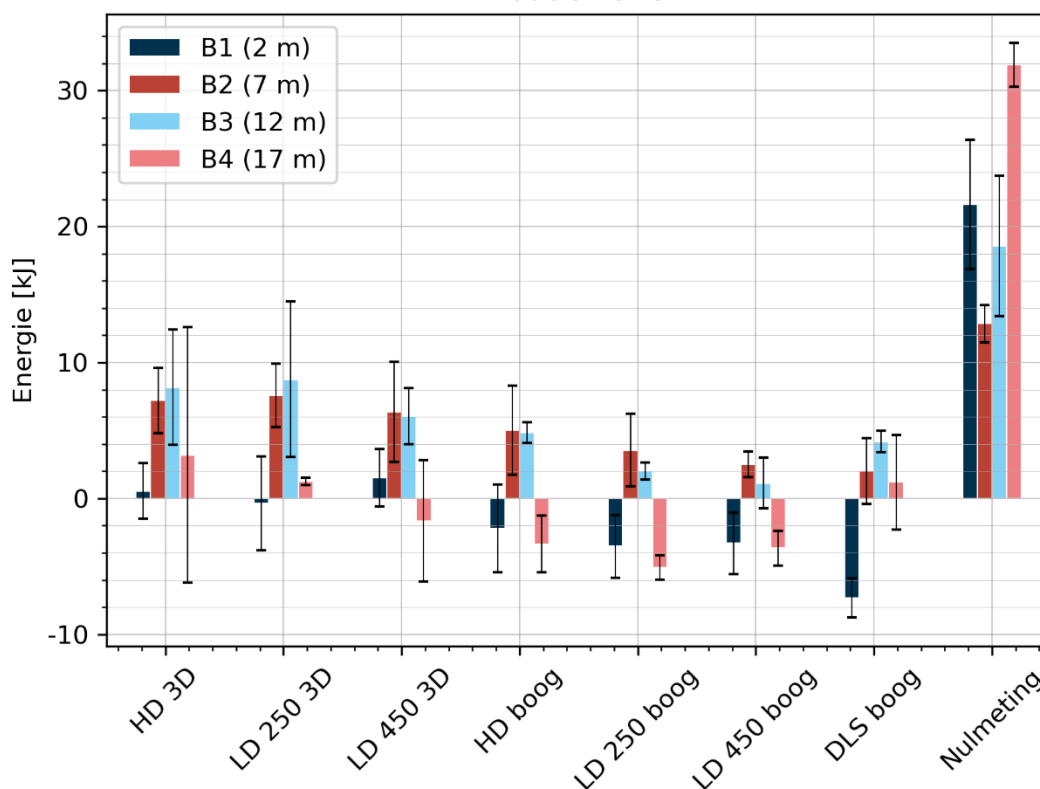
Voor de koude zone is per segment gekeken naar de energie-inhoud tussen de grond en een hoogte van 1,2 m (figuur 2.10).



Figuur 2.10 Verdeling van de koude zone per meetlocatie

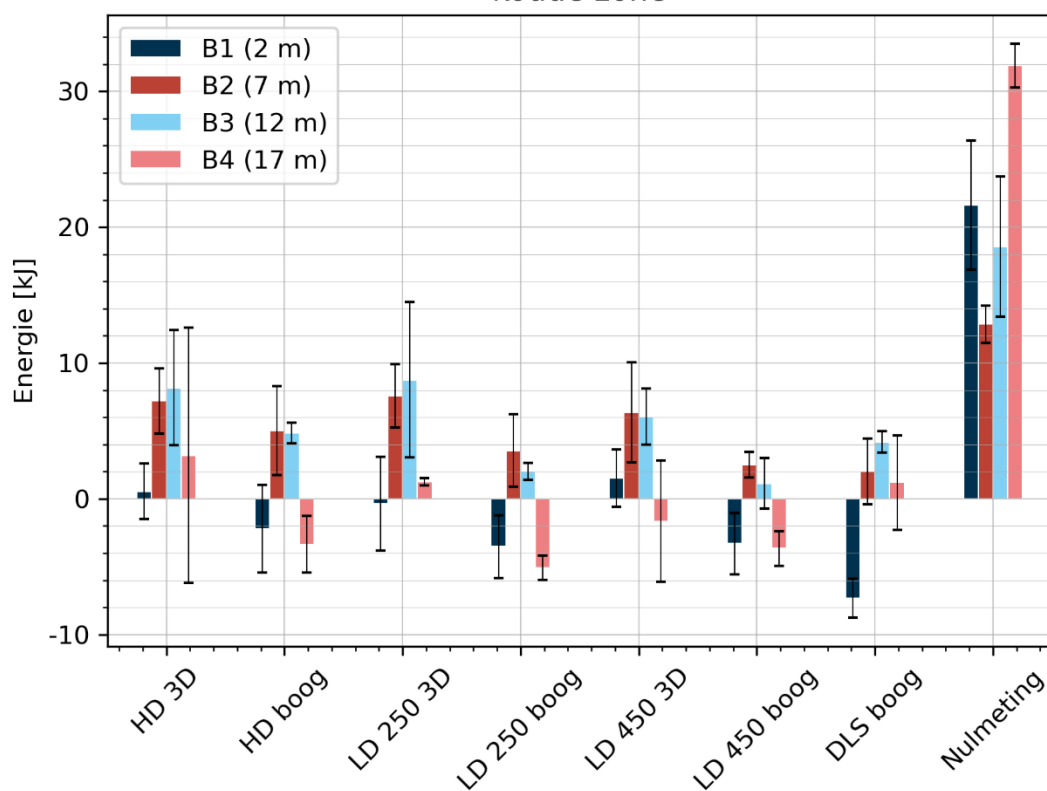
De gemiddelde energieverandering voor elk blussysteem is weergegeven in figuur 2.11, figuur 2.12 en tabel 2.5. De figuren verschillen alleen in de volgorde van blussystemen en inzetmethodes, zodat ze visueel makkelijker met elkaar te vergelijken zijn. De hoogte van de staven geeft de energieafname en dus de effectiviteit weer. In beide grafieken en de tabel is tevens een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis de metingen van alle thermokoppels in een segment en van de twee experimenten per blussysteem.

## Energieverandering tijdens vorderen koude zone



Figuur 2.11 Energieverandering in koude zone tijdens vorderen per blussysteem en inzetmethode, gegroepeerd per inzetmethode

## Energieverandering tijdens vorderen koude zone



Figuur 2.12 Energieverandering in koude zone tijdens vorderen per blussysteem en inzetmethode, gegroepeerd per blussysteem

Tabel 2.5 Energieverandering per blussysteem per meetlocatie

Blussysteem	B1 (2 m) [kJ]	B2 (7 m) [kJ]	B3 (12 m) [kJ]	B4 (17 m) [kJ]
HD 3D-pulsmethode	1 ± 2	7 ± 2	8 ± 4	3 ± 9
HD boogmethode	-2 ± 3	5 ± 3	5 ± 1	-3 ± 2
LD 250 3D-pulsmethode	0 ± 3	8 ± 2	9 ± 6	1 ± 0
LD 250 boogmethode	-4 ± 2	4 ± 3	2 ± 1	-5 ± 1
LD 450 3D-pulsmethode	2 ± 2	6 ± 4	6 ± 2	-2 ± 4
LD 450 boogmethode	-3 ± 2	2 ± 1	1 ± 2	-4 ± 1
DLS boogmethode	-7 ± 1	2 ± 2	4 ± 1	1 ± 3
Nulmeting	22 ± 5	13 ± 1	19 ± 5	32 ± 2

## Analyse koude zone

Zoals figuur 2.11 laat zien neemt ook in de koude zone de energie in alle segmenten toe bij de nulmeting, maar wel veel minder dan in de warme zone. Bij gebruik van blussystemen neemt ook de energie in de koude zone toe in het midden van de gang (segmenten B2 en B3). Dit kan het gevolg zijn van wervelingen tussen de warme en koude zone tijdens de inzet (door het opmengen van de rooklaag). De energietoename in het midden van de gang is bij de 3D-pulsmethode iets groter dan bij de boogmethode. De verschillen zijn echter dusdanig klein dat er niet met zekerheid kan worden gesproken over een significant verschil. Aan het begin en eind van de gang worden (segmenten B1 en B4) energieafnames bereikt met de boogmethode, maar niet of nauwelijks met de 3D-pulsmethode. De standaarddeviaties zijn, met uitzondering van die van de nulmeting, zó groot in verhouding tot de meetwaarden (soms >100%), dat niet met zekerheid gesproken kan worden over energie toe- of afnames in de koude zone. Dit is met name het geval voor de 3D-methode, wat aantoont dat deze methode tot minder eenduidige resultaten leidt dan de boogmethode. Bij DLS wordt bij de ingang wel een duidelijke afname in energie bereikt, maar verder in de gang is dit effect verwaarloosbaar.

Figuur 2.12 laat zien dat de energieafnames aan het begin en eind van de gang niet erg afhankelijk lijken van het debiet, maar dat de energietoenames in het midden van de gang wel afnemen met een hoger debiet, zowel bij de 3D-pulsmethode als de boogmethode. In tabel 2.5 zijn de resultaten kwantitatief weergegeven. Een negatief gemiddelde betekent een afname van energie in de koude zone; voor een positief gemiddelde geldt het tegenovergestelde.

### 2.2.3 Voorwaartse en achterwaartse koeling

Per blussysteem en methode is gekeken hoe ver de rookgassen voor de inzetploeg uit worden gekoeld. Daarbij is ook gekeken of de rookgassen achter de inzetploeg na de koeling in temperatuur toe- of afnemen. De nadruk wordt hier gelegd op de reikwijdte, niet de hoogte van de afname. In tabel 2.6 is een overzicht gegeven van de beoordeling per blussysteem. De afstanden zijn bepaald op basis van de meetlocaties en de momenten dat de ploeg een drempel bereikte, en zijn derhalve slechts benaderingen. Zie bijlage 7 voor een verdere uitwerking. De afstanden zijn bepaald in veelvoud van 3 m (de afstand tussen de drempels), met uitzondering van de zevende drempel die ligt op 17 meter vanaf de deuropening.

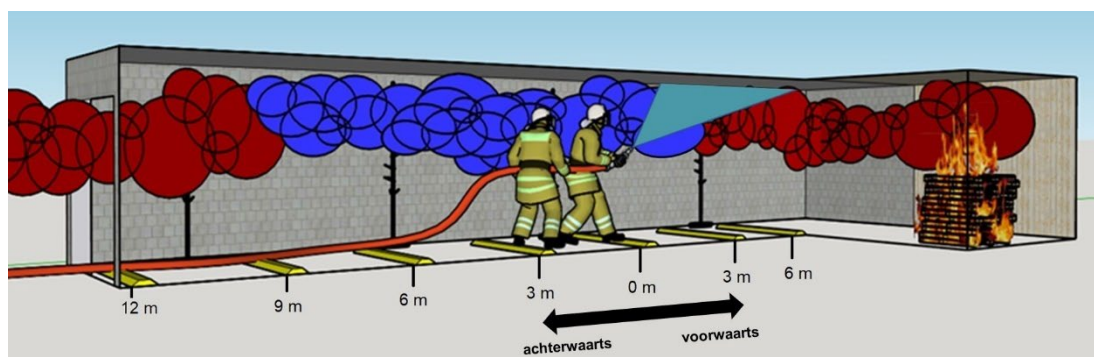
Tabel 2.6 Reikwijdte van rookgaskoeling voor en achter de inzetploeg

Blussysteem	Voorwaartse koeling*	Achterwaartse koeling*
HD 3D-pulsmethode	3 m	9 m
HD boogmethode	9 m	> 17 m
LD 250 3D-pulsmethode	6 m	> 17 m
LD 250 boogmethode	9 m	> 17 m
LD 450 3D-pulsmethode	6 m	9 m
LD 450 boogmethode	15 m	> 17 m

DLS boogmethode	15 m	> 17 m
-----------------	------	--------

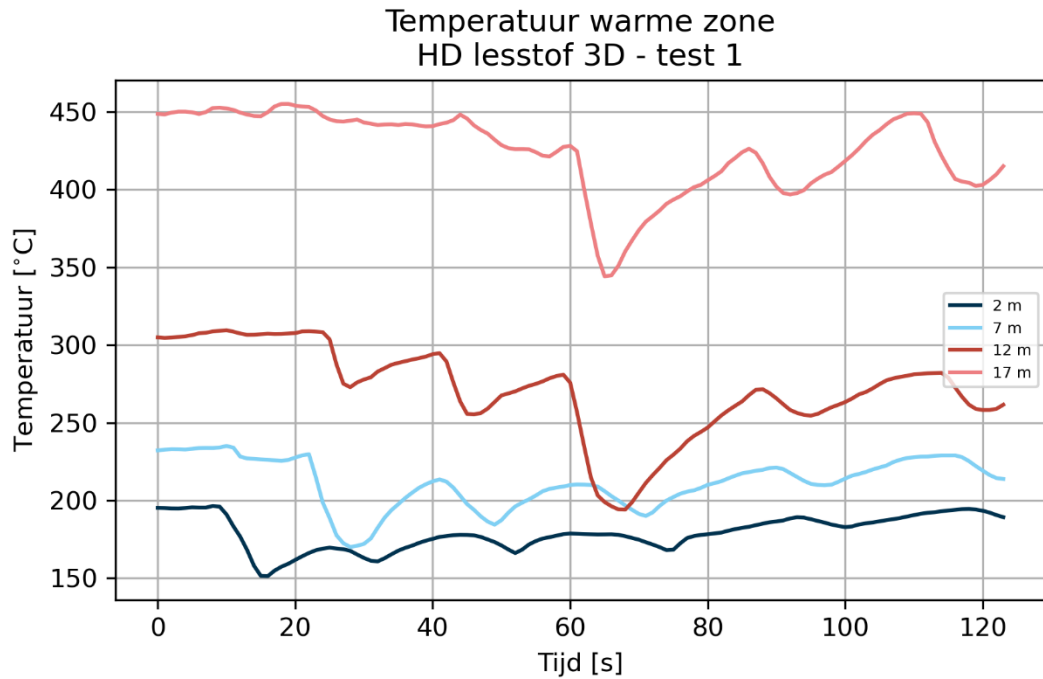
*\*alle afstanden zijn een benadering*

Ter verduidelijking is de reikwijdte van de rookgaskoeling tijdens de inzetten met HD voor zowel de 3D-pulsmethode als de boogmethode hieronder uitgewerkt in twee afbeeldingen (zie figuur 2.13 en 2.15) en twee grafieken (figuur 2.14 en figuur 2.16). Bij de HD-inzet met de 3D-pulsmethode is te zien dat de rookgassen tot ongeveer 3 meter voor de inzetploeg worden gekoeld. De rookgassen blijven tot ongeveer 9 meter achter de inzetploeg gekoeld. Verder naar achteren nemen de rookgassen weer toe in temperatuur. Dit is ook te zien in Figuur 2.14, waar de temperatuur een 'zaagtand'-patroon vertoont. De hete rookgassen zijn weergegeven in rood; de rookgassen die voor de inzetploeg gekoeld worden en achter de inzetploeg gekoeld blijven, zijn met blauw aangegeven. De grafieken tonen vanaf de start van de inzet tot het bereiken van het einde van de gang de temperatuur van de warme zone op alle vier de meetlocaties.



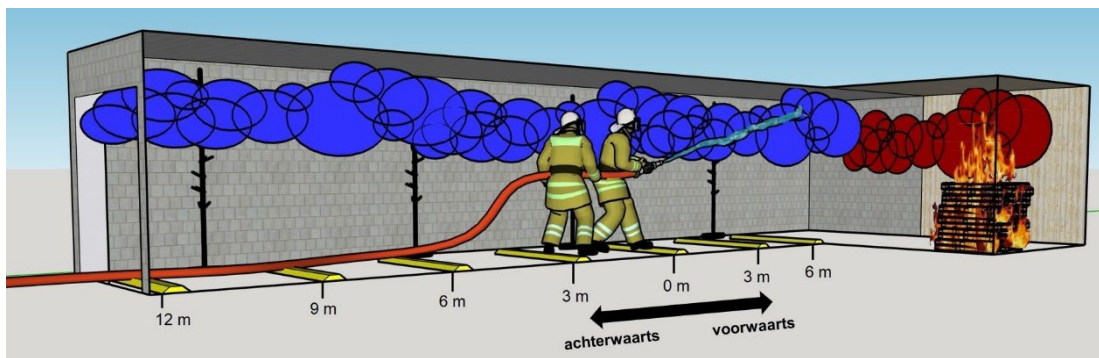
**Figuur 2.13 Rookgaskoeling voor en achter de inzetploeg bij een HD-inzet met 3D-pulsmethode**



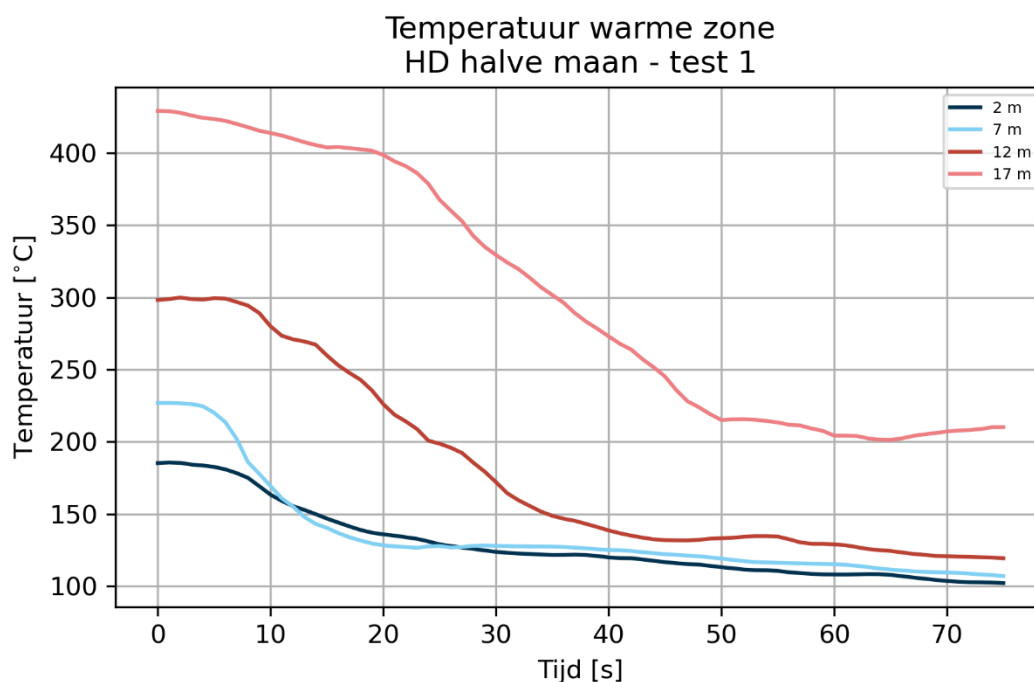


**Figuur 2.14** Temperatuur warme zone tijdens het vorderen op verschillende afstanden in de gang

Tijdens de inzet met HD volgens de boogmethode worden de rookgassen tot ongeveer 9 meter voor de inzetploeg gekoeld. Achter de inzetploeg blijven de rookgassen in de rest van de gang koel en nemen niet meer in temperatuur toe.



**Figuur 2.15** Rookgaskoeling voor en achter de inzetploeg bij een HD-inzet met boogmethode



**Figuur 2.16** Temperatuur warme zone tijdens het vorderen op verschillende afstanden in de gang

### Analyse

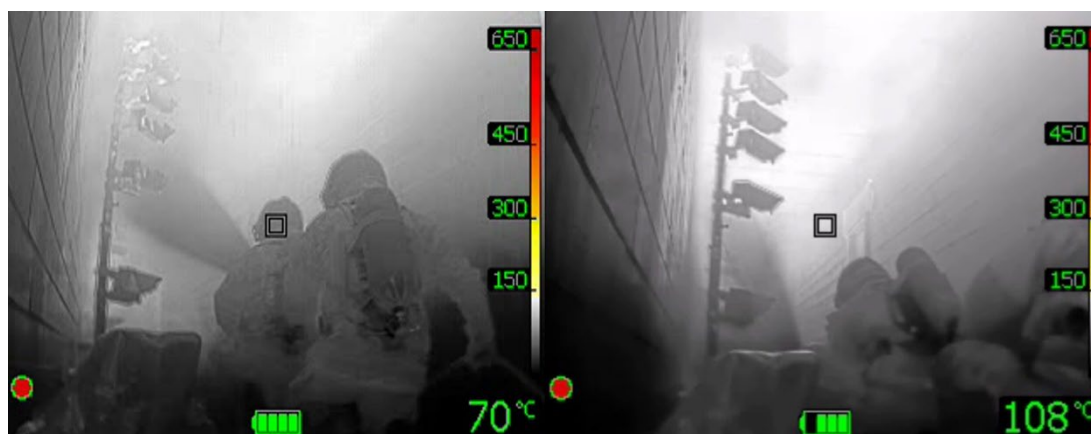
Uit de analyse van de voorwaartse en achterwaartse koeling komt naar voren dat bij de boogmethode de temperatuur achter de ploeg consistent het laagst blijft bij alle debieten, terwijl bij de 3D-pulsmethode de temperatuur achter de ploeg in sommige gevallen weer oploopt, zoals al eerder geconstateerd in paragraaf 2.2.2 aan de hand van de energieafname. De boogmethode bereikt ook een verdere voorwaartse koeling dan de 3D-pulsmethode voor alle debieten. Het koelende effect van de 3D-pulsmethode is tijdelijk omdat tussen de pulsen door er aanvoer is van nieuwe hete rookgassen. Bij de boogmethode door de constante aanvoer van koelend vermogen worden de rookgassen ook voortdurend gekoeld. Dit is het beste zichtbaar bij HD, waarbij een laag debiet in combinatie met de 3D-pulsmethode tot een beperkte voorwaartse en achterwaartse koeling leidt. Opvallend is dat de mate van achterwaartse koeling van de LD 450 3D-pulsmethode gelijk is aan de HD 3D-pulsmethode. Uit de resultaten blijkt echter dat beide achterwaarts minder koelen dan de LD 250 3D-pulsmethode. De meest waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat hoewel LD 450 meer debiet en dus koelend vermogen heeft, de snelheid van vorderen lager is door tegendruk en gewicht van de slang. Hierdoor zit er meer tijd tussen de pulsen en kan de rooklaag zich weer opbouwen. Hoewel voor HD het koelend vermogen (per puls) lager is, is de snelheid van het vorderen hoger, waardoor de pulsen elkaar sneller opvolgen. Dat heeft in dit scenario geleid tot hetzelfde netto-effect. De LD 250 3D-pulsmethode heeft een betere combinatie van vordersnelheid en koelend vermogen, zodat de temperatuur achter de inzetploeg niet toeneemt.

### 2.2.4 Uitvoering

Bij de voorgaande resultaten is ook de standaarddeviatie van de in duplo uitgevoerde experimenten gegeven; deze waarde is een maat voor de spreiding van de resultaten. Met twee experimenten is de standaarddeviatie echter niet betrouwbaar genoeg om kwantita-

tieve uitspraken over te kunnen doen, maar het is wel opvallend dat de standaarddeviatie van de 3D-pulsmethode over het algemeen groter is dan voor de boogmethode. Dit wil zeggen dat met de boogmethode de resultaten consistentere zijn. Hoewel de experimenten zijn uitgevoerd door ervaren ploegen is de uitvoering van de 3D-pulsmethode complexer dan de boogmethode. De 3D-methode bestaat uit meerdere handelingen (zoals richten, de juiste hoek van richten en de duur van de pulsen bepalen, het stellen van de straalpijp) en is daardoor gevoeliger voor fouten. De straalpijpvoerder en de wijze waarop de techniek wordt uitgevoerd hebben daardoor in vergelijking met de boogmethode een relatief grote invloed op de effectiviteit van rookgaskoeling met de 3D-pulsmethode. Daarnaast wordt de standaarddeviatie kleiner naarmate het debiet hoger wordt. Een hoger debiet zorgt dus ook voor consistentere koeling en minder invloed van de uitvoering van de techniek, maar niet noodzakelijk voor een groter koelend effect. De effectiviteit van rookgaskoeling is dus het meest afhankelijk van de uitvoering bij de 3D-pulsmethode met lage debieten, en het minst afhankelijk van de uitvoering bij de boogmethode of de 3D-pulsmethode met hoge debieten.

Dat de uitvoering van de 3D-pulsmethode complexer is, wordt ondersteund door de analyse van de videobeelden. Op de beelden is te zien dat bij de uitvoering van de 3D-pulsmethode niet elke puls volledig evenwijdig aan de gang is gegeven. Hierdoor komt het enkele malen voor dat de puls voor een deel direct tegen de muur aan komt, zie figuur 2.17. Ook is er sprake van enige variatie in de duur van de pulsen.



**Figuur 2.17** Beelden van de warmtebeeldcamera waarop te zien is dat de puls tijdens de 3D-pulsmethode tegen de linker muur aan komt

De boogmethode is overigens ook niet altijd uitgevoerd volgens het protocol. Het protocol schrijft voor dat de muren tot vlak boven de grond moeten worden geraakt. Op de beelden van de experimenten is echter te zien dat enkele keren de boogbeweging niet is uitgevoerd tot vlak boven de grond, maar tot de helft van de hoogte van de muur. Ondanks de afwijkingen van de boogmethode, is er minder verschil in temperatuurdalingen te zien dan bij de afwijkingen van de 3D-pulsmethode. Dit komt waarschijnlijk doordat in deze experimentopstelling de warme laag tot 1,2 meter komt. De boogbeweging hoeft dus niet helemaal tot vlak boven de grond om warme rookgassen te koelen, aangezien er zich onder de 1,2 meter geen warme rookgassen bevinden. De invloed van uitvoering is dus minder groot voor de boogmethode.

### 2.2.5 Samenvatting

Uit de resultaten van de temperatuur versus hoogte en de energieafname blijkt dat de lokale temperatuurafname groter is bij de boogmethode dan bij de 3D-pulsmethode. De reikwijdte van de voorwaartse en achterwaartse koeling is voor de boogmethode ook groter dan voor de 3D-pulsmethode. In sommige gevallen neemt de temperatuur achter de inzetploeg toe met de 3D-pulsmethode, maar met de boogmethode blijft de temperatuur laag in alle (geteste) gevallen. Hoewel de 3D-pulsmethode als standaardmethode wordt aangeleerd, blijkt uit de filmbeelden dat de boogmethode eenvoudiger volgens protocol uit te voeren is dan de 3D-pulsmethode en minder afhankelijk is van de straalpijvoerder.

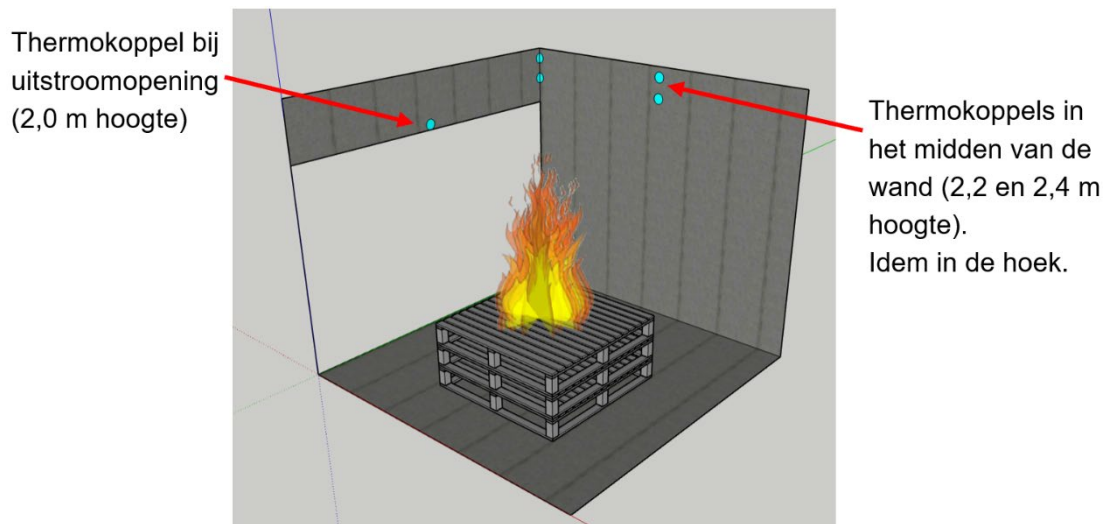
Verder blijkt dat bij alle inzetten de energie in de koude zone in het midden van de gang toeneemt, wat waarschijnlijk veroorzaakt wordt door opmenging. Deze toename is minder groot voor de boogmethode dan de 3D-pulsmethode. Daarnaast is bij de boogmethode te zien dat in de koude zone aan het begin en eind van de gang de energie afneemt, terwijl bij de 3D-pulsmethode de energie tijdens vrijwel alle testen toeneemt.

In de koude zone hebben alle technieken een minimaal effect op de temperatuur op 0,3 m hoogte over de gehele lengte van de gang, maar op 0,9 m hoogte zijn er wel toenames in de temperatuur te zien, voornamelijk bij de 3D-pulsmethode. Het geringste effect op de temperatuur werd bereikt met de LD 250 en LD 450-boogmethode, wat betekent dat de temperatuurcondities voor een eventueel slachtoffer op deze locatie niet verbeteren of verslechteren.

Met de boogmethode wordt dus meer en consistentere gekoeld dan met de 3D-pulsmethode, zowel over de lengte als de hoogte van de gang. Ook zorgt een hoger debiet voor consistentere resultaten en minder invloed van de uitvoering van de techniek. De effectiviteit van rookgaskoeling is het meest afhankelijk van de uitvoering met de 3D-pulsmethode in combinatie met lage debieten, en het minst bij de boogmethode in combinatie met hoge debieten. De meeste koeling en energieafname wordt bereikt met de combinatie van de boogmethode en het hoogste debiet, LD 450.

## 2.3 Invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard

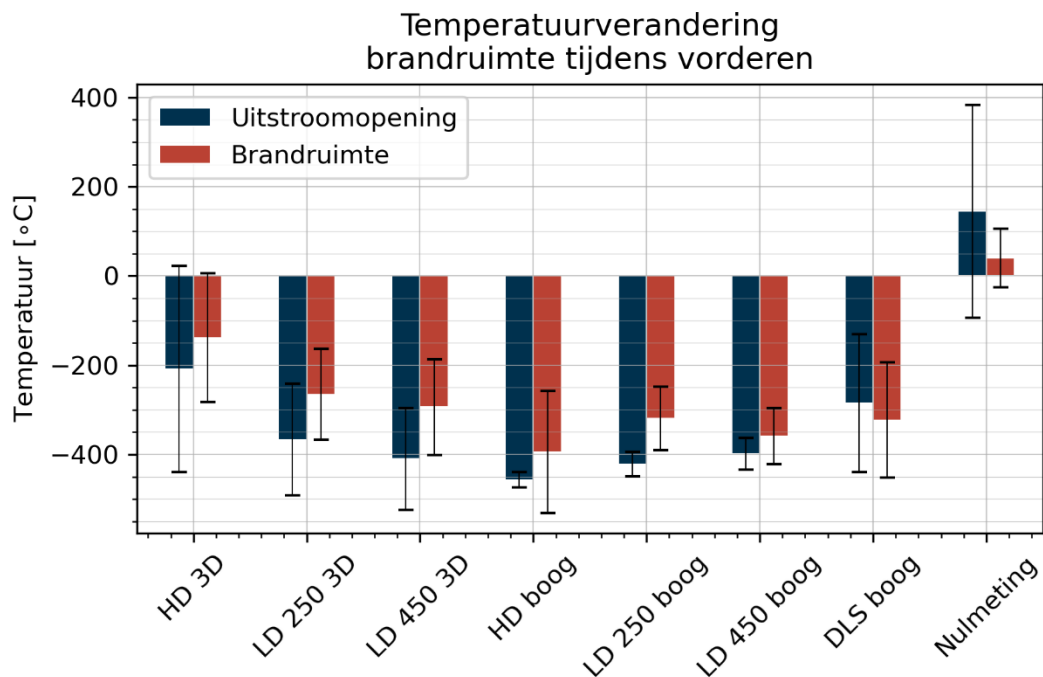
Om de invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard te bepalen is gekeken naar de temperatuurverandering in de brandruimte tussen de start van de inzet en het bereiken van het einde van de gang. Hierbij is het afblussen dus niet meegenomen. Figuur 2.18 toont een schematische weergave van de opstelling van de vuurhaard in de brandruimte.



**Figuur 2.148** Schematische weergave van de opstelling van de vuurhaard in de brandruimte

### 2.3.1 Temperatuurverandering brandruimte

Figuur 2.19 toont de temperatuurverandering in de brandruimte tijdens het vorderen. Hierbij zijn de vier thermokoppels aan de wand gemiddeld. Een negatief getal is een netto daling in temperatuur.



**Figuur 2.19** Temperatuurverandering in de brandruimte tijdens het vorderen per blussysteem en inzetmethode

**Tabel 2.7 Temperatuurverandering per blussysteem per meetlocatie**

Blussysteem	Uitstroomopening [°C]	Brandruimte [°C]
HD 3D-pulsmethode	-208 ± 231	-138 ± 144
LD 250 3D-pulsmethode	-367 ± 125	-266 ± 102
LD 450 3D-pulsmethode	-410 ± 114	-294 ± 108
HD boogmethode	-457 ± 17	-394 ± 137
LD 250 boogmethode	-421 ± 27	-320 ± 71
LD 450 boogmethode	-399 ± 35	-359 ± 63
DLS boogmethode	-286 ± 154	-323 ± 129
Nulmeting	145 ± 239	41 ± 65

### Analyse

Bij alle experimenten daalt de temperatuur bij de uitstroomopening en in de brandruimte tijdens het vorderen ten opzichte van de nulmeting. Bij de boogmethode is in het algemeen een grotere temperatuurdaling te zien dan bij de 3D-methode. Bij de 3D-methode wordt de daling groter naarmate het debiet hoger wordt, terwijl bij de boogmethoden de daling minder afhankelijk is van het debiet. De grootste temperatuurdaling wordt bereikt met de HD boogmethode, waarschijnlijk omdat met deze methode snel gevorderd kan worden en toch voldoende koelend vermogen levert.

De standaarddeviaties voor de boogmethode zijn kleiner dan voor de 3D-pulsmethode, wat wil zeggen dat de resultaten van de boogmethode consistentere zijn dan van de 3D-pulsmethode. Het effect op de vuurhaard is afhankelijk van meerdere factoren, zoals de stromingsprofielen ten tijde van het experiment, de techniek van de straalpijpvorder en atmosferische omstandigheden.

In tabel 2.7 zijn de resultaten van de temperatuurverandering in de brandruimte kwantitatief weergegeven. Een negatief gemiddelde betekent een afname van temperatuur en een positief gemiddelde een toename van temperatuur.

### 2.3.2 Samenvatting

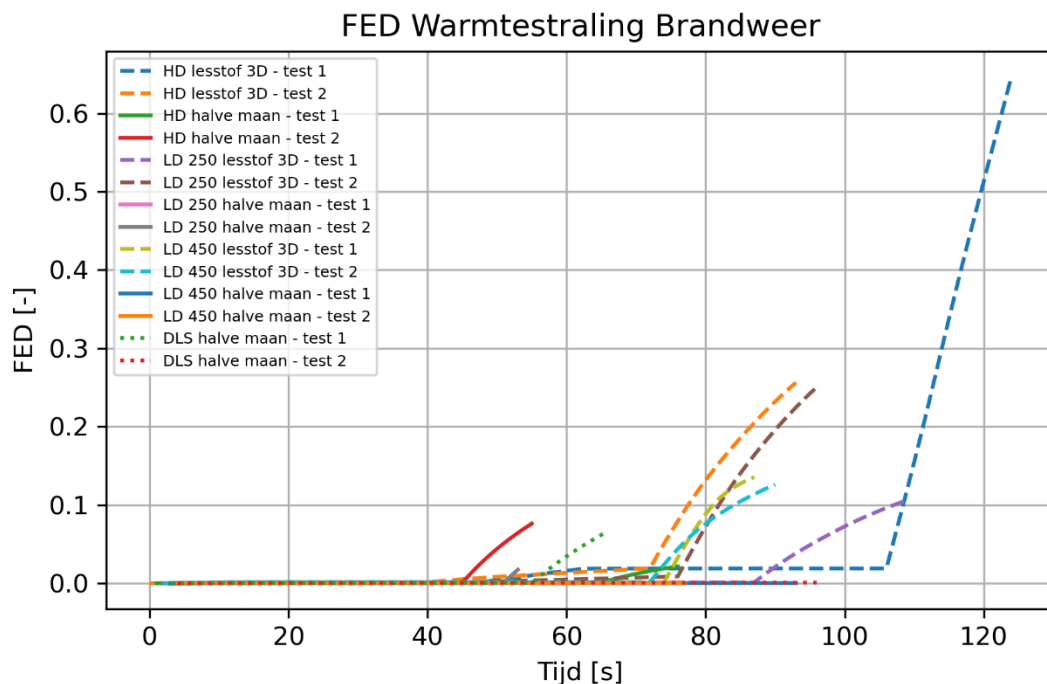
Alle technieken zorgen voor koeling van de vuurhaard tijdens het vorderen ten opzichte van de nulmeting. Met de boogmethode wordt meer koeling bereikt dan met de 3D-methode. Bij de 3D-methode neemt de koeling toe naarmate het debiet toeneemt. De boogmethode geeft het beste resultaat met HD, wat waarschijnlijk verklaard kan worden doordat met HD snel door de gang gevorderd kan worden.

## 2.4 Invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van brandweerpersoneel en slachtoffers

Deze paragraaf gaat in op de invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van brandweerpersoneel en slachtoffers die zich in het gebouw bevinden. Naast temperatuur zijn ook straling en gasconcentraties gemeten om een beeld te krijgen van de omstandigheden in de gang tijdens rookgaskoeling.

### 2.4.1 Brandweer

In Figuur 2.20 is te zien wat de blootstelling aan warmtestraling (dosis) is tijdens het vorderen per experiment. De horizontale as toont de tijd na de start van de inzet in seconden. Bij alle experimenten blijft de FED ruim onder de grenswaarde (1,0). De grootste stijging van de FED vindt plaats tegen het einde van de gang, als de ploeg de vuurhaard nadert.



Figuur 2.20 Cumulatieve straling over de tijd tijdens inzet

### Subjectieve beleving thermoregulatie, discomfort en inspanning

Voor een eerste verkenning van de subjectieve beleving hebben de straalpijpvoerder en de nummer 2 na elke inzet een korte vragenlijst ingevuld over warmtebeleving en eventuele pijnsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning. De vragenlijst bestond uit vijf vragen waarbij een score gegeven moest worden en twee open vragen. De antwoorden op de scorevragen zijn te vinden in tabel 2.8.

**Tabel 2.8 Scores subjectieve beleving thermoregulatie, pijn en inspanning**

Blussysteem	Thermische sensatie	Thermische comfort	Huidvochtigheid	Pijnsensatie	Ervaren inspanning
HD 3D-pulsmethode	Niet warm, niet koud	Neutraal	Licht vochtig	Geen pijn	Extreem licht
HD boogmethode	Enigszins warm	-	Behoorlijk vochtig	Geen pijn	Een beetje zwaar
LD 250 3D-pulsmethode	Enigszins warm	Licht oncomfortabel	Vochtig	Geen pijn	Een beetje zwaar
LD 250 boogmethode	Enigszins warm	Licht oncomfortabel	Vochtig	Geen pijn	Zeer licht
LD 450 3D-pulsmethode	Heet	-	Vochtig	Geen pijn	Tussen licht en een beetje zwaar
LD 450 boogmethode	Niet warm, niet koud	Neutraal	Vochtig	Geen pijn	Een beetje zwaar
DLS boogmethode	Niet warm, niet koud	Neutraal	Vochtig	Geen pijn	Tussen extreem licht en zeer licht

Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de proefpersonen. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat zij reeds ervaring hadden met dergelijke omstandigheden.

Op de eerste open vraag, waar gevraagd werd naar het moment waarop de meeste warmte ervaren werd, gaven de straalpijpvoerders en nummers 2 bij de boogmethode aan dat zij de meeste warmte bij de vuurhaard (drempel 7) hadden ervaren. Bij de 3D-pulsmethode gaf de helft van de straalpijpvoerders en nummers 2 aan dat zij de meeste warmte bij de ingang hadden ervaren, terwijl de andere helft de meeste warmte waarnam bij de vuurhaard.

De tweede vraag ging in op wat het meeste discomfort veroorzaakte tijdens de inzet. Bij de boogmethode werd over het algemeen het afblussen aangegeven als veroorzaker van het meeste discomfort. Bij de inzet met de LD 450 boogmethode ervoeren de straalpijpvoerders en nummers 2 het meeste discomfort. Ze gaven aan dat door de waterdamp, de hoeveelheid water, het ontbreken van zicht, de kracht die nodig was om de straalpijp fatsoenlijk te bedienen en het gebrek aan mogelijkheid tot communiceren leidden tot discomfort tijdens de inzet. Over het algemeen werd bij de 3D-pulsmethode minder discomfort ervaren dan bij de boogmethode. Alleen bij de LD 250 3D-methode werd het harde werken bij het vorderen genoemd als discomfort.

#### **Analyse invloed rookgaskoeling op de veiligheid van brandweermensen**

Bij geen van de onderzochte rookgaskoelingsmethoden wordt de gehanteerde grenswaarde voor blootstelling aan warmtestraling (dosis) voor veilig optreden overschreden. De

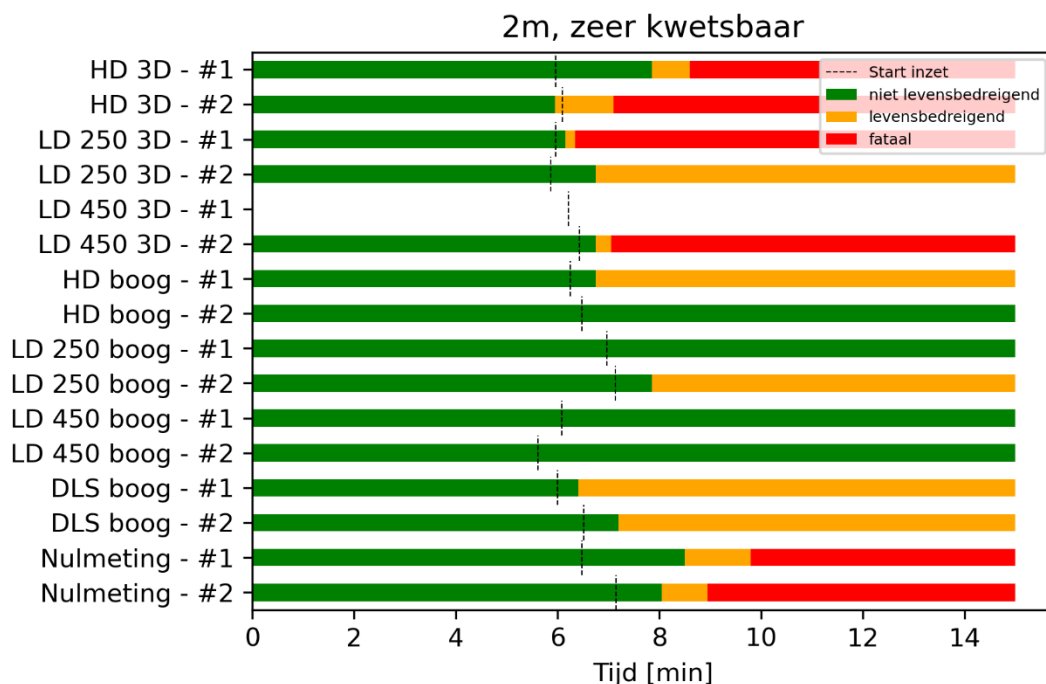


blootstelling aan warmtestraling is over het algemeen iets hoger bij de testen met de 3D-methode dan bij de testen met de boogmethode. Uit de vragenlijst blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de inzetploegen. Ten opzichte van de nulmeting is er een daling van de warmtestraling in de gang te zien bij alle toegepaste technieken. Dit betekent dat de onderzochte rookgaskoeling technieken de veiligheid tijdens het vorderen, in vergelijking met een inzet zonder rookgaskoeling, verbeteren. Zoals eerder aangegeven kan geen oordeel gegeven worden over de daadwerkelijke veiligheid van het brandweerpersoneel, omdat alleen een relatieve vergelijking is uitgevoerd.

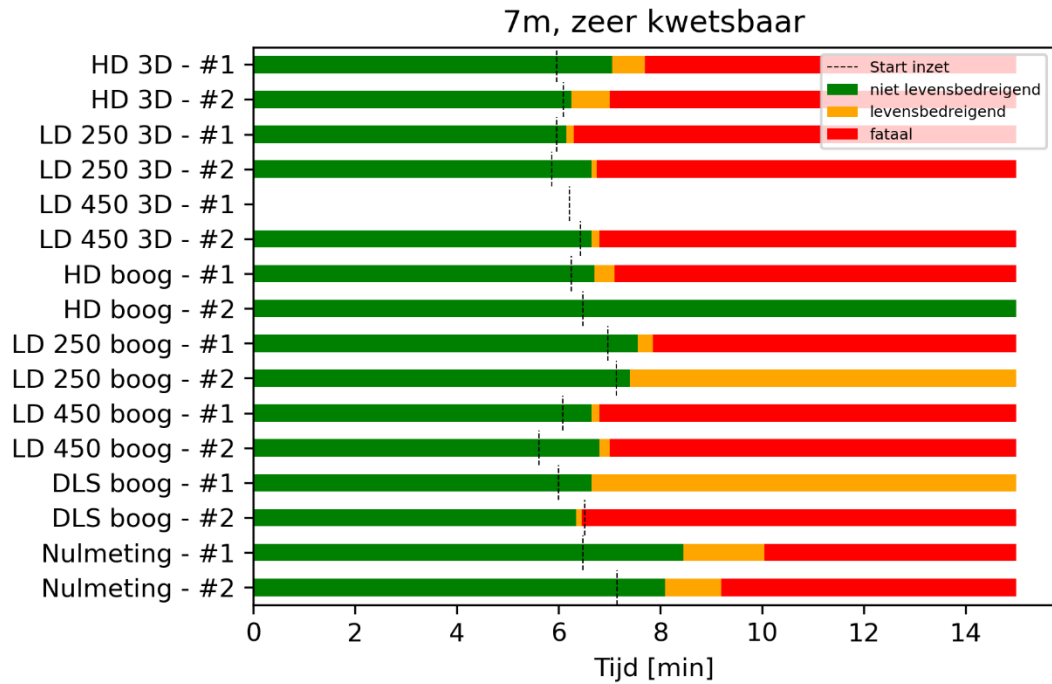
### 2.4.2 Slachtoffers

Voor alle experimenten geldt dat als er een grenswaarde overschreden wordt, dat die van de  $FED_{IN}$  is. Dit betekent dat het de verstikkende gassen zijn die zorgen voor levensbedreigende condities en in alle gevallen is dit CO. In deze paragraaf worden alleen de resultaten voor de verstikkende gassen uitgewerkt, omdat voor de gemeten irriterende gassen en warmtestraling in dit onderzoek geen grenswaarden zijn overschreden.

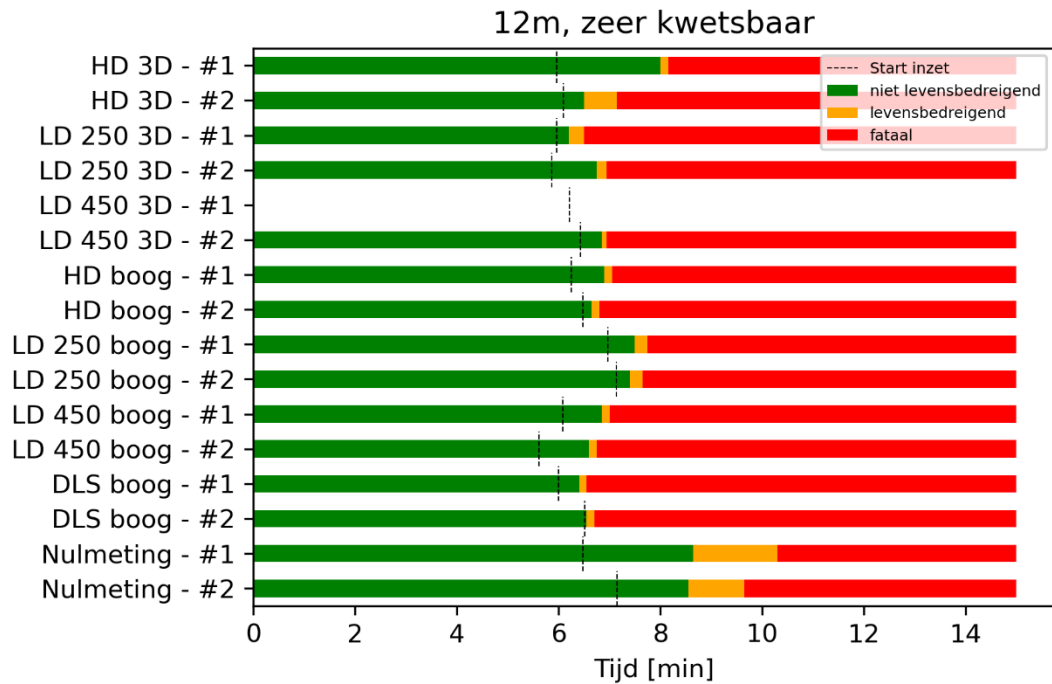
In figuur 2.21 tot en met 2.29 is een overzicht weergegeven van het effect van elke inzet op de overlevingscondities per populatiegroep en per meetlocatie. De grafieken beginnen bij het ontsteken van de vuurhaard en zijn begrensd op 15 minuten. Alleen de nulmetingen hebben daadwerkelijk tot deze tijd doorgelopen; bij de experimenten is aansluitend aan de rookgaskoeling overgegaan op het afblussen van de vuurhaard. Het afblussen is in deze grafieken niet meegenomen. Van LD 450 lesstof 3D test 1 zijn door uitval van de meetapparatuur geen metingen vastgelegd, van deze test is alleen het moment van start inzet weergegeven.



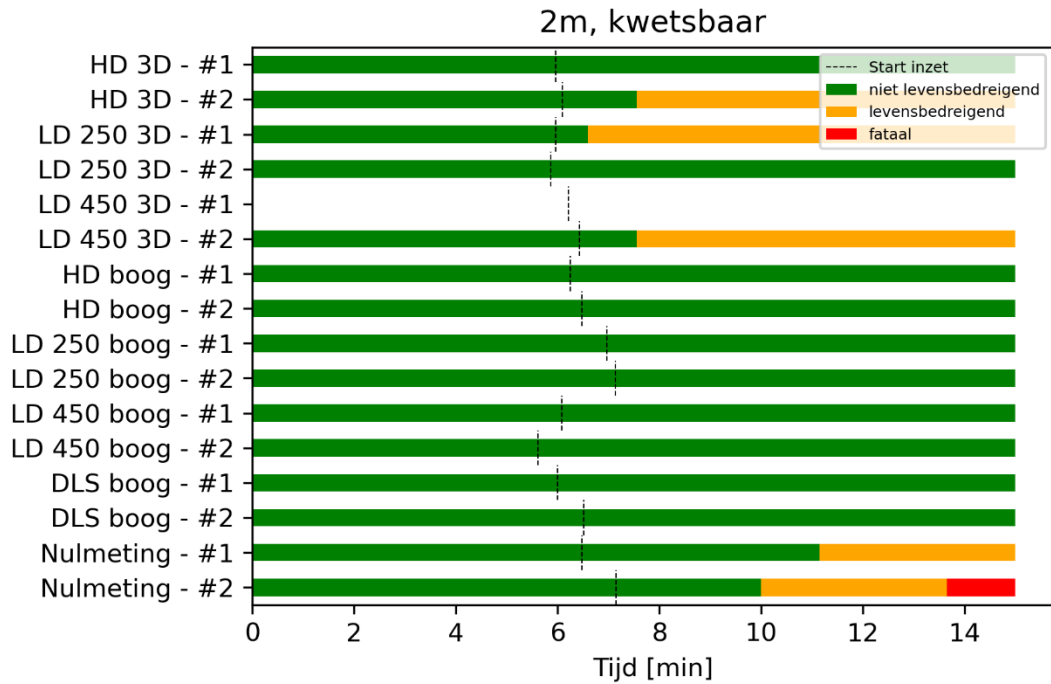
**Figuur 2.21** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de zeer kwetsbare groep op 2 meter in de gang



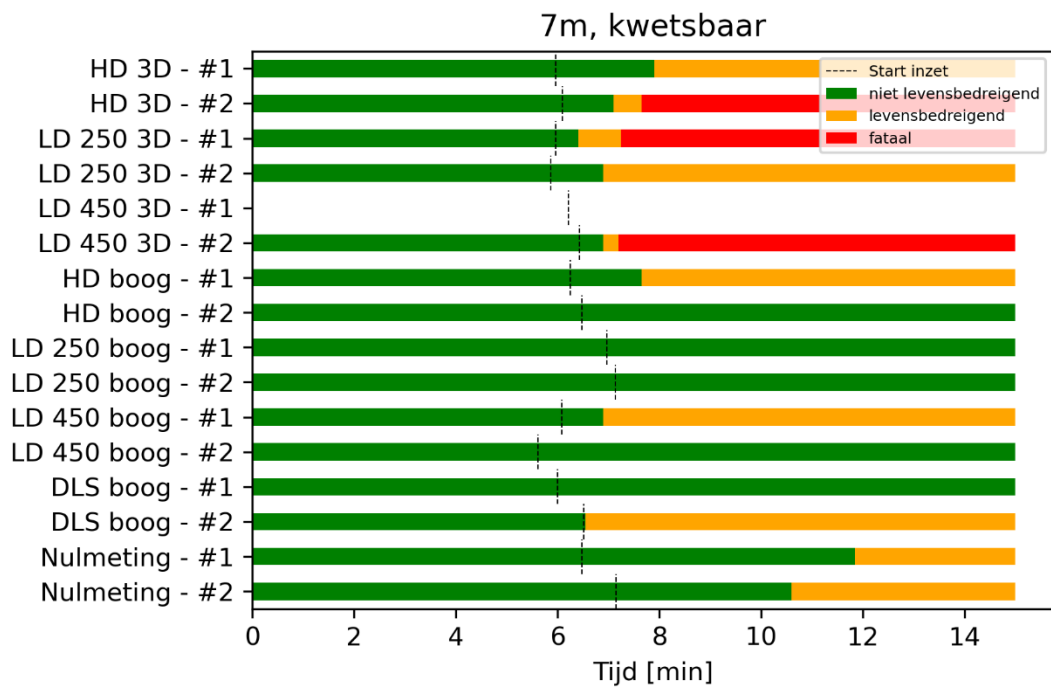
**Figuur 2.22** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de zeer kwetsbare groep op 7 meter in de gang



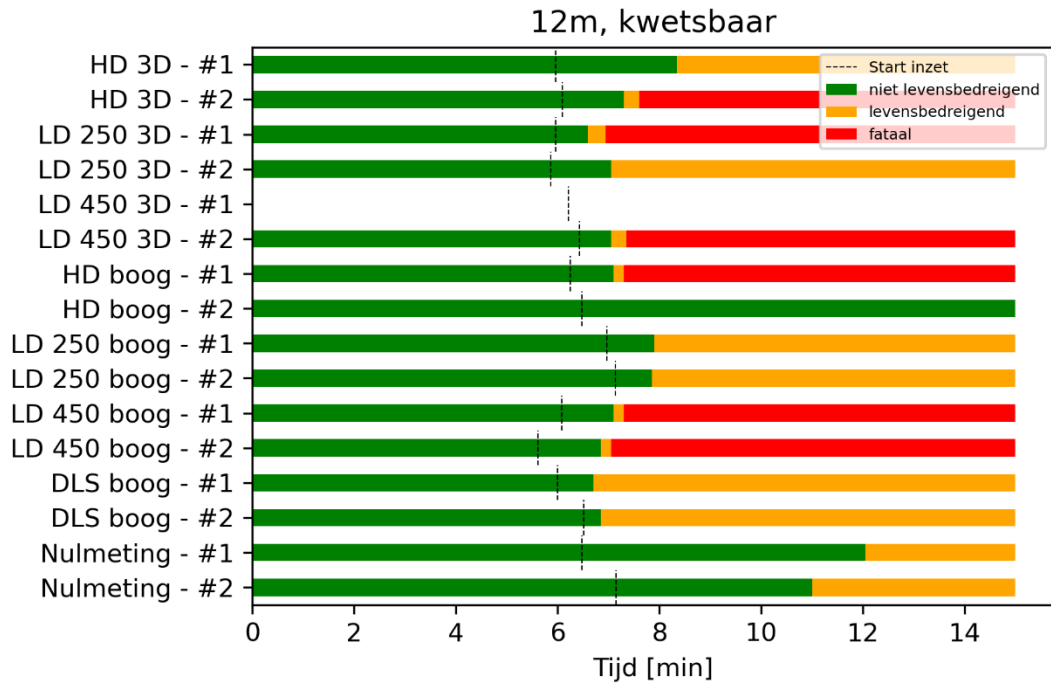
**Figuur 2.23** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de zeer kwetsbare groep op 12 meter in de gang



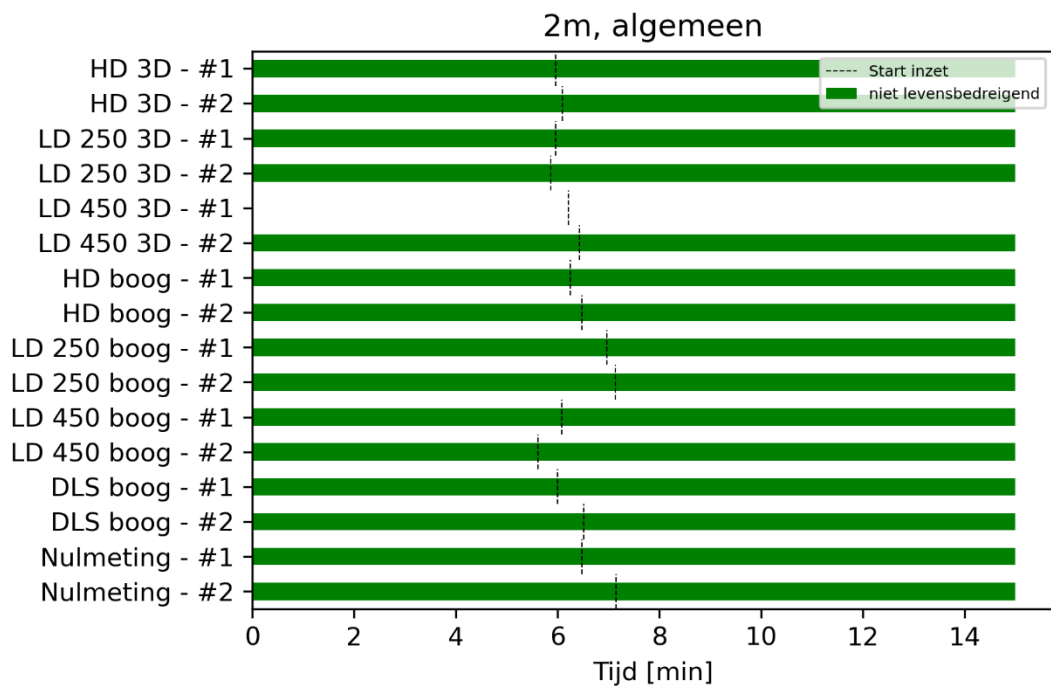
**Figuur 2.24** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de kwetsbare groep op 2 meter in de gang



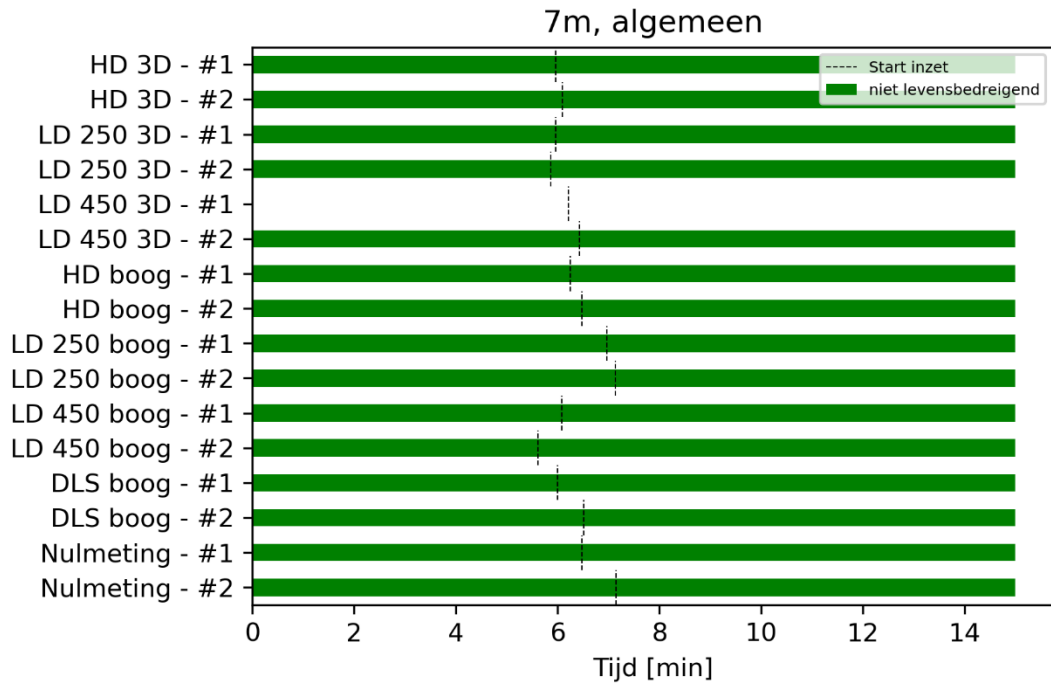
**Figuur 2.25** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de kwetsbare groep op 7 meter in de gang



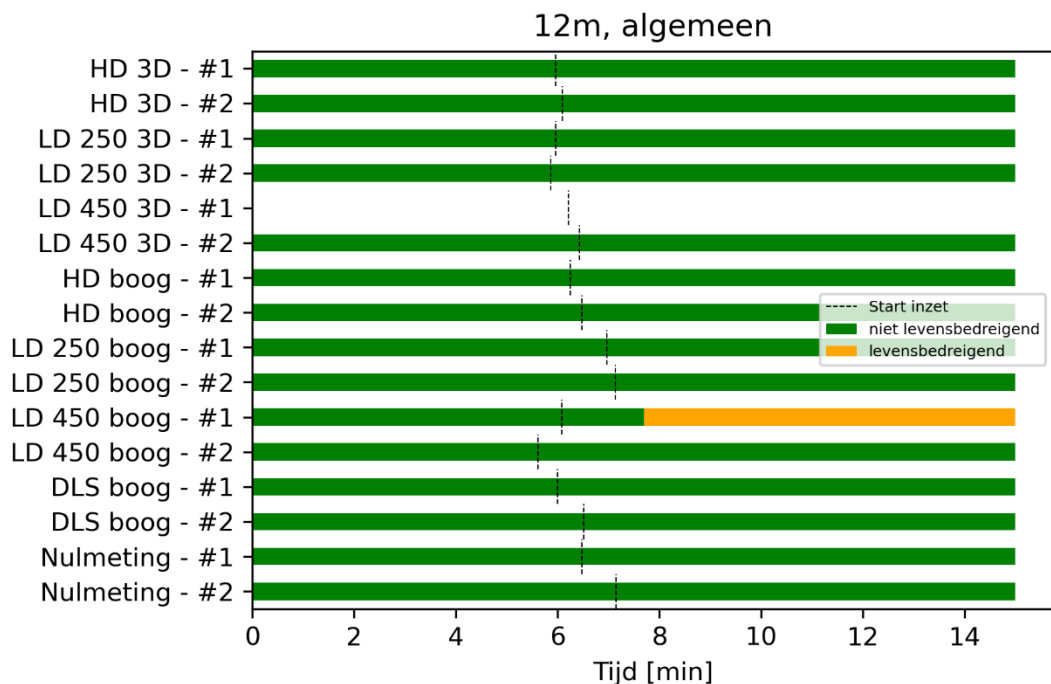
**Figuur 2.26** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de kwetsbare groep op 12 meter in de gang



**Figuur 2.15** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de algemene groep op 2 meter in de gang



**Figuur 2.28** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de algemene groep op 7 meter in de gang



**Figuur 2.29** Tijden van overlevingsmogelijkheden van de algemene groep op 12 meter in de gang

#### Analyse invloed rookgaskoeling op de veiligheid van slachtoffers

De tijd tussen het ontstaan van de brand en de inzet ligt bij deze experimenten ongeveer rond de 6,5 minuten. In werkelijkheid is deze tijd langer, ongeveer 13 minuten

(alarmeringstijd + opkomsttijd + inzetgereed maken). Deze tijd is natuurlijk van belang voor eventuele slachtoffers. Daarom wordt hier een relatieve vergelijking gemaakt tussen de experimenten en de nulmeting. De technieken zijn beoordeeld op basis van een verbetering of verslechtering van de condities ten opzichte van de nulmetingen.

Uit de resultaten blijkt dat voor de algemene groep alleen bij LD 450 test 1 met de boogmethode een grenswaarde wordt overschreden. Bij de nulmetingen en de overige testen blijven de condities voor deze groep overleefbaar in de hele gang. Voor de (zeer) kwetsbare groepen worden de condities met vrijwel elke inzet slechter vanaf 12 m in de gang. Uit de nulmetingen blijkt dat voor de kwetsbare groep in 13 minuten tijd een levensbedreigende situatie ontstaat in de gehele gang.

Over het algemeen zorgt de boogmethode voor minder verslechtering dan de 3D-pulsmethode, met name voorin de gang bij de ingang. Er zijn duidelijke verschillen tussen beide testen per blussysteem voor de overleefbaarheid, wat duidt op een sterke invloed van de straalpijpvoerder op deze condities.

### 2.4.3 Samenvatting

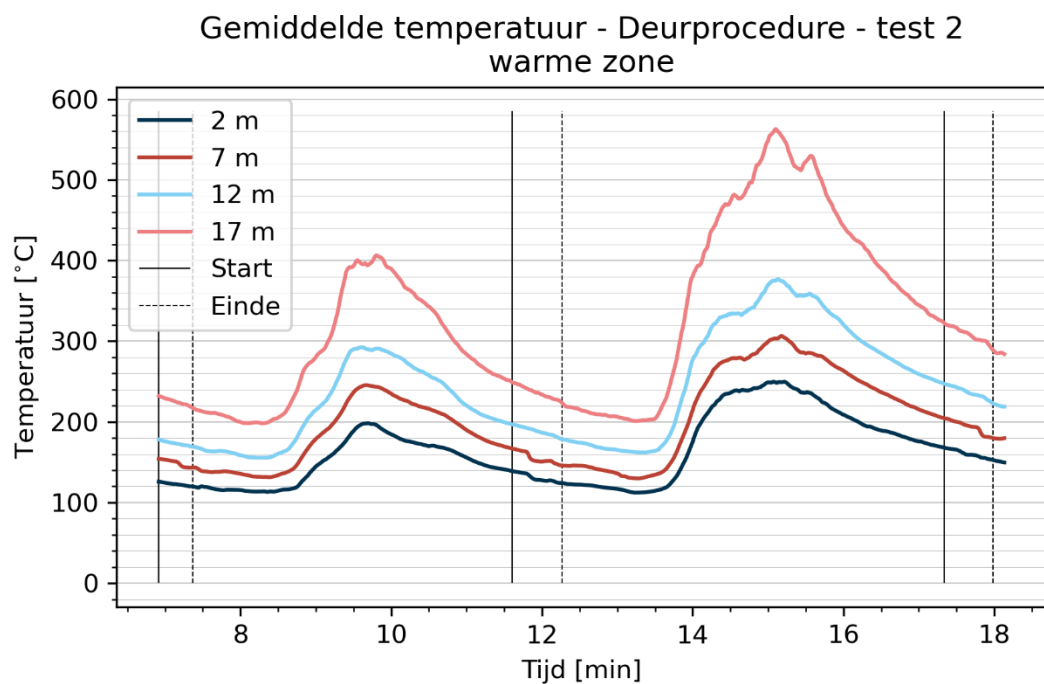
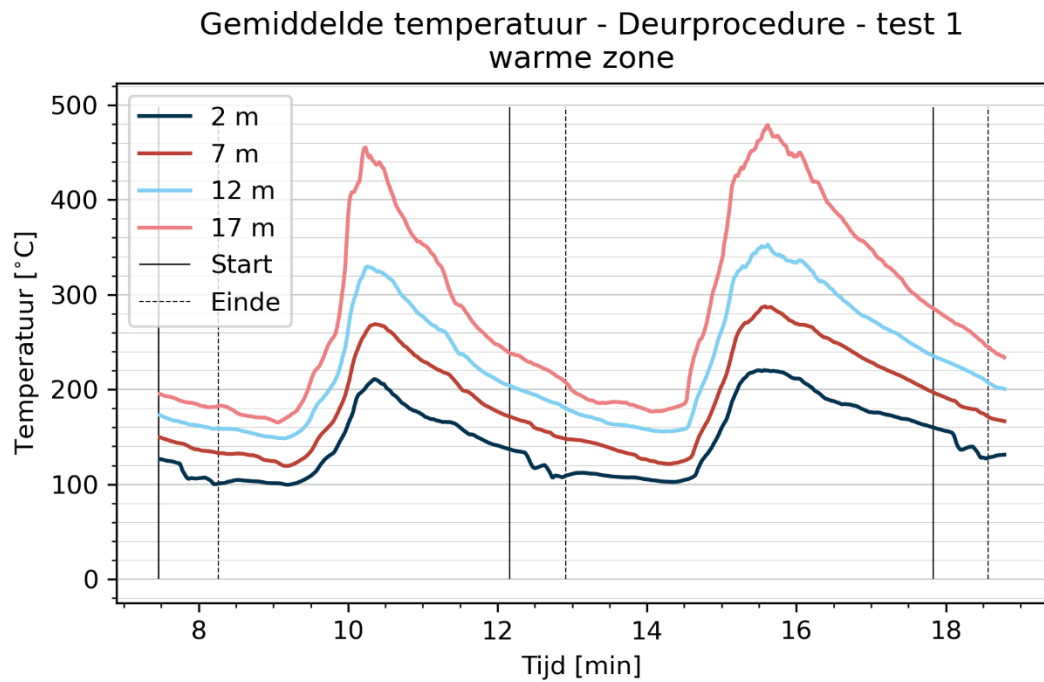
Op basis van de gehanteerde methode voor blootstelling wordt de grenswaarde voor veilig optreden bij geen van de onderzochte rookgaskoelingsmethoden overschreden. De ontvangen stralingsdosis is met de 3D-pulsmethode wel hoger dan met de boogmethode. Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat geen van de inzetten bovenmatig zwaar is geweest voor de ploegen. Bij de inzet met LD 450 heeft de ploeg de meeste discomfort ervaren. Als redenen hiervoor worden genoemd: de waterdamp, de hoeveelheid water, een gebrek aan zicht, de kracht die nodig is om de straalpijp fatsoenlijk te bedienen en het gebrek aan mogelijkheid tot communiceren.

De inzet van de brandweerploeg heeft, ongeacht het blussysteem of de methode, negatieve gevolgen voor de veiligheid van zeer kwetsbare en kwetsbare slachtoffers. Na de start van de inzet is namelijk een stijging in de CO-waarden te zien op slachtofferniveau. Voornamelijk voor de slachtoffers die 7 meter en 12 meter diep in de gang liggen, ontstaan bij alle experimenten levensbedreigende en zelfs fatale situaties. Voor slachtoffers die in de algemene groep vallen, ontstaan geen levensbedreigende situaties op één experiment na. Tijdens beide nulmetingen, waarbij dus geen inzet is gedaan, is te zien dat het langer duurt voor er een levensbedreigende situatie voor de slachtoffers ontstaat.

## 2.5 Invloed van de deurprocedure

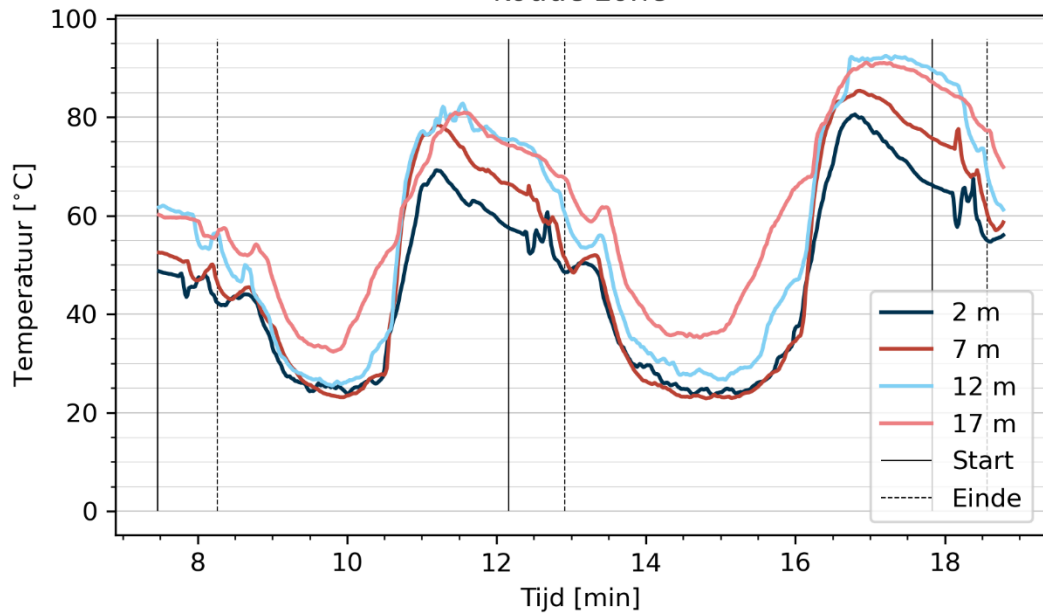
De deurprocedure is tijdens twee experimenten drie keer achter elkaar uitgevoerd, waarbij tussentijds opnieuw de rooklaag werd opgebouwd totdat deze langer dan één minuut een temperatuur had van minimaal 200 °C op 2,2 m hoogte over de gehele gang. Voorafgaand aan het uitvoeren van de deurprocedure is elke keer een koudeblok gezet, zoals beschreven in paragraaf 1.4. Dit betekent dat tussentijds beide voordeuren zijn opengezet, zodat de rookproductie en daarmee de rooklaag weer kon toenemen. De grafieken hieronder tonen de gemiddelde temperatuur in de gang en in de brandruimte tijdens het uitvoeren van de opeenvolgende deurprocedures, gemarkeerd met 'Start' en 'Einde'. Alleen achter de deur (2 m in de gang) zijn kort temperatuurwisselingen van 10-20 graden te zien. Boven de deur

worden met de thermokoppels aan de vlaggenstokken temperaturen gemeten van maximaal 50 graden als de deur geopend wordt.

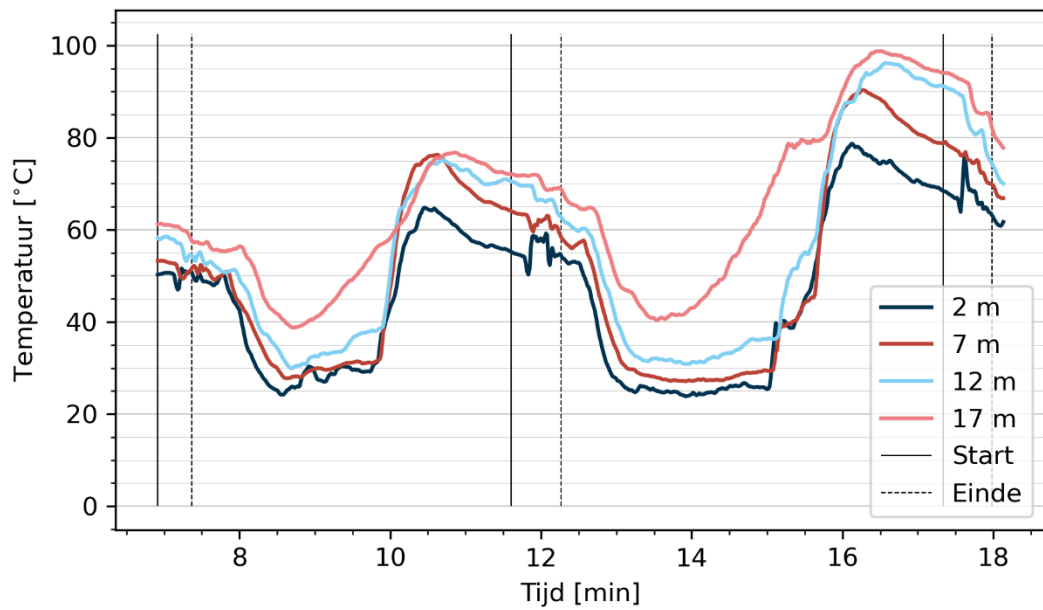


Figuur 2.30 Gemiddeld temperatuurverloop in de warme zone tijdens deurprocedures

Gemiddelde temperatuur - Deurprocedure - test 1  
koude zone

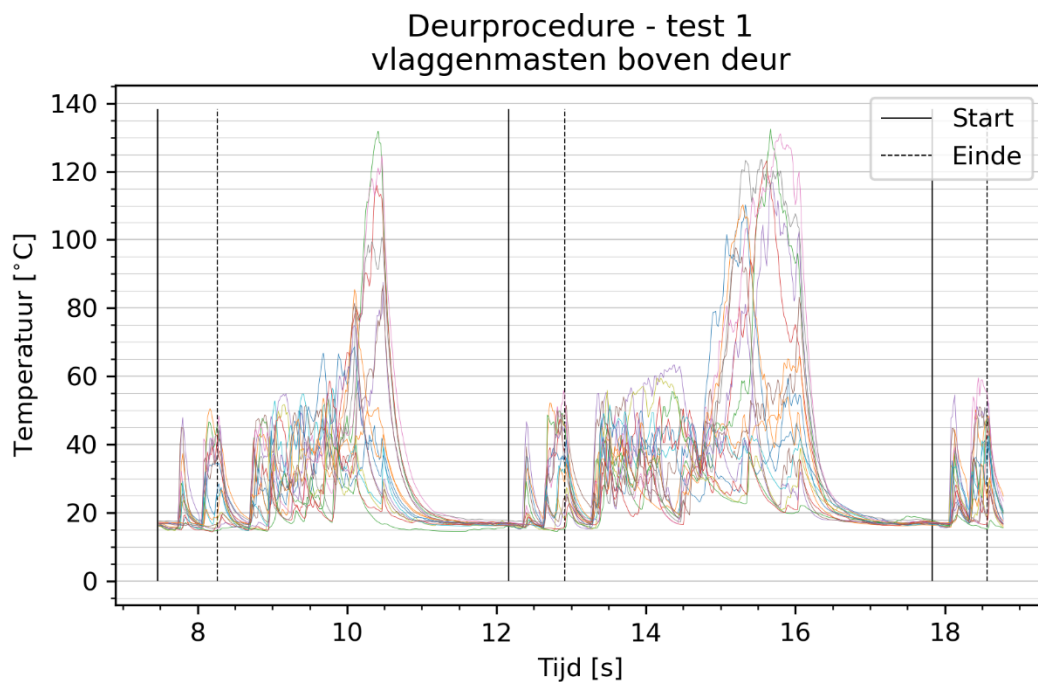


Gemiddelde temperatuur - Deurprocedure - test 2  
koude zone

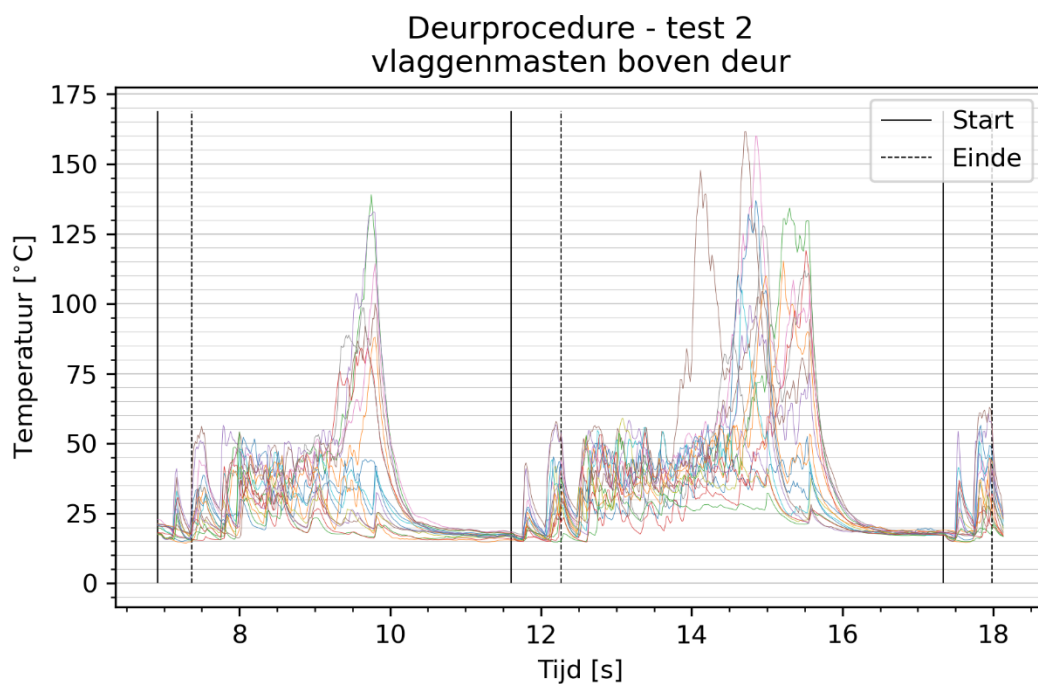


Figuur 2.31 Gemiddeld temperatuurverloop in de koude zone tijdens deurprocedures



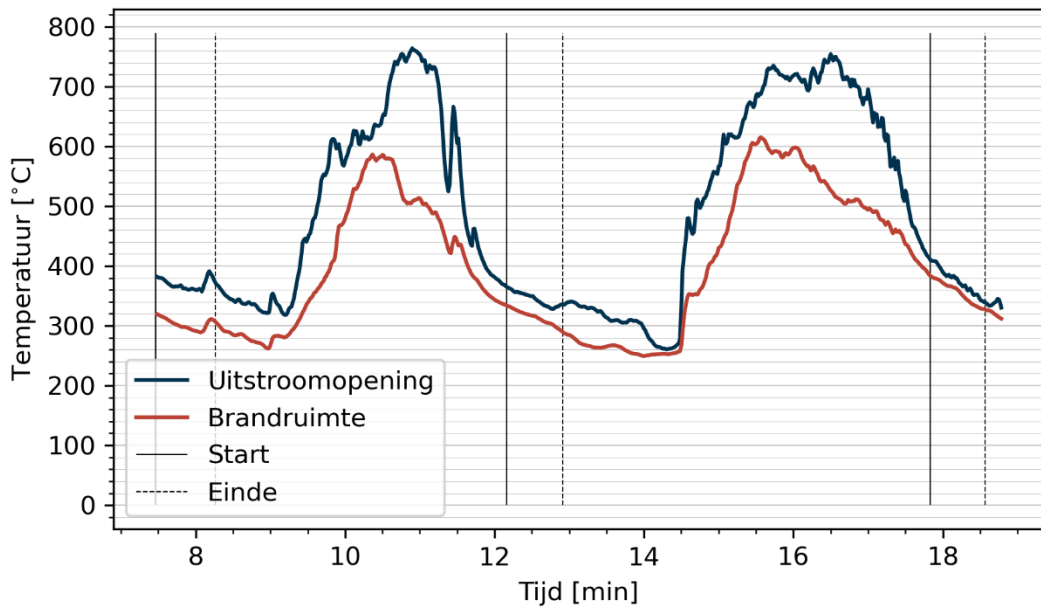


**Figuur 2.32** Temperatuurverloop boven de voordeur tijdens deurprocedure 1



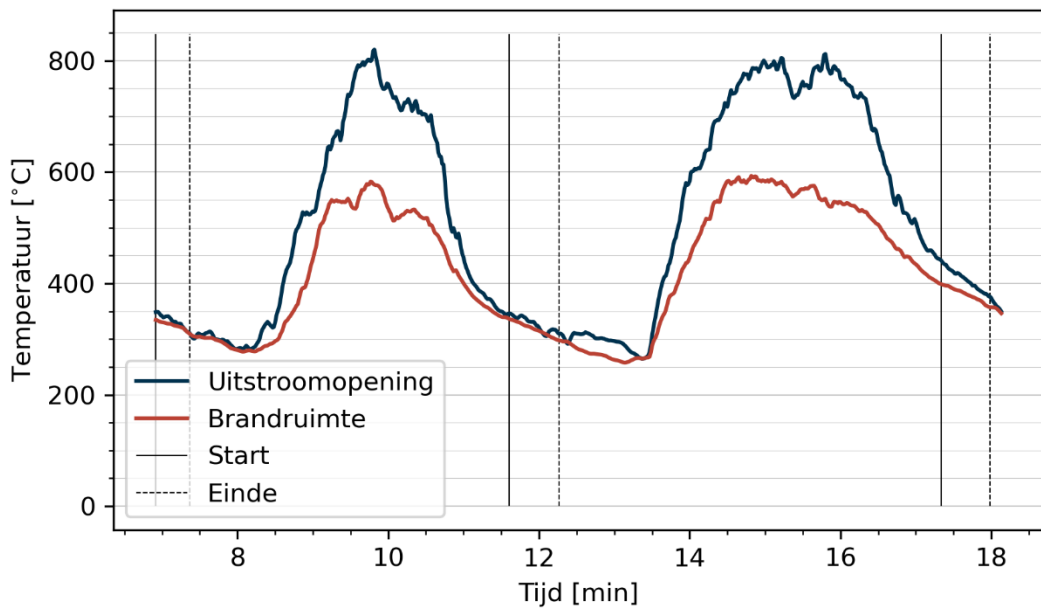
**Figuur 2.33** Temperatuurverloop boven de voordeur tijdens deurprocedure 2

Gemiddelde temperatuur - Deurprocedure - test 1  
Vuurhaard



Figuur 2.34 Temperatuur in de brandruimte tijdens deurprocedure 1

Gemiddelde temperatuur - Deurprocedure - test 2  
Vuurhaard



Figuur 2.35 Temperatuur in de brandruimte tijdens deurprocedure 2

## Analyse

Uit de resultaten blijkt geen duidelijk effect van de individuele uitvoering van het koudeblok of de deurprocedure. Tijdens het opbouwen van de condities zijn de buitendeuren geopend geweest, en voor het uitvoeren van de deurprocedure werden ze weer gesloten. Zoals te zien in de grafieken daalt de temperatuur bij de vuurhaard doordat de brand ondergeventileerd raakt. De handelingen volgen elkaar ook te snel op om veranderingen in temperatuur goed te kunnen duiden. Tijdens de uitvoering van de testen bleken de temperaturen buiten niet erg indicatief te zijn voor de temperatuur van de rooklaag. De rooklaag wordt in de buitenlucht direct verdund en verspreid. Ondanks maatregelen om de invloed van wind te beperken, had deze wel een grote invloed op de metingen. Soms werd de rook van de vlaggenstokken afgeblazen, waardoor de temperatuur van de rook niet betrouwbaar gemeten kon worden.

## 2.6 Inzettijd en waterverbruik

Tabel 2.9 Inzettijd tot bereiken vuurhaard en waterverbruik

Blusmethode	Inzettijd tot bereiken vuurhaard in seconden	Waterverbruik in liters
HD 3D pulsmethode	90	40
HD boogmethode	66	135
LD250 3D pulsmethode	102	70
LD250 boogmethode	62	275
LD 450 3D pulsmethode	88	130
LD 450 boogmethode	78	550
DLS boogmethode	80	175

### Uitvoering

De inzettijd is gebaseerd op het gemiddelde van twee metingen (m.u.v. LD450 boogmethode, hier was 1 meting beschikbaar). De tijd is gebaseerd op de start van de inzet tot het bereiken van de vuurhaard (drempel 7) in seconden. De debietmetingen zijn uitgevoerd door het meermalig uitvoeren van gewichtsmetingen gedurende 10, 30 en/of 60 seconden. Er is uitgegaan van de ratio 1 kg = 1 liter.

Het aantal liters bij de pulsmethode is gebaseerd op het gemiddelde van twee metingen, met 6\*3 seconden lange puls vermenigvuldigd met het gemeten debiet per seconde. Hier zit een onzekerheid door sneller of langzamer meetellen door de straalpijpvoerder. Deze onzekerheid heeft naar schatting een orde grootte van 10 liter.

Het aantal liters bij de boogmethode is gebaseerd op het gemiddelde van twee metingen, (m.u.v. van LD450 boogmethode, hier was 1 meting beschikbaar). De meting is gebaseerd

op de inzetijd vermenigvuldigd met het gemeten debiet per seconde. Hier zit een onzekerheid in door moment openen en sluiten versus communiceren. Deze onzekerheid heeft naar schatting een orde grootte 20 liter.

De debietmeting van DLS wijkt af, doordat het een water-schuim-lucht mengsel betreft. Bij gebrek aan duidelijkheid over het exacte mengsel ten tijde van de experimenten is ook uitgegaan van 1 kg = 1 liter.

### Analyse

In zijn algemeenheid kan gesteld worden dat de boogmethode minimaal 3x zo veel water gebruikt als de 3D pulsmethode (DLS niet meegerekend) tijdens het vorderen naar de vuurhaard (afstand 20m).



# 3 Conclusie

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag en de deelvragen zoals beschreven in de inleiding. Allereerst worden de deelvragen afzonderlijk beantwoord (paragraaf 3.1.1 tot met 3.1.4). Vervolgens wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag (paragraaf 3.2).

## 3.1 Beantwoording van de deelvragen

**3.1.1 In welke mate is het, bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode, mogelijk om rookgassen te koelen bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag, in termen van:**

- a. **temperatuur versus hoogte**
- b. **energieafname**
- c. **voorwaartse en achterwaartse koeling?**

### **Temperatuur versus hoogte**

Voor alle experimenten geldt dat de temperatuur in de warme zone afneemt gedurende de inzet. Dat wil zeggen dat de warme zone bij alle inzetten gekoeld wordt. Met de boogmethode wordt een grotere temperatuurafname bereikt dan met de 3D-pulsmethode. Ook is te zien dat bij de 3D-pulsmethode de temperatuur in de koude zone in beperktere mate toeneemt dan bij de boogmethode. Dat is opvallend, aangezien de verwachting was dat met de boogmethode de rooklaag meer zou opmengen en dat deze opmenging tot een toename van de temperatuur in de koude zone zou leiden.

Bij een groter debiet is de temperatuurafname in de warme zone groter. Maar het verschil tussen HD boogmethode en LD 250 boogmethode is minder groot dan op basis van het debiet verwacht werd. Dit geldt ook voor het verschil tussen LD 250 3D-pulsmethode en LD 450 3D-pulsmethode. De resultaten met DLS zijn vergelijkbaar met de HD boogmethode. De grootste temperatuurafname is gemeten bij de experimenten met de LD 450 boogmethode.

### **Energieafname**

Voor alle inzetten geldt dat de relatieve energieverandering in de warme zone in alle segmenten afneemt gedurende de inzet. Dit in tegenstelling tot de nulmeting, waarbij de energie zoals verwacht overal toeneemt. In de warme zone is de energieafname verder in de gang groter. Hier is de temperatuur ook hoger en er kan dus meer energie opgenomen worden door het water. Verder is de energieafname in de warme zone met de boogmethode groter dan bij de 3D-pulsmethode in alle segmenten van de gang.

De energieafname in de warme zone neemt toe naarmate het debiet groter wordt. Zo wordt voor zowel de 3D-pulsmethode als de boogmethode een grotere energieafname bereikt voor opeenvolgend de HD, LD250 en de LD450 blussystemen. De grootste energieafname werd

bereikt bij de experimenten met de LD 450 boogmethode. De resultaten met DLS zijn vergelijkbaar met de HD boogmethode.

In de koude zone neemt de energie toe in alle segmenten bij de nulmeting, maar wel veel minder dan in de warme zone. Bij de verschillende inzetten neemt de energie in een aantal gevallen ook toe in de koude zone. Dit is met name zo in het midden van de gang. De energietoename in het midden van de gang is bij de 3D-pulsmethode groter dan bij de boogmethode. Dit kan mogelijk het gevolg zijn van opmenging tussen de warme en koude zone tijdens de inzet. De standaarddeviaties zijn zo groot in verhouding tot de meetwaarden (soms > 100 %) dat niet met zekerheid gesproken kan worden over energietoef- of afnames in de koude zone. Bij DLS wordt bij de ingang wel een duidelijke afname in energie bereikt, maar verder in de gang is dit verwaarloosbaar

### **Voorwaartse en achterwaartse koeling**

Uit de analyse van de voorwaartse en achterwaartse koeling blijkt dat bij de boogmethode de temperatuur achter de inzetploeg consistent het laagst blijft bij alle debieten, terwijl bij de 3D-pulsmethode de temperatuur achter de inzetploeg in sommige gevallen weer oploopt. De boogmethode bereikt ook een verdere voorwaartse koeling dan de 3D-pulsmethode voor alle debieten. Het koelende effect van de 3D-pulsmethode is vooral lokaal en van kortere duur door aanvoer van warme rookgassen uit de brandruimte. Dit is het beste zichtbaar bij HD, waarbij een laag debiet in combinatie met de 3D-pulsmethode tot een kortdurende voorwaartse en achterwaartse koeling leidt.

### **3.1.2 In welke mate is het bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode mogelijk om tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag de vuurhaard te beïnvloeden?**

Bij alle methoden daalt de temperatuur bij de uitstroomopening en in de brandruimte tijdens het vorderen ten opzichte van de nulmeting. Alle blussystemen en inzetmethoden hebben dus een koelend effect op de brandruimte tijdens het vorderen. De mate waarin rookgas-koeling effect heeft op de vuurhaard is afhankelijk van meerdere factoren, zoals de stromingsprofielen ten tijde van het experiment, de techniek van de straalpijvoerder en atmosferische omstandigheden. Met de boogmethode wordt meer koeling bereikt dan met de 3D-methode. Bij de 3D-methode neemt de koeling toe naarmate het debiet toeneemt. De boogmethode geeft het beste resultaat met HD, wat waarschijnlijk verklaard kan worden doordat met HD snel door de gang gevorderd kan worden.

### **3.1.3 In welke mate wordt de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed tijdens het koelen van rookgassen bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag?**

#### **Veiligheid van brandweermensen**

Op basis van de gehanteerde methode voor blootstelling (warmtestralingsdosis) wordt de grenswaarde voor veilig optreden bij geen van de onderzochte rookgas-koelingsmethoden overschreden. Met de 3D-pulsmethode is de ontvangen dosis wel hoger dan met de boogmethode.

Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de inzetten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de inzetploegen. Bij de inzet met LD 450 heeft de inzetploeg het meeste discomfort ervaren door de waterdamp, de hoeveelheid water, het gebrek aan zicht, de kracht die nodig is om de straalpijp fatsoenlijk te bedienen en het gebrek aan mogelijkheid tot communiceren.

### **Veiligheid van slachtoffers**

De inzet van de brandweerploeg heeft, ongeacht het blussysteem of de methode, negatieve gevolgen voor de veiligheid van zeer kwetsbare en kwetsbare slachtoffers. Na de start van de inzet is namelijk een stijging in de CO-waarden te zien op slachtofferniveau. Voornamelijk voor de slachtoffers die 7 meter en 12 meter diep in de gang liggen, ontstaan bij alle experimenten levensbedreigende en zelfs fatale situaties. Voor slachtoffers die in de algemene groep vallen, ontstaan geen levensbedreigende situaties op één experiment na. Tijdens beide nulmetingen, waarbij dus geen inzet is gedaan, is te zien dat het langer duurt voor er een levensbedreigende situatie voor de slachtoffers ontstaat.

#### **3.1.4 Welke invloed heeft een van buiten uitgevoerde deurprocedure op de condities binnen?**

Bij alle meetbomen wordt een daling van de temperatuur waargenomen, maar het is niet te zeggen of dat een direct gevolg is van de deurprocedure. De daling zou namelijk ook kunnen komen doordat beide voordeuren voorafgaand aan de deurprocedure zijn gesloten, waardoor de brand minder zuurstof krijgt en de temperatuur al daalt vóór de start van de deurprocedure. Verder is geen effect te zien van het koudeblok of de deurprocedure. Nader onderzoek wordt daarom aanbevolen.

## **3.2 Beantwoording van de hoofdvraag**

De hoofdvraag in dit onderzoek luidde:

*In welke mate worden, bij gebruik van de 3D-pulsmethode en de boogmethode, rookgassen gekoeld, de vuurhaard en veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed bij het vorderen naar een vuurhaard in een dynamische rooklaag?*

Beide methoden zorgen voor een koeling van de rookgassen. Het uitvoeren van rookgas-koeling is daarom altijd beter dan geen inzet doen. Zowel voor wat betreft de koeling over de hoogte en de lengte van de gang, als voor de voorwaartse en achterwaartse koeling geeft de boogmethode een gunstiger resultaat dan de 3D-pulsmethode. De resultaten van de boogmethode zijn ook consistent, wat erop lijkt te wijzen dat deze methode eenvoudiger uit te voeren is.

De reikwijdte van de voorwaartse en achterwaartse koeling is voor de boogmethode groter dan voor de 3D-pulsmethode. Daarnaast is de inzetduur bij de boogmethode korter (althans in de gekozen testopstelling).

Alle blussystemen en inzetmethoden hebben een koelend effect op de brandruimte tijdens het vorderen. Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor

de ploegen, waarbij wordt aangegeven dat de inzetten met LD 450 het meeste discomfort opleveren. Er zijn tijdens de experimenten geen onveilige situaties voor brandweerpersoneel ontstaan.

Door het toepassen van de onderzochte methoden en blussystemen voor rookgaskoeling verslechteren wel de condities voor potentiële slachtoffers. Voor kwetsbare en zeer kwetsbare personen kan dit leiden tot een levensbedreigende of fatale situatie. Over het algemeen zorgt de boogmethode voor minder verslechtering dan de 3D-pulsmethode, met name voorin in de gang. Er zijn duidelijke verschillen tussen beide testen per blussysteem voor de overleefbaarheid, wat duidt op een sterke invloed van de straalpijpvoerder op deze condities.

Uit de analyse van de filmbeelden blijkt dat hoewel de 3D-pulsmethode als standaardmethode wordt aangeleerd, de boogmethode eenvoudiger volgens protocol uit te voeren is dan de 3D-pulsmethode en minder afhankelijk is van de straalpijpvoerder.

Op basis van dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat zowel de boogmethode als de 3D-methode effectieve manieren zijn om rookgassen te koelen, maar dat de boogmethode meer koeling geeft, en bovendien makkelijker aan te leren en uit te voeren is.





# 4 Discussie

De resultaten van en conclusies uit dit onderzoek gelden voor de beschreven testopstelling, vuurlast en ventilatieprofiel. Een andere geometrie en/of vuurlast en/of ventilatieprofiel kunnen leiden tot andere resultaten en conclusies. Ook zijn er slechts twee methoden met elkaar vergeleken, namelijk de 3D-pulsmethode en de boogmethode met een continu geopende gebonden straal. Het is daarom niet uit te sluiten dat een andere methode misschien betere resultaten geeft. Het generaliseren van de onderzoeksresultaten dient derhalve met de nodige voorzichtigheid te worden gedaan.

Daarnaast zijn de testen slechts in duplo uitgevoerd, waardoor de reikwijdte van de kwantitatieve resultaten wordt beperkt. Daar staat wel tegenover dat de gemeten geringe spreiding in de meetresultaten de betrouwbaarheid en uitvoerbaarheid van de experimenten laat zien.

In het gebouw zijn vier meetbomen geplaatst met sensoren voor temperatuur, straling en gasconcentraties. Voor het meten van de temperatuur zijn thermokoppels gebruikt. De thermokoppels zijn zo goed mogelijk afgeschermd met kokers, zodat ze tijdens de inzet zo min mogelijk geraakt worden door het blusmiddel om beïnvloeding van de meetresultaten te voorkomen. Desondanks lijken bij meerdere experimenten de thermokoppels direct geraakt te worden door de straal, waardoor er een plotselinge daling in temperatuur te zien is. Dit was voornamelijk het geval bij de inzetten met DLS. Het schuim is in de beschermkastjes van de thermokoppels blijven hangen, waardoor een te lage temperatuur gemeten wordt en de meting vanaf dat moment niet meer betrouwbaar is. Dit heeft echter slechts een beperkte invloed gehad op de resultaten, omdat er gekeken is naar de gemiddelde temperaturen van meerdere thermokoppels op meerdere meetlocaties.

Er is vooraf bewust besloten om van straalpijpvoerder te wisselen tussen de experimenten. Hiervoor is gekozen, omdat zo inzicht verkregen kon worden in de mate van complexiteit van de uitvoering van de rookgaskoelingsmethode. Het wisselen van straalpijpvoerder heeft echter als nadeel dat de straalpijpvoerder en de wijze waarop de rookgaskoelingsmethodes zijn uitgevoerd een relatief grote invloed hebben op de effectiviteit van de rookgaskoeling. Dit geldt voornamelijk bij de 3D-pulsmethode.

Verder zijn de experimenten uitgevoerd bij een dynamische rooklaag. Een proefopstelling met een statische rooklaag waarbij de ruimte gesloten blijft, kan andere resultaten geven.

Door de L-vorm van het gebouw was het niet mogelijk om direct water of schuim op de vuurhaard te brengen. Maar uit de experimenten is gebleken dat het wel mogelijk is om de brandruimte indirect te koelen. De mate waarin de inzet de brandruimte beïnvloedt, kan invloed hebben op de stroming in de gang.



# Literatuurlijst

- Brandweeracademie (2013). *Verkoelende experimenten met water en schuim*. Arnhem: IFV.
- Brandweeracademie (2015). *Water en schuim opnieuw belicht*. Arnhem: IFV.
- Brandweeracademie. (2016). *Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs)brandweerpersoneel en operators bij industriële*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie. (2018). E-module Af- en nablissing, Leergang Manschap A 1.0. Arnhem.
- Brandweeracademie. (2018). E-module Verkenningstechnieken, Leergang Manschap A 1.0. Arnhem.
- ISO 13571. (2012). *Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Nederlands Normalisatie-Instituut. (2011, juli). NEN 6055:2011. *Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept - Bepalingsmethode*. Delft, Nederland: Nederlands Normalisatie-Instituut.
- Purser, D., & McAllister, J. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 5th ed., pp. 22308-2428). New York: Springer.
- Zevotek, R., Stakes, K., & Willi, J. (2018). *Impact of Fire Attack Utilizing Interior and Exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Full Scale Experiments*. Columbia, MD: UL Firefighter Safety Research Institute.

# Bijlage 1 Inzetprotocol experimenten rookgaskoeling

In het protocol worden een aantal afkortingen gebruikt:

- OL Onderzoeksleider
- ME Meting en data-acquisitie-team
- ST Stokers
- NR1 Inzetsploeg positie 1: straalpijvoerder
- NR2 Inzetsploeg positie 2: aanvoer slang & controle uitvoering
- NR3 Inzetsploeg positie 3: aanvoer slang halverwege gang
- NR4 Inzetsploeg positie 4: aanvoer slang buiten het pand.

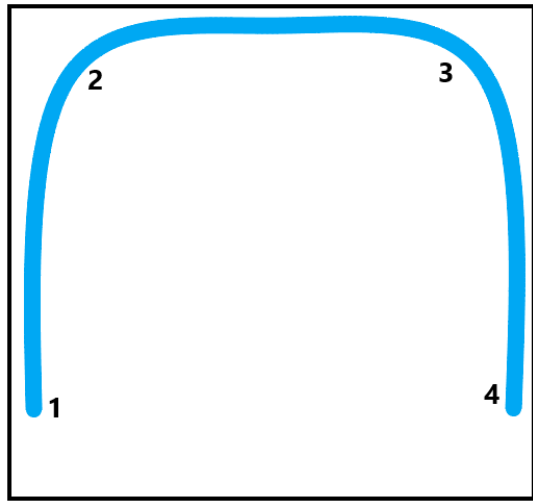
## 3D-pulsmethode

Stap	Wie	Wat	Commando
1	OL	Attentiesein voor de inzetploeg dat de conditie (>200°C boven plafond) over de gehele lengte van de gang gehaald is, en dat (mits de temperatuur stabiel blijft) de inzet over 1 minuut start.	Attentie, 1 minuut
2	OL	Op aangeven van ME geeft de OL het startsein voor de inzet.	Start inzet
3	NR1 en 2	NR1 en 2 blijven laag en bewegen zich voort naar de eerste drempel in de gang. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel'. De ME noteert het tijdstip dat de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 geeft een lange puls in de gang. Dit doet hij door diagonaal door de gang/ruimte heen te spuiten. De kegelhoek en spuihoek worden bepaald door de geometrie van de ruimte, waarbij het doel is om de wanden en plafond zo min mogelijk te raken. Zodra NR1 de straalpijp open trekt, telt hij hardop 'eenentwintig, tweeëntwintig, drieëntwintig, DICHT! Bij 'dicht' sluit NR1 de straalpijp. <i>Instelling: kegelhoek 10°-30°, spuihoek 30°-60° richting de verre hoek van de gang, maximaal debiet, lengte 3 seconden.</i>	Eenentwintig, tweeëntwintig, drieëntwintig, DICHT
5	NR1, 2 en 3	Wanneer NR1 klaar is met de lange puls, geeft hij aan te gaan vorderen richting de vuurhaard middels het commando 'vorderen'. NR1 en 2 blijven laag en bewegen zich voort richting de volgende drempel. Ze houden hierbij rechts van de gang aan. NR3 voert vanaf buiten de straal aan. Hierbij blijft NR3 weg bij de instroomopening zodat de instroom/ uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Vorderen

Stap	Wie	Wat	Commando
6	NR1 en 2	NR1 en 2 herhalen stap 3. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel'. De ME noteert het tijdstip dat deze volgende drempel wordt bereikt.	Drempel
7	NR1	NR1 en 2 herhalen stap 3 door het geven van een lange puls	Eenentwintig, tweeëntwintig, drieëntwintig, DICHT
8	NR1, 2 en 3	NR1, 2 en 3 herhalen stap 5 door te vorderen.	Vorderen
9	NR3 en 4	Zodra NR1 de vierde keer het commando vorderen geeft, gaat NR3 naar binnen en vordert direct naar de vierde drempel. NR3 gaat vanaf deze positie slang aanvoeren. NR4 neemt de positie van NR3 buiten over en voert de straal vanaf buiten aan. Hierbij blijft NR4 weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	
10	NR1 en 2	Zodra NR1 en 2 de laatste drempel hebben bereikt (drempel 7, met zicht op de vuurhaard) geeft NR1 dit aan door het commando 'vuurhaard' hardop te geven.	Vuurhaard
11	NR1	Zodra NR1 start met het blussen van de vuurhaard en afkoelen van de omliggende materialen geeft NR1 het commando afblussen.	Afblussen
12	NR1	<ol style="list-style-type: none"> <li>Begin door het geven van twee korte pulsen boven de brandhaard voor het koelen van de rookgassen. <b>Het doel van de pulsen is het afkoelen van de rookgassen zodat deze niet kunnen ontbranden.</b> <i>Instelling: kegelhoek 30°, spuihoek 10°-20° richting plafond en brandhaard, maximaal debiet.</i></li> <li>Bij zichtbare vlammen in de vuurhaard: geef 1 of 2 keer een pencil: Plaats met een gebonden straal korte pakketjes water op de vuurhaard. Dit doet de straalpijpvoerder door zeer kort de straalpijp half open te trekken en deze te sluiten zodra de waterstraal de vuurhaard raakt, gericht op de kern van de vuurhaard. Deze techniek brengt koelend vermogen in de vuurhaard. Belangrijk hierbij is dat de vuurhaard door de kracht van de straal niet uit elkaar gespoten wordt. <b>Het doel van pencilling is dat de vlammen in de vuurhaard doven.</b> <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, spuihoek richting vuurhaard, half debiet.</i></li> <li>Bij materialen naast of boven de vuurhaard die branden of uitdampen: geef een paint: Plaats met een gebonden straal en een laag debiet een 'streep' water over de uitdampende oppervlaktes in een vegende beweging. <b>Het doel van painting is het afkoelen van materialen en voorkomen/beperken van pyrolyse.</b> <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, spuihoek richting uitdampende oppervlaktes, 10-25% debiet (flush).</i></li> </ol>	

Stap	Wie	Wat	Commando
13	NR1	Zodra er geen vlammen of gloed meer zichtbaar zijn, geeft NR1 het commando 'knockdown'. De ploeg wacht 30 seconden op eventuele herontsteking. Bij herontsteking herhaalt NR1 stap 12.	Knockdown
14	OL	Wanneer er na 30 seconden geen herontsteking van de vuurhaard optreedt, geeft de OL het commando 'einde experiment'.	Einde experiment
15	NR1, 2,3,4	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang en/of de veiligheidsdeur. NR 3 trekt zich terug via de ingang. NR4 neemt afstand.	
16	NR1, 2,3,4	De NR1, 2, 3 en 4 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

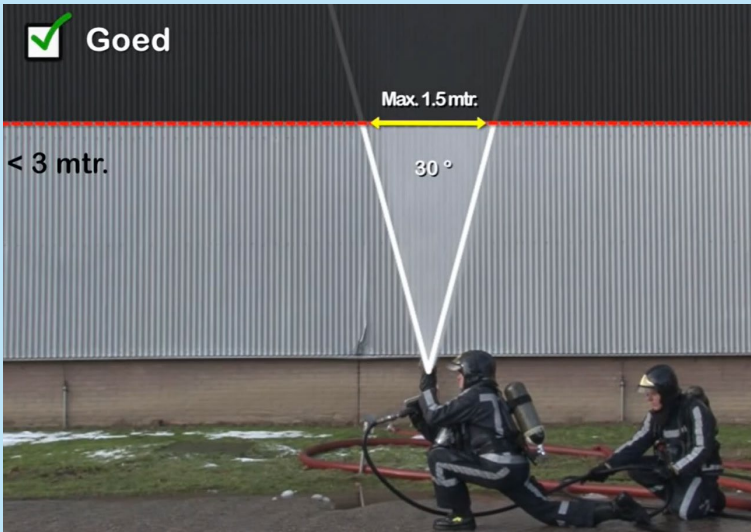
## Boogmethode

Stap	Wie	Wat	Commando
1	OL	Attentiewaarschuiging voor de inzetploeg dat de conditie (>200°C boven plafond) over de gehele lengte van de gang gehaald is, en dat (mits de temperatuur stabiel blijft) de inzet over 1 minuut start.	Attentie, 1 minuut
2	OL	Op aangeven van ME geeft de OL het startsein voor de inzet.	Start inzet
3	NR1 en 2	NR1 en 2 blijven laag en bewegen zich voort naar de eerste drempel bij de ingang. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel'. De ME noteert het tijdstip dat de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 zet de straalpijp open. Hij begint om continu het boogpatroon te maken, terwijl de straalpijp openstaat. Het boogpatroon maakt NR1 door met een gebonden straal het continu volgen van het patroon 1-2-3-4-3-2-1.	Open
			
<p>Tijdens het maken van het patroon blijft hij vorderen richting de vuurhaard. NR1 begint vrij kort voor zich (1m) met koelen, maar doet dit gedurende het vorderen verder voor zich uit.  <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, maximaal debiet.</i></p>			
5	NR1	Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel'. De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt. NR1 stopt niet bij de drempel, maar gaat door met het boogpatroon en blijft vorderen richting de vuurhaard.	Drempel
6	NR3 en 4	Zodra NR1 de vierde keer het commando 'drempel' geeft, gaat NR3 naar binnen en vordert direct naar de vierde drempel. NR3 gaat vanaf deze positie slang aanvoeren. NR4 neemt de positie van NR3 buiten over en voert de straal vanaf buiten aan. Hierbij blijft NR4 weg bij de instroomopening zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	


Stap	Wie	Wat	Commando
7	NR1 en 2	Zodra NR1 en 2 de laatste drempel hebben bereikt (drempel 7, met zicht op de vuurhaard) geeft NR1 dit aan door het commando 'vuurhaard' hardop te geven. <b>NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met de blussing</b> en trekt de straalpijp dicht.	Vuurhaard
8	NR1	Zodra NR1 start met het blussen van de vuurhaard en afkoelen van de omliggende materialen geeft NR1 het commando afblussen.	Afblussen
9	NR1	<ol style="list-style-type: none"> <li>Begin door het geven van twee korte pulsen boven de brandhaard voor het koelen van de rookgassen. <b>Het doel van de pulsen is het afkoelen van de rookgassen zodat deze niet kunnen ontbranden.</b> <i>Instelling: kegelhoek 30°, spuithoek 10°-20° richting plafond en brandhaard, maximaal debiet.</i></li> <li>Bij zichtbare vlammen in de vuurhaard: geef 1 of 2 keer een pencil: Plaats met een gebonden straal korte pakketjes water op de vuurhaard. Dit doet de straalpijpvoerder door zeer kort de straalpijp half open te trekken, en deze te sluiten zodra de waterstraal de vuurhaard raakt, gericht op de kern van de vuurhaard. Deze techniek brengt koelend vermogen in de vuurhaard. Belangrijk hierbij is dat de vuurhaard door de kracht van de straal niet uit elkaar gespoten wordt. <b>Het doel van pencilling is dat de vlammen in de vuurhaard doven.</b> <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, spuithoek richting vuurhaard, half debiet.</i></li> <li>Bij materialen naast of boven de vuurhaard die branden of uitdampen: geef een paint: Plaats met een gebonden straal en een laag debiet een 'streep' water over de uitdampende oppervlaktes in een vegende beweging. <b>Het doel van painting is het afkoelen van materialen en voorkomen/beperken van pyrolyse.</b> <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, spuithoek richting uitdampende oppervlaktes, 10-25% debiet (flush).</i></li> </ol>	
10	NR1	Zodra er geen vlammen meer zichtbaar zijn, geeft NR1 het commando 'knockdown'. De ploeg wacht 30 seconden op eventuele herontsteking. Bij herontsteking herhaalt NR1 stap 12.	Knockdown
11	OL	Wanneer er na 30 seconden geen herontsteking van de vuurhaard optreedt, geeft de OL het commando 'einde experiment'.	Einde experiment
12	NR1, 2,3,4	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang en/of de veiligheidsdeur. NR 3 trekt zich terug via de ingang. NR4 neemt afstand.	
13	NR1, 2,3,4	De NR1, 2, 3 en 4 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	



## Temperatuurcheck

Stap	Wie	Wat	Commando
1	NR1 en 2	Start de temperatuurcheck door het volgen van de deurprocedure vanaf stap 6 tot en met stap 9 (deur openen, korte puls).	
2	NR1	<p>NR1 gaat een klein stukje de ruimte binnen (1 stap) in een knielende houding. NR1 houdt de straalpijp recht omhoog en geeft een korte puls van 1 sec. richting het plafond. Doel is om een oppervlakte van maximaal 1,5 meter doorsnede op het plafond te raken. Er moet worden opgelet of het water verdampt of hoorbaar naar beneden valt.</p> <p><i>Instelling: kegelhoek 10-30°, spuithoek 0° richting plafond, maximaal debiet.</i></p>	
			
3	NR1 en 2	<p>Direct na de temperatuurcheck trekt de straalpijpvoerder zich terug en sluit nr. 2 de deur. Na het sluiten van de deur bespreken de nummers 1 en 2 wat ze hebben gezien en gehoord.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valt het water naar beneden, dan is de temperatuur niet zo hoog en kan de ploeg naar binnen gaan.</li> <li>- Verdamppt het water aan het plafond, dan moet worden gestart met <b>defensieve rookgaskoeling</b>.</li> </ul>	
4	OL	Bij het afronden van de temperatuurcheck OF vorderen in de ruimte OF offensieve rookgaskoeling zal de OL het commando 'einde oefening' geven. Mocht er voldoende brandlast over zijn, dan kan de OL mogelijk besluiten direct een tweede experiment 'deurprocedure' te laten volgen op het zojuist uitgevoerde experiment.	Einde experiment
5	NR1 en 2	De NR1, 2, 3 en 4 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

## Deurprocedure

Stap	Wie	Wat	Commando
1	OL	Attentiesein voor de inzetploeg dat de conditie (>200°C boven plafond) over de gehele lengte van de gang gehaald is, en dat (mits de temperatuur stabiel blijft) de inzet over 1 minuut start.	Attentie, 1 minuut
2	OL, ST	Op het commando 'toegang sluiten' sluit de stoker de ingang deur van de gang.	Toegang sluiten
3	ME	De ME start met aftellen van 2 minuten. 30 seconden voorafgaand aan het einde van de 2 minuten geeft de ME dit door.	
4	OL	Op aangeven van ME geeft de OL het startsein voor de inzet.	Start inzet
5	NR1 en 2	De NR1 controleert de deur op temperatuur door een korte puls te geven op het bovenste deel van de deur. NR2 kijkt naar de draairichting van de deur en de positie van de deurklink en geeft dit door (toedraaiend/afdraaiend, klink links/rechts). <i>Instelling: kegelhoek 30°, maximaal debiet.</i>	
			
6	NR1 en 2	NR1 neemt plaats aan de klinkzijde en NR2 aan de scharnierzijde van de deur. Beiden blijven laag. NR2 is klaar om de deur te openen en de straalpijvoerder heeft zijn straalpijp ingesteld op de juiste instellingen.	

- 7 NR1 NR1 plaatst een koudeblok: geef 2 korte pulsen op de scheiding van de bovenkant deur – kozijn. Begin aan de scharnierzijde, en vervolgens de andere zijde.  
*Instelling: kegelhoek 30°, maximaal debiet.*



- 8 NR2 Op het commando 'open' zet NR2 zet de deur op een kier, dusdanig Open  
wijd dat de straalpijvoerder er precies tussen past. NR2 kijkt naar  
de stroming en rook die mogelijk naar buiten komt en houdt de deur  
tegen met zijn voet.

- 9 NR1 De straalpijvoerder gaat in de deuropening zitten en geeft een korte Dicht  
en 2 puls van 1 seconde in de ruimte. Direct na de puls trekt de  
straalpijvoerder zich terug. Op het commando 'dicht' van NR1 sluit  
NR2 de deur.  
*Instelling: kegelhoek 30°, spuithoek 45°, maximaal debiet.*

- 10 NR1 Na het sluiten van de deur bespreken NR1 en 2 wat ze hebben  
en 2 gezien; zijn er brandstof (rook), stroming en/of vlammen  
waarneembaar?
- Is er geen brandstof (rook) waarneembaar, dan kan de ploeg naar binnen gaan.
  - Is er wel brandstof, dan moet er eerst bij binnentreden de temperatuur worden gecheckt middels een **temperatuurcheck**.
  - Zijn er gloed of vlammen waarneembaar, dan moet worden gestart met **offensieve rookgaskoeling**.



# Bijlage 2 Meetapparatuur

## Temperatuur

Voor het praktijkexperiment zijn type K thermokoppels (een nikkel – chroom en nikkel – aluminium legering (Reotemp, 2018)) met een dikte van 0,75 mm gebruikt. De redenen hiervoor zijn het brede temperatuurbereik (-270°C tot 1260°), snelle responstijd (0,06-1,8 s)<sup>4</sup> en de lage kostprijs. Type K thermokoppels worden ook veel gebruikt bij brandtesten (Zevotek, Stakes, & Willi, 2018; Guillaume, Didieux, Thiry, & Bellivier, 2014). De gebruikte thermokoppels en hun eigenschappen zijn weergegeven in tabel B2.1 respectievelijk tabel B2.2.

Tabel B2.1 Overzicht van de gebruikte thermokoppels

Artikelnummer	Type	Lengte	Diameter
405-279	K RVS 1.4841	1000 mm	0,75 mm
405-280	K RVS 1.4841	1500 mm	0,75 mm
405-282	K RVS 1.4841	2000 mm	0,75 mm
405-283	K RVS 1.4841	3000 mm	0,75 mm

Tabel B2.2 Overzicht van de eigenschappen van de gebruikte thermokoppels

Eigenschap	Waarde
Type	K RVS 1.4841
Responstijd	0,06 – 1,8 s
Gevoeligheid	2,2 °C of 0,75 van de meetwaarde (welke de grootste is)
Resolutie	0,01 °C
Meetbereik	< 1100 °C
Werkbereik	< 135 °C (stekker)
Leverancier	TCDirect

Thermokoppels geven een spanningsverschil bij een temperatuursverandering, en omdat de relatie tussen de spanning en de temperatuur bekend is, kan de gemeten spanning omgezet worden naar een temperatuur.

<sup>4</sup> <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouples-response-time>.

## Straling

Voor het praktijkexperiment zijn twee typen warmtestralingsmeters gebruikt. Op meetlocaties waar een lage stralingsbelasting ( $<5 \text{ kW/m}^2$ ) werd verwacht, zijn watergekoelde Schmidt-Boelter fluxmeters gebruikt en op meetlocaties waar een hoge stralingsbelasting ( $5 - 15 \text{ kW/m}^2$ ) werd verwacht, zijn plaatfluxmeters PTHFM gebruikt. Uitzondering is de meetlocatie op 17 m in de gang, waar een Schmidt-Boelter-fluxmeter met een hoog bereik is gebruikt ( $50 \text{ kW/m}^2$ ) vanwege directe nabijheid van de vuurhaard. In tabel B2.3 en tabel B2.4 is een overzicht weergegeven van respectievelijk de gebruikte warmtestralingsmeters en hun eigenschappen.

**Tabel B2.3** Overzicht van de gebruikte warmtestralingsmeters.

Sensor	Type	Kalibratie waarde
19230802	PTHFM	4067 <sup>5</sup> $\mu\text{V}$
19230803	PTHFM	4067 <sup>5</sup> $\mu\text{V}$
19230804	PTHFM	4062 <sup>5</sup> $\mu\text{V}$
19230806	PTHFM	4063 <sup>5</sup> $\mu\text{V}$
12530	Schmidt-Boelter	0,455 $\pm$ 0,030 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
12420	Schmidt-Boelter	0,529 $\pm$ 0,035 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
12536 <sup>6</sup>	Schmidt-Boelter	0,434 $\pm$ 0,028 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
12537	Schmidt-Boelter	0,415 $\pm$ 0,027 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
1630	Schmidt-Boelter	0,161 $\pm$ 0,010 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$

**Tabel B2.4** Overzicht van de eigenschappen van de gebruikte warmtestralingsmeters

Eigenschap	PTHFM	Schmidt-Boelter	Schmidt-Boelter
Responstijd	1 - 10 s	< 0,45 s	< 0,25 s
Gevoeligheid	(van thermokoppel)	Zoals in tabel B2.2	Zie tabel B2.3
Resolutie	(van thermokoppel)	Zoals in tabel B2.2	Zie tabel B2.3
Type	PLATT-TERMOMETER K	SBG01-005-02	SBG01-100
Bereik	(van thermokoppel)	0 – 5 $\text{ kW}/\text{m}^2$	0 – 50 $\text{ kW}/\text{m}^2$
Werkbereik	< 850 °C < 200 °C (kabel)	< 400 °C (kabel)	< 400 °C (kabel)
Leverancier	Pentronic	Hukseflux	Hukseflux

<sup>5</sup> Criterium  $4096 \pm 62 \mu\text{V}$  (bij 100 °C)

<sup>6</sup> Na de eerste testdag vervangen door 12537 vanwege beschadigingen.

Deze sensoren produceren net als thermokoppels een spanningsverschil waarbij de relatie tussen de spanning en de warmtestraling bekend is.

### Gasconcentraties

In tabel B2.5 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetapparatuur voor gasconcentraties. In tabel B2.6 is een overzicht gegeven van de eigenschappen van de gebruikte meetapparatuur.

**Tabel B2.5 Overzicht van de gebruikte meetapparatuur voor gasconcentraties**

Eigenschap	Testo 350
Leverancier	Testo BV
Aantal	3
Werkbereik	-5 – 45 °C 0 – 70% RH
Beschermingsklasse	IP40

**Tabel B2.6 Eigenschappen van de gebruikte Testo-meetapparatuur**

Gas	Meetbereik	Resolutie	Gevoeligheid	Reactietijd
O <sub>2</sub>	0-25 %Vol	0,01 %Vol	± 0,2 %Vol	< 20 s
CO	0-10000 ppm	1 ppm	± 10 ppm (< 199 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (200 - 2000 ppm) ± 10 % <sup>7</sup> (> 2000 ppm)	< 40 s
CO <sub>low</sub>	0-500 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (> 40 ppm)	< 40 s
NO	0-4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (100 - 2000 ppm) ± 10 % <sup>7</sup> (> 2000 ppm)	< 30 s
NO <sub>low</sub>	0-300 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (> 40 ppm)	< 30 s
NO <sub>2</sub>	0-500 ppm	0,1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (> 100 ppm)	< 40 s
SO <sub>2</sub>	0-5000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % <sup>7</sup> (100 – 2000 ppm) ± 10 % <sup>7</sup> (> 2000 ppm)	< 30 s
CO <sub>2</sub>	0-50 %Vol	0,01 %Vol (< 25 %Vol) 0,1 %Vol (> 25 %Vol)	± 0,3 %Vol ± 1 % <sup>7</sup> ± 0,5 %Vol ± 1,5 % <sup>7</sup>	< 10 s

<sup>7</sup> Van de meetwaarde.

In tabel B2.7 is een overzicht te vinden van de meetlocaties van de Testo-meetapparatuur.

**Tabel B2.7 Overzicht van de gebruikte gasmeters**

Sensor	Meetlocatie	Hoogte (m)
G1	B1	0,30
G2	B2	0,30
G3	B3	0,30

### **Camerabeeld**

Om in kaart te brengen hoe rookverspreiding in de praktijk plaatsvindt, is er ook beeldmateriaal verzameld. Op diverse locaties zijn hiervoor camera's geplaatst die gedurende de testen filmopnames maken. Camera's kunnen actief of passief opnemen:

- > Actief: de opgenomen beelden worden direct naar een registratiecomputer gezonden (bekabeld of draadloos).
- > Passief: de camera's slaan de beelden op een opslagmedium op, dat na een test uitgelezen wordt.

Het voordeel van actief opnemen is dat er live meegekeken kan worden met een test. De nadelen zijn dat er extra kabels gelegd of draadloze verbindingen opgezet moeten worden en dat de beelden op een centrale plek direct moeten worden opgeslagen. Afhankelijk van het aantal camera's en de beeldkwaliteit is daar veel verwerkingscapaciteit voor nodig. De voordelen van passief opnemen zijn dat de beelden direct worden opgeslagen en dat er geen extra voorzieningen nodig zijn. De nadelen zijn dat deze beelden pas na afloop van een test gecontroleerd kan worden en dat de opslagcapaciteit vaak beperkt is.

Er is gekozen voor twee soorten camera's voor het gebruik tijdens de experimenten (zie tabel B2.8 op de volgende pagina):

- > FireCam: deze camera wordt gebruikt dicht bij de vuurhaard, omdat deze (kortstondig) temperaturen tot ruim 400 °C kan weerstaan.
- > Actioncam: deze camera is stof- en waterbestendig en wordt gebruikt op alle overige locaties.

Vanwege de omstandigheden tijdens een test is ervoor gekozen om alle camera passief te laten opnemen. Na afloop van een test zijn de accu's van de camera's vervangen door nieuwe en kunnen de gebruikte accu's opgeladen worden. Alle camera's slaan beelden op op micro-SD-kaartjes.

Tabel B2.8 Overzicht van de gebruikte camera types

Camera's	FireCam	Actioncam
Merk	FireCam	Nikkei
Type	4k wifi	Extreme X8S
Leverancier	SpectraCam	Coolblue
Accuduur	Niet bekend	1.5 uur
Opslagmedium	Micro-SD-kaart	Micro SD-kaart
Capaciteit	16Gb	32Gb
Beeldkwaliteit	4K/Full HD/HD	4K/Full HD/HD
Beeldhoek	150°	170°
Camera	5 megapixels	16 megapixels

## Meetsystemen

Het meten, aflezen en opslaan van de diverse signalen van de sensoren kan op verschillende manieren. Vanwege de hoeveelheid en diversiteit van de sensoren is ervoor gekozen twee meetsystemen parallel te gebruiken:

- > Testo-meetsysteem, voor het registreren van gasconcentraties door Testo-apparaten. Maakt gebruik van de meegeleverde software.
- > Meetsysteem voor de temperatuur, straling en weegschaal.

Het Testo-meetsysteem maakt gebruik van Testo-hardware en -software (zie figuur B2.1), gekoppeld aan een registratiecomputer. De Testo-hardware bestaat uit een gasanalyse-apparaat en een rookgassonde die gasmonsters neemt.



Figuur B2.1 Links: Testo 350 gasanalyseapparaat. Rechts: Testo rookgassonde<sup>8</sup>

<sup>8</sup> <https://www.testo.com/nl-NL/testo-350/p/0632-3510>.

<https://www.testo.com/nl-NL/modulaire-rookgassonde-insteekdiepte-335-mm-incl-conus-t/p/0600-8764>.



De gasanalyseapparaten communiceren middels een CAN-bus signaal en kunnen elkaars signaal doorgeven ('daisy-chaining'). Vanwege praktische beperkingen zijn er twee signaalketens opgezet, ieder met vijf gasanalyseapparaten.

Er is door de Brandweeracademie eerder gebruikgemaakt van een DAQ (data acquisition)-systeem voor het meten van temperatuur en straling. Een DAQ-systeem kan signalen opslaan voor latere analyse (offline) of doorsturen naar een computer met registratiesoftware voor live monitoren (online). Het gebruik hiervan vereist verregaande kennis over het systeem, maar geeft veel flexibiliteit (een DAQ-systeem kan geheel naar wens opgebouwd en uitgebreid worden). De sensoren voor temperatuur, straling en gewicht zijn aan te sluiten op het Compact DAQ systeem in combinatie met LabVIEW-software van National Instruments. Het DAQ-systeem van NI is opgebouwd uit modules in een chassis (zie figuur B2.2), die gekoppeld wordt aan een computer met registratie software.



**Figuur B2.2** Links: Een aantal DAQ-modules.<sup>9</sup> Rechts: Een DAQ-chassis met vier slots voor modules

De modules filteren, versterken en bundelen de signalen van de sensoren en het chassis kan deze doorsturen middels een USB- of Ethernet-signaal. Er is gekozen voor een chassis dat de signalen door kan sturen middels een Ethernet-signaal, zodat de metingen online gevolgd kunnen worden. Ethernet maakt langere afstanden voor signaaloverdracht mogelijk dan USB.

**Tabel B2.9** Overzicht van de gebruikte modules en hun eigenschappen

Module	NI 9202	NI 9212
Kanalen	16	8
Signaaltype	Volt	Temperatuur
ADC	24 bit	24 bit
Resolutie	0,6 $\mu$ V	0,01 $^{\circ}$ C
Werkbereik	-40 – 70 $^{\circ}$ C 10 - 90% RH	-40 – 70 $^{\circ}$ C 10 - 90% RH

<sup>9</sup> [http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/03211720\\_1.jpg&title=cDAQ-9185&oracleLang=i](http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/03211720_1.jpg&title=cDAQ-9185&oracleLang=i)  
<https://www.ni.com/nl-nl/shop/select/c-series-voltage-input-module>.

**Tabel B2.10** Overzicht van de gebruikte chassis en hun eigenschappen

Chassis	NI 9185
Slots	4
Ethernet	10/100/1000 Mbps (auto)
Maximale signaalkabellengte	100 m
Resolutie	32 bits
Werkbereik	-20 – 55 °C 10 - 90% RH

De gebruikte chassis kunnen elkaars signaal doorgeven in een keten (daisy-chaining). Dit heeft als voordeel dat er minder bekabeling nodig is, maar heeft als nadeel dat als een kabel of chassis in de keten uitvalt, alle daaropvolgende signalen ook wegvallen. Er is daarom voor gekozen om ieder chassis te verbinden met een Ethernet switch en vervolgens met de registratiecomputer (stertopologie). Voor het testen, synchroniseren en registreren van alle sensoren van het DAQ-systeem zijn eigen scripts ontwikkeld.

Om alle signaalkabels, voedingskabels en luchtslangen van de diverse systemen te beschermen tegen beschadigingen worden deze zoveel mogelijk over de grond gelegd (waar de laagste temperaturen verwacht worden) en onder een kabelgoot geplaatst. Waar een kabelgoot niet mogelijk is, worden de draden ingepakt met aluminiumfolie of -tape. Evengoed zijn er reguliere inspecties van de verbindingen gehouden en zijn beschadigde kabels vervangen.

### Meetconfiguraties

Voor het bevestigen van verschillende sensoren bij brandexperimenten wordt veelal gebruikgemaakt van een 'thermocouple tree' ofwel thermokoppelboom. Dit is een 'meetboom' waar thermokoppels en overige sensoren aan bevestigd kunnen worden op verschillende hoogtes. Omdat bij de grond de laagste temperaturen verwacht worden, is bij de basis van de boom een afgesloten en geïsoleerde ruimte ontworpen voor het DAQ-chassis. Het DAQ-chassis is hiermee zoveel mogelijk beschermd tegen de invloeden van temperatuur, straling, rook, water en/of stoom. Deze meetbomen zijn vervolgens op de meetlocaties B1 t/m B4 geplaatst. Per meetlocatie is in tabel B2.11 een overzicht gegeven van de sensoren die aan elke meetboom bevestigd zijn.

**Tabel B2.11** Overzicht van de meetbomen en de gemeten parameters

Meetboom	Locatie	Parameter	Hoogte (m)
B1	2 meter in gang	Temperatuur	0,30 - 0,90 - 1,50 - 1,80 – 2,00 - 2,20 - 2,40
		Straling	0,30 - 1,50
		Gasconcentraties	0,30

		Zichtlengte	0,90
B2	7 meter in gang	Temperatuur	0,30 - 0,90 - 1,50 - 1,80 - 2,00 - 2,20 - 2,40
		Straling	0,30 - 1,50
		Gasconcentraties	0,30
		Zichtlengte	0,90
B3	12 meter in gang	Temperatuur	0,30 - 0,90 - 1,50 - 1,80 - 2,00 - 2,20 - 2,40
		Straling	0,30 - 1,50
		Gasconcentraties	0,30
		Zichtlengte	0,90
B4	17 meter in gang	Temperatuur	0,30 - 0,90 - 1,50 - 1,80 - 2,00 - 2,20 - 2,40
		Straling	0,30 - 1,50

### Mogelijke meetfouten

Zoals beschreven in de onderzoekopstelling heeft elke sensor een gevoeligheid en resolutie. De gevoeligheid van een sensor geeft de mate van betrouwbaarheid van een meting weer. Als bijvoorbeeld een thermokoppel met een gevoeligheid van 1.6 °C wordt blootgesteld aan een temperatuur van 100 °C, kan het thermokoppel een temperatuur aangeven tussen de 98.4 en 101.6 °C. De resolutie van een sensor geeft de kleinste verandering weer die een sensor kan meten. Een thermokoppel met een resolutie van 0.1 °C zal bijvoorbeeld een temperatuursverandering van 0.02 °C niet kunnen registreren.

Daarnaast heeft elke sensor een responstijd, de tijd die de sensor nodig heeft om een verandering in signaal te registreren. Deze tijd is sterk afhankelijk van het type sensor en kent bovendien verschillende definities.

Voor alle sensoren geldt dat de gevoeligheid, resolutie en responstijd klein genoeg moeten zijn om de gewenste processen te meten. Omdat er in dit experiment met name scenario's met elkaar zijn vergeleken, zijn de gevoeligheid en resolutie van minder belang. De processen die in dit experiment zijn onderzocht, vinden plaats op erg wisselende tijdschalen. De resultaten zijn daarom teruggebracht tot tijdsvakken van minuten. De responstijden van de sensoren kunnen oplopen tot maximaal 1 minuut. Dit betekent, met name voor resultaten gebaseerd op gasconcentraties, dat de gerapporteerde tijden overschat kunnen zijn en dus gezien moeten worden als een maximum.

De gebruikte thermokoppels hebben een gevoeligheid van 2.2 °C of 0.75% van de meetwaarde (welke de grootste is) en een resolutie van 0.1 °C. De hoogste gemeten

temperaturen bedroegen rond de 400 °C. De meetfout bij deze temperaturen bedroeg dus ongeveer 3 °C. De thermokoppels hebben temperaturen gemeten in het bereik van 20 °C tot 400 °C. In dit bereik is een resolutie van 0.1 °C ruim voldoende. De responstijd van de gebruikte thermokoppels is maximaal 1.8 s. Omdat in de analyse wordt gerekend met tijdvakken in minuten is de vertraging in het gemeten signaal van de thermokoppels verwaarloosbaar klein.

De plaatfluxmeters hebben dezelfde eigenschappen als de gebruikte thermokoppels, omdat deze stralingsmeters gebruikmaken van eenzelfde type K thermokoppel. De gevoeligheid en resolutie van de thermokoppels werken door via de gebruikte formule voor straling en leiden tot een gevoeligheid en resolutie van  $\ll 1 \text{ W/m}^2$ . De straling is met de plaatfluxmeters gemeten in een bereik van 0.45 tot 10 kW/m<sup>2</sup>. De meetfout is hierbij dus verwaarloosbaar klein. De responstijd van plaatfluxmeters is wel langer dan die van de thermokoppels vanwege de warmtecapaciteit van de plaat. Dit heeft echter geen noemenswaardige invloed op de resultaten, omdat straling op eenzelfde wijze wordt ervaren door een persoon.

De Schmidt-Boelter fluxmeters hebben ieder hun eigen gevoeligheid en resolutie. Ze hebben een maximale gevoeligheid van ongeveer 1 W/m<sup>2</sup>. De resolutie wordt bij deze meters hoofdzakelijk bepaald door het meetsysteem en bedroeg ongeveer 1 W/m<sup>2</sup>. De straling is met de Schmidt-Boelter fluxmeter gemeten in een bereik van 0 tot > 1000 W/m<sup>2</sup>. De meetfout is ook hierbij dus verwaarloosbaar. De responstijd van de Schmid-Boelter fluxmeter is < 1 s en dus ook verwaarloosbaar klein.

De Testo-meetapparatuur heeft voor verschillende gassen verschillende gevoeligheden en resoluties. De grenswaarden van deze gassen voor het berekenen van de overlevingscondities zijn dusdanig hoog dat resolutie en gevoeligheid een verwaarloosbare invloed hebben op de meetresultaten. De Testo-apparatuur heeft voor verschillende gassen verschillende responstijden. Deze kunnen oplopen tot maximaal 40 s. Dit betekent dat er een vertraging zit in de gemeten gasconcentraties.

## Dataverwerking en datatransformatie

### LabView

De ruwe data zijn eerst gecontroleerd door vast te stellen dat alle sensoren op de juiste kanalen zijn aangesloten geweest en te bepalen of de kanalen de juiste benaming hebben voor de verdere analyse. Vervolgens zijn de data ingelezen met behulp van eigen ontwikkelde scripts in Python 3.7.0. Op de voltagedata is een slepend gemiddelde toegepast. Dit introduceert een vertraging in de data, wat wil zeggen dat de data worden 'teruggeschoven' met de breedte van het gemiddelde. De gebruikte gemiddeldes zijn weergegeven in tabel B2.12.

**Tabel B2.12 Gebruikte slepende gemiddelden**

Sensor	Slepend gemiddelde (in meetpunten)
Straling (Schmidt-Boelter)	101

Vervolgens zijn de databestanden gecombineerd en geconverteerd naar de juiste eenheden. De temperatuurdata zijn al in de juiste eenheid gemeten, maar de straling en voltages zijn omgerekend naar straling (kW/m<sup>2</sup>). Hiervoor is gebruikgemaakt van de kalibraties en

referentiebestanden van de specifieke sensoren. Een overzicht daarvan is hieronder per grootte weergegeven.

### Straling

De berekening van de straling  $\phi$  in  $W/m^2$  op een bepaald tijdstip is voor de plaatfluxmeters weergegeven in vergelijking 1 (Wickström, Anderson, & Sjöström, 2019):

$$\phi = (5.67037 \cdot 10^{-8} \cdot T_{pt}^4) - \left(76 \cdot (0.5(T_{pt} + T_{air}))^{-0.66}\right) \cdot \frac{|T_{pt} - T_{air}|^{1/3}}{\varepsilon} \cdot (T_{air} - T_{pt})$$

### Vergelijking 1 Omrekening plaattemperatuur naar straling

Hierin zijn  $T_{pt}$  en  $T_{air}$  de temperatuur van de plaat respectievelijk de omgeving in Kelvin.  $\varepsilon$  is de emissiecoëfficiënt volgens de volgende formule (zie vergelijking 2):

$$\varepsilon = \min(1.03 - 0.436 \cdot 10^{-3} \cdot T_{pt}, 1)$$

### Vergelijking 2 Formule emissiecoëfficiënt

Voor  $T_{air}$  wordt de temperatuur van het thermokoppel op gelijke hoogte met de plaatfluxmeter genomen.

De berekening van de straling  $\phi$  in  $W/m^2$  op een bepaald tijdstip is voor de Schmidt-Boelter stralingsmeters weergegeven in vergelijking 3:

$$\phi = \frac{U}{S}$$

### Vergelijking 3 Omrekening watergekoelde stralingsmeters

Hierin is  $U$  het gemeten voltage in Volt en  $S$  is de gevoeligheid van de meter. Deze zijn weergegeven in tabel B2.13.

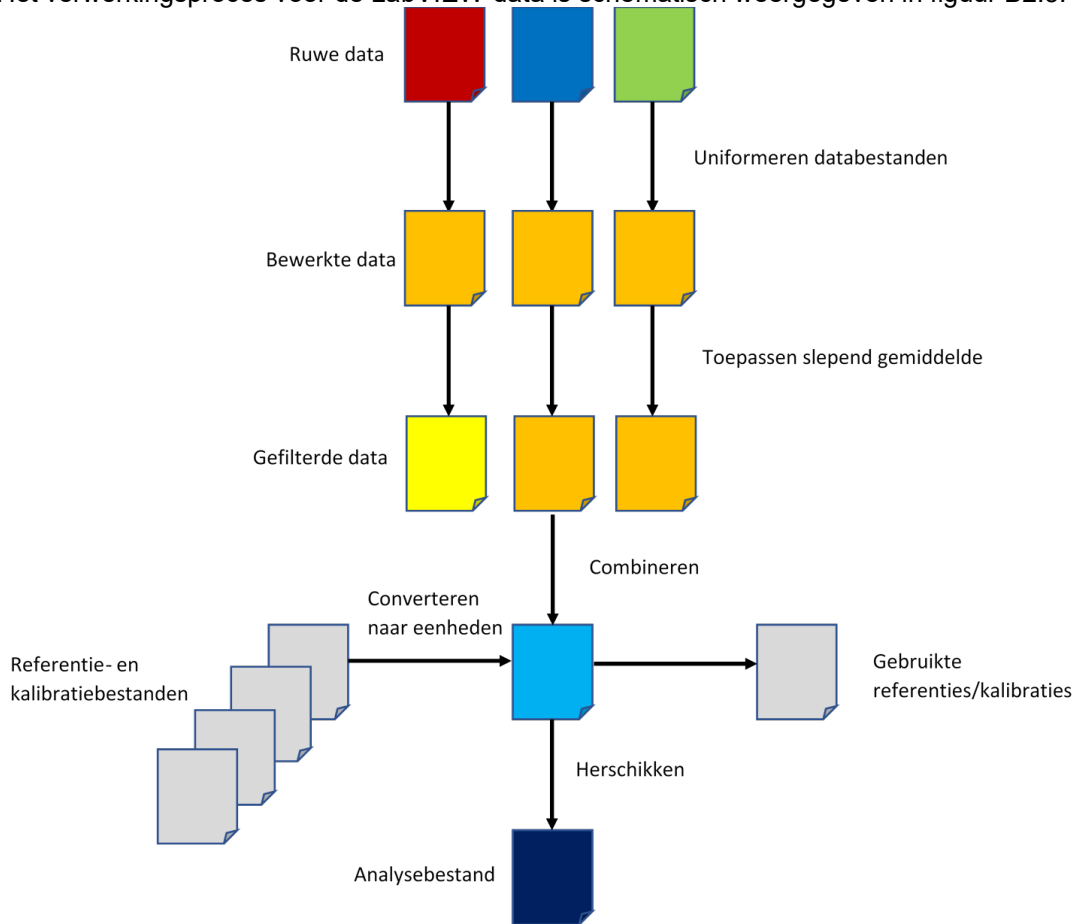
**Tabel B2.13 Gevoeligheid per stralingsfluxmeter**

Stralingsmeter	Gevoeligheid $S$ ( $V/W/m^2$ )
B1 – 0,30 m (SB1.2)	$4,55 \cdot 10^{-6}$
B2 – 0,30 m (SB2.2)	$5,29 \cdot 10^{-6}$
B3 – 0,30 m (SB3.2)	$4,34 \cdot 10^{-6}$ $4,15 \cdot 10^{-6}$
B4 – 0,30 m (SB4.2)	$1,61 \cdot 10^{-6}$

<sup>10</sup> Alleen bij experimenten van dag 14 oktober 2019 (HD lesstof 3D test 1 & 2 en LD 250 lesstof 3D test 1 & 2).

### Verwerkingsproces LabView

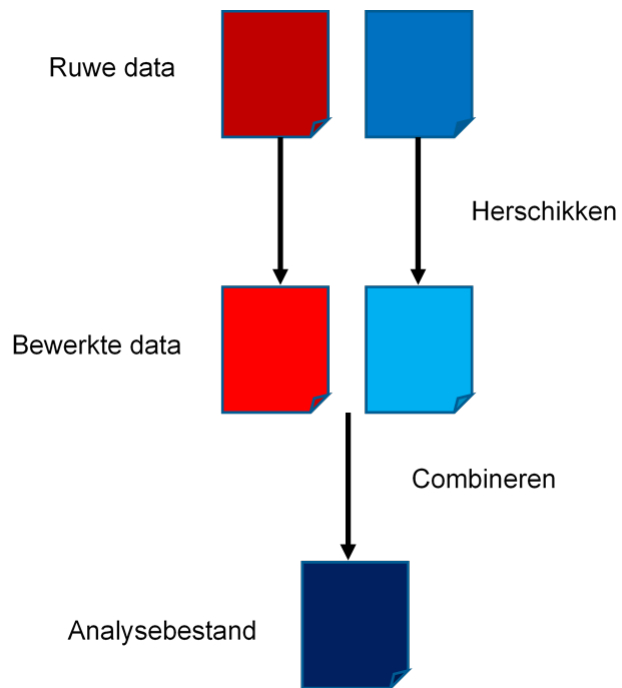
Als laatste zijn alle data herschikt naar een meetfrequentie van 1 Hz (1 meting per seconde) tot een compleet bestand per experiment. Dit bestand is gebruikt voor de verdere analyse. Het verwerkingsproces voor de LabVIEW-data is schematisch weergegeven in figuur B2.3.



Figuur B2.3 Schematische weergave van de verwerking van LabVIEW-data

### Verwerkingsproces Testo-data

In de gebruikte configuratie heeft de Testo-meetapparatuur een meetfrequentie van 1/3 Hz (1 meting per 3 seconden) (Testo SE & Co, KGaA, 2005). Hierdoor kan een verschil ontstaan in de metingen van de twee configuraties van max 1 s. De ruwe data zijn daarom ingelezen met een eigen ontwikkeld script in Python 3,7,0 en eerst herschikt naar het dichtstbijzijnde 1/3 Hz-tijdstip na de start van de test. Zo kunnen de beide configuraties gecombineerd en vergeleken worden. Dit gecombineerde bestand is gebruikt voor de verdere analyse. Het verwerkingsproces voor de Testo-data is schematisch weergegeven in figuur B2.4.



**Figuur B2.4** Schematische weergave van de verwerking van Testo-data

# Bijlage 3 Vragenlijst

## Subjectieve beleving thermoregulatie, pijn en inspanning

### 1. Thermische sensatie

**Hoe warm voel je je nu?**

-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Koud	Koel	Enigszins koel	Niet warm, niet koud	Enigszins warm	warm	Heet	Zeer heet	Ondraaglijk heet

### 2. Thermisch comfort

**Hoe beoordeel je de mate van (dis)comfort door warmte op dit moment?**

0	1	2	3	4
Neutraal	Licht oncomfortabel	Oncomfortabel	Zeer oncomfortabel	Zeer, zeer oncomfortabel

### 3. Huidvochtigheidssensatie

**Hoe vochtig voelt je huid nu?**

0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Neutraal (niet droog niet nat)		Vochtig		Nat		Zeer nat

### 4. Pijnsensatie:

**Hoeveel pijn voel je nu?**

0	1	2	3	4
Geen pijn	Enigszins pijnlijk	Pijnlijk	Zeer pijnlijk	Zeer, zeer pijnlijk



5. Ervaren inspanning

**Hoeveel inspanning ervaar je nu?**

6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Geen enkele inspanning	Extreem licht		Zeer licht		Licht		Een beetje zwaar		Zwaar		Zeer zwaar		Extreem zwaar	Maximaal

6. **Op welk moment ervoer je de meeste warmte?**

*Open vraag*

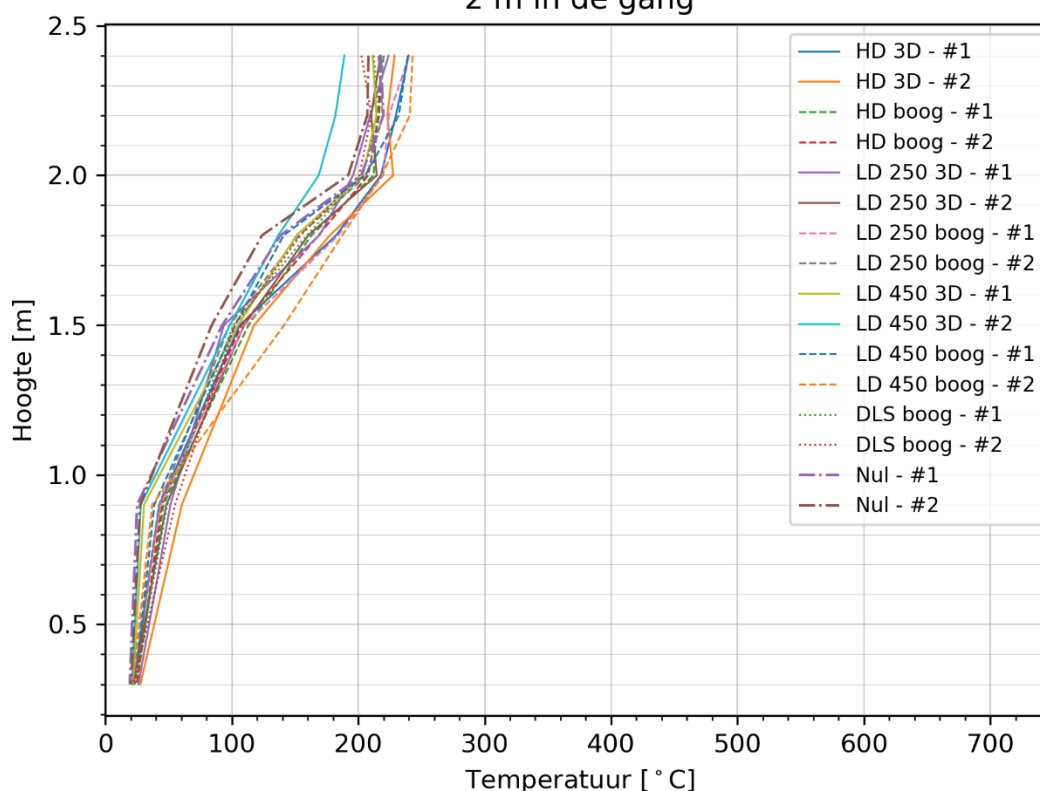
7. **Wat veroorzaakt volgens jou het meeste discomfort?**

*Open vraag*

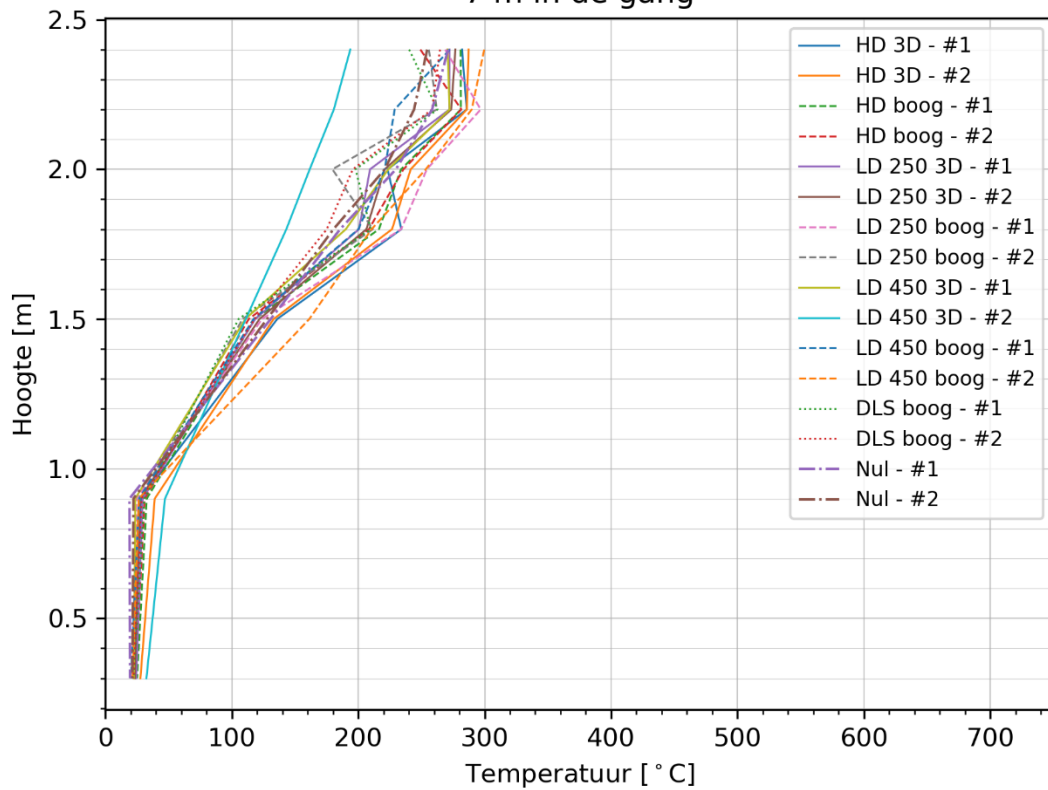
# Bijlage 4 Herhaalbaarheid

In de onderstaande figuren is de temperatuurverdeling weergegeven als functie van de hoogte voor alle experimenten op het moment dat de inzet gestart wordt. Elke meetlocatie is apart weergegeven. De temperatuurverdelingen tussen 1,20 m en 2,40 m hoogte liggen dicht bij elkaar, wat betekent dat de startcondities vergelijkbaar zijn. Er zijn wel duidelijke verschillen te zien tussen de meetlocaties in de gang. Zo zijn de temperaturen dichterbij de vuurhaard hoger en zijn verschillen in de temperatuurverdeling daardoor groter.

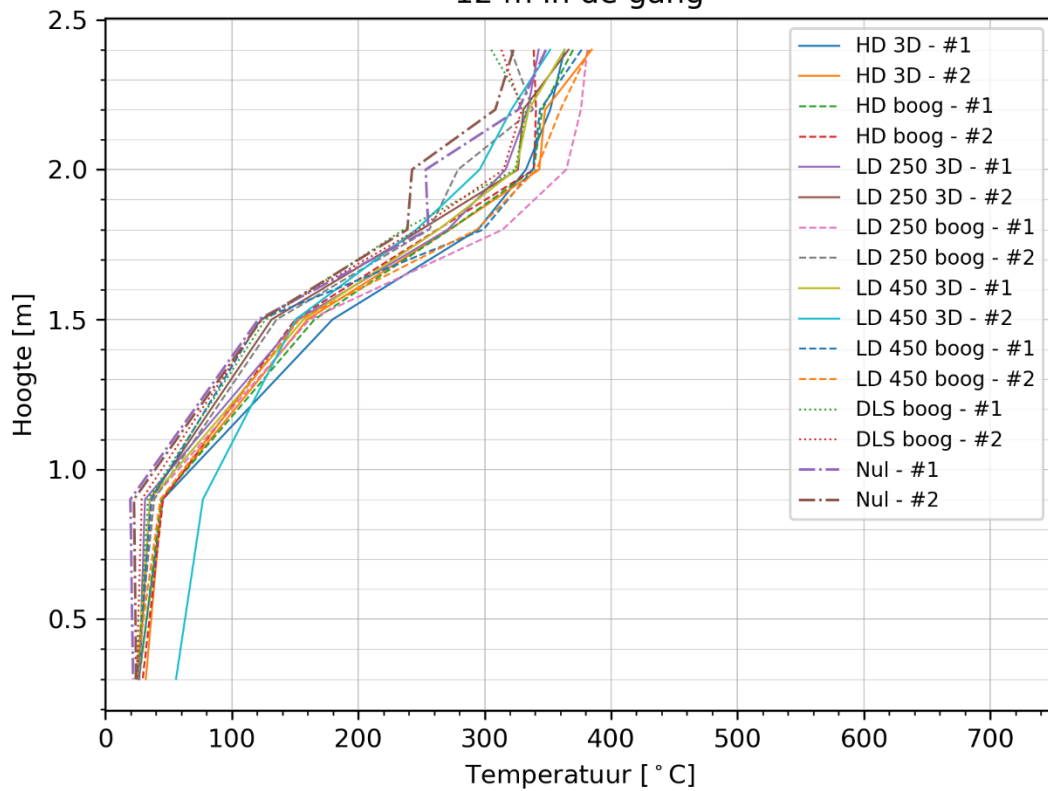
Temperatuurverdeling bij start inzet  
2 m in de gang



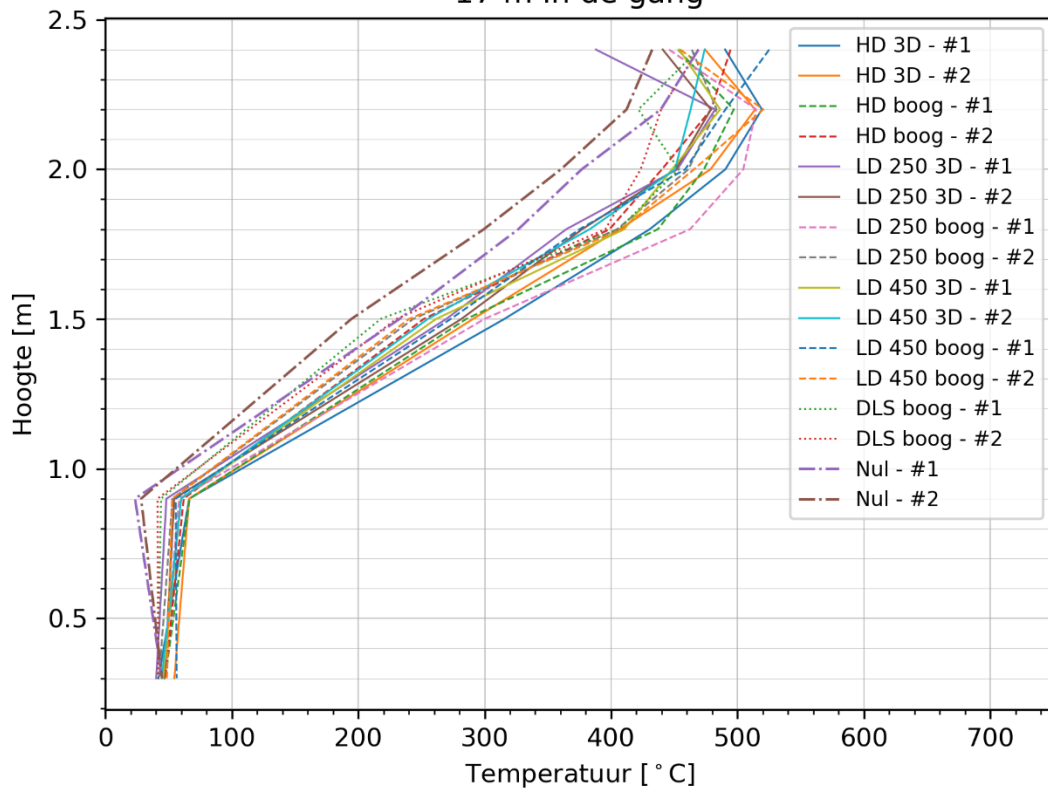
Temperatuurverdeling bij start inzet  
7 m in de gang



Temperatuurverdeling bij start inzet  
12 m in de gang

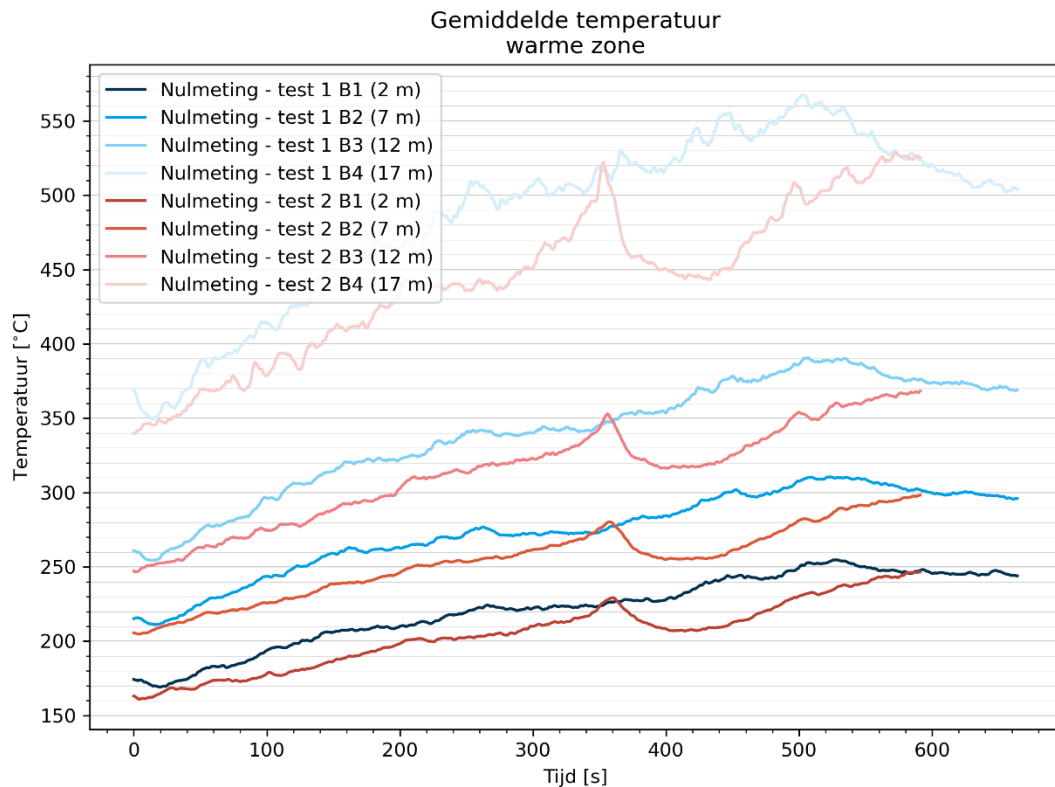


### Temperatuurverdeling bij start inzet 17 m in de gang

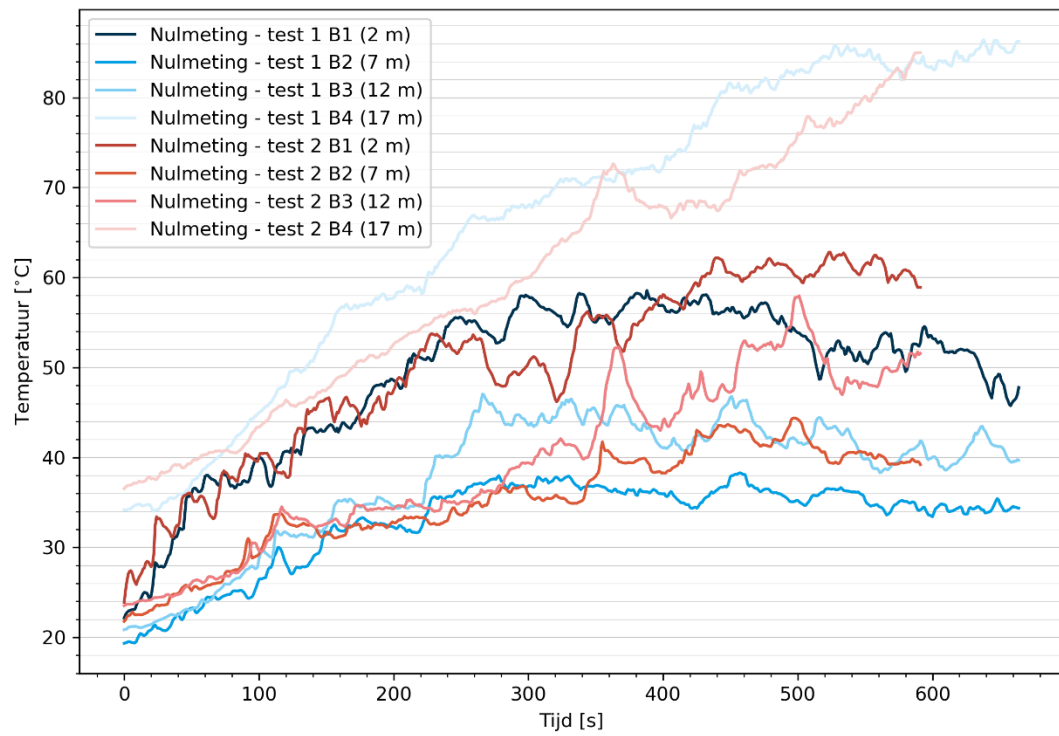


# Bijlage 5 Nulmeting

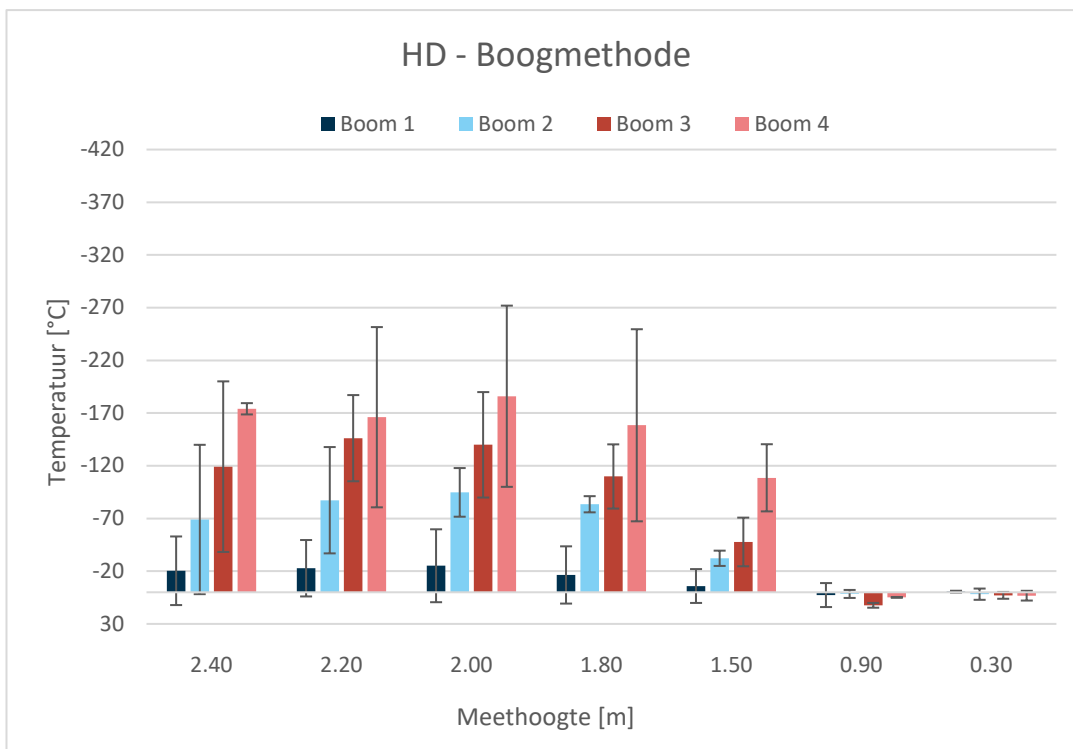
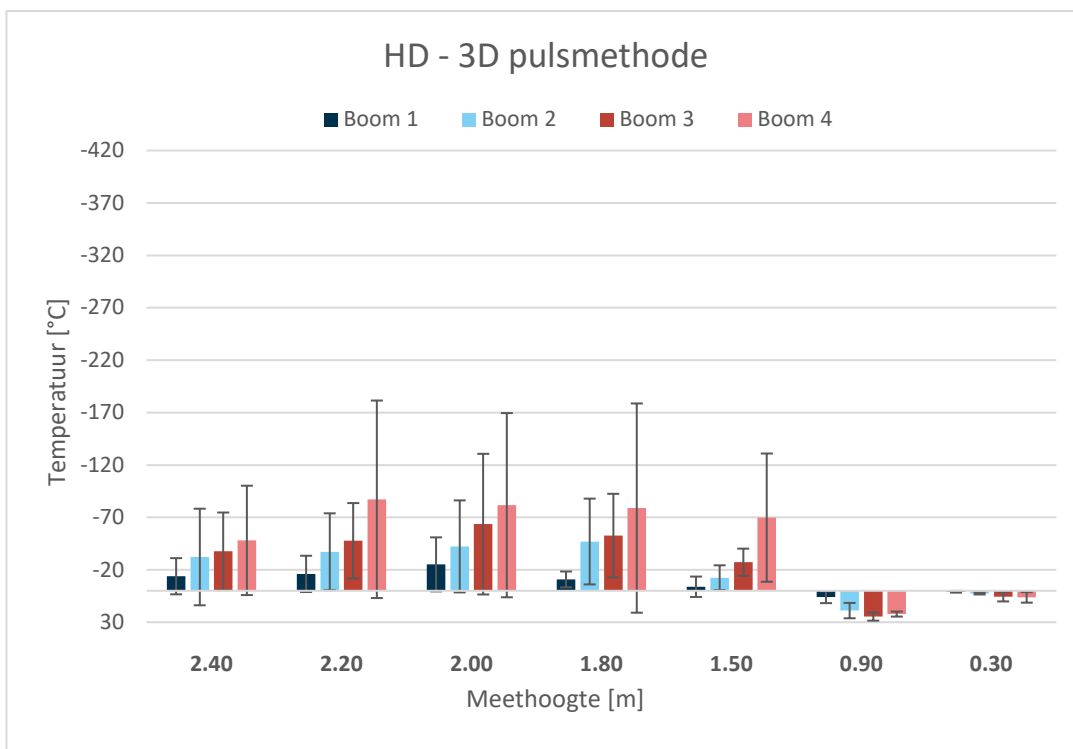
Om te bepalen of de gemeten effecten veroorzaakt zijn door de verschillende inzettechnieken, zijn twee nulmetingen uitgevoerd. Het doel van de nulmetingen is om vast te stellen wat het resultaat is wanneer er geen interventie inclusief rookgaskoeling plaatsvindt. In lijn met de verwachting neemt de temperatuur en daarmee de energie tijdens de nulmeting overal toe.

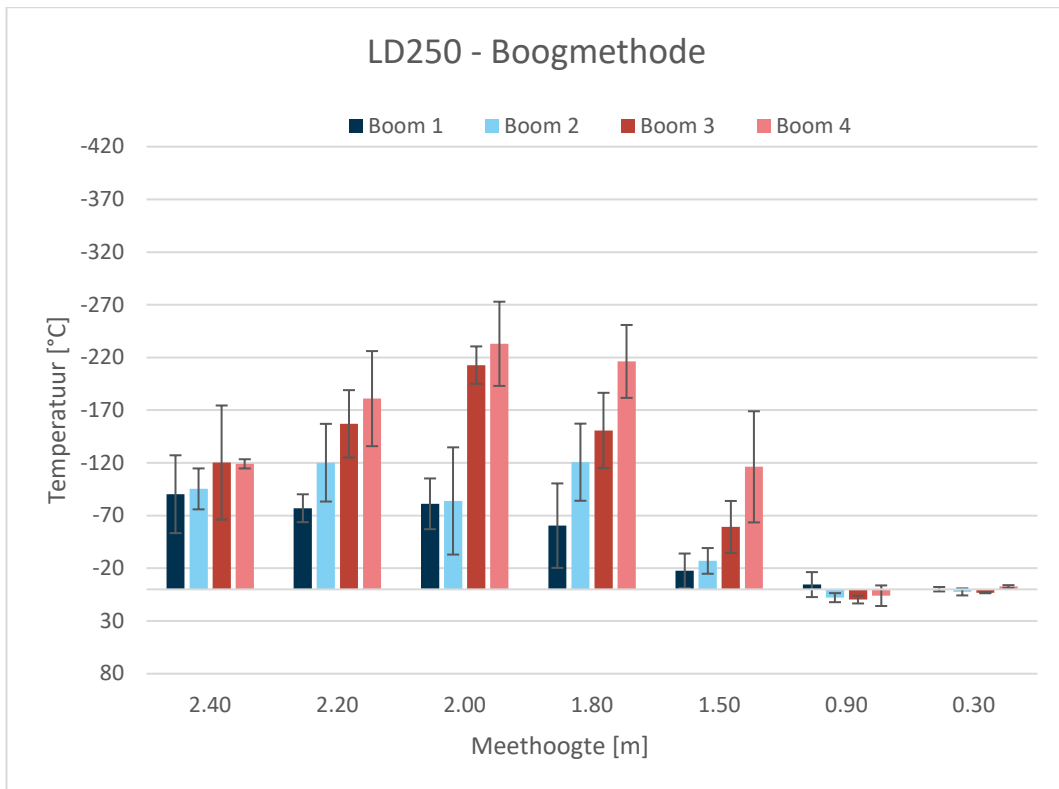
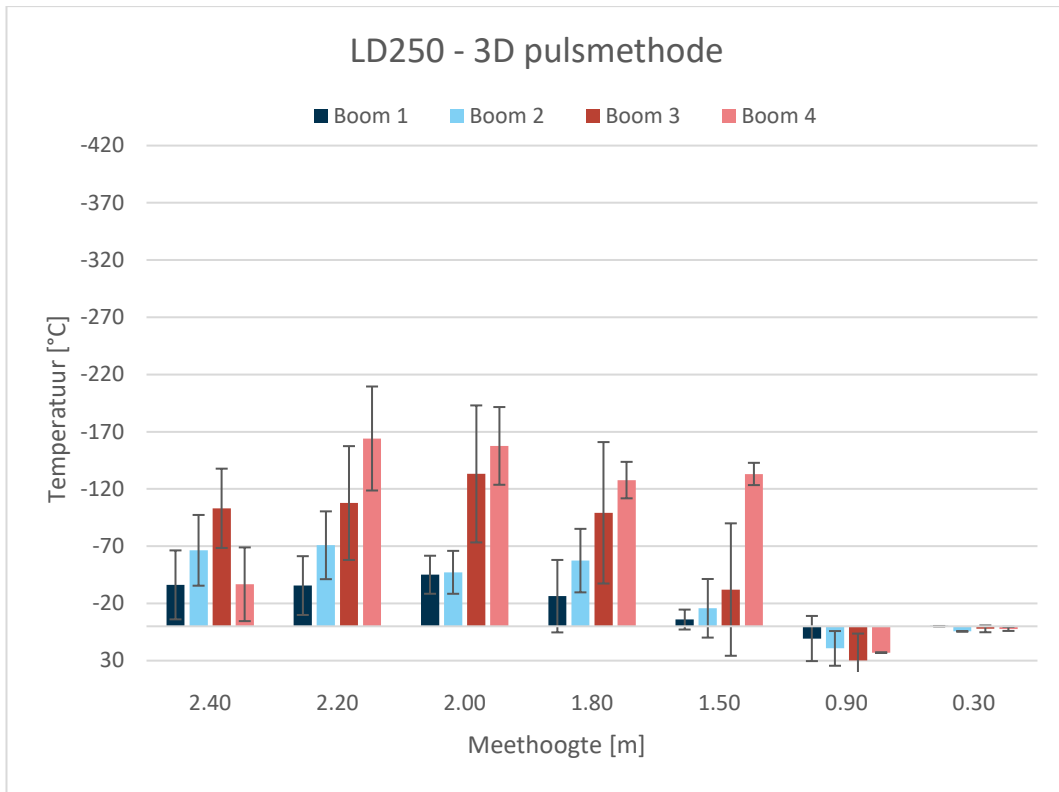


### Gemiddelde temperatuur koude zone

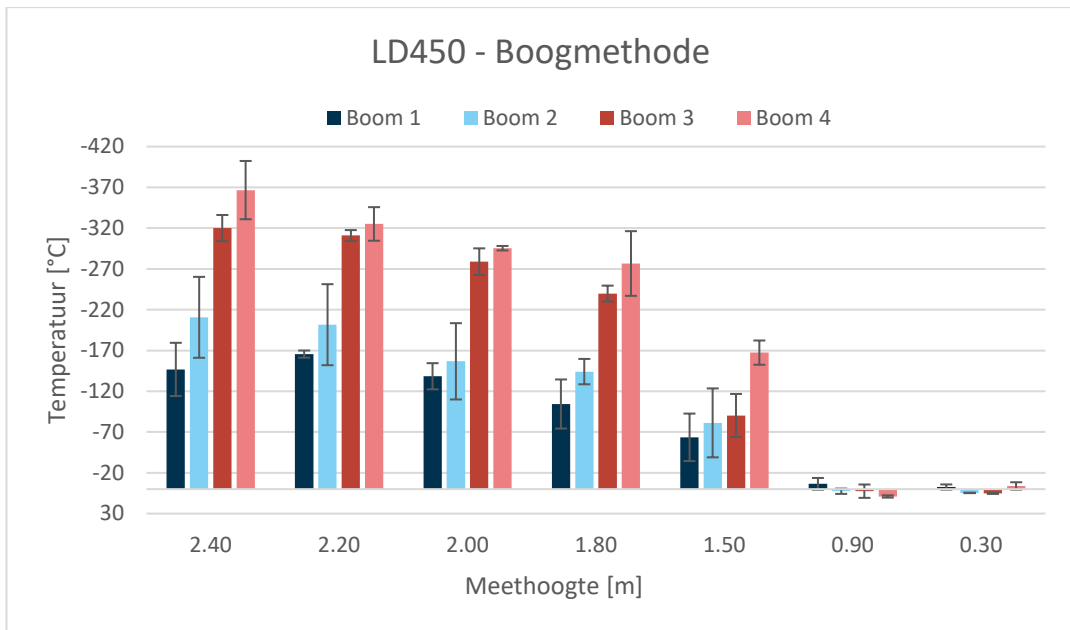
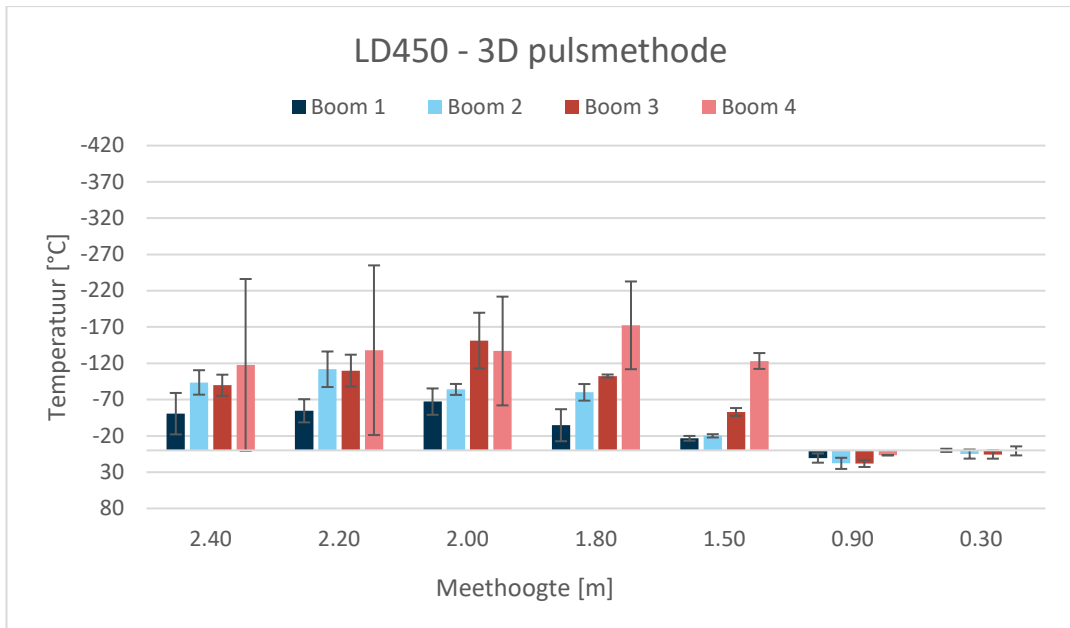


# Bijlage 6 Temperatuur versus hoogte

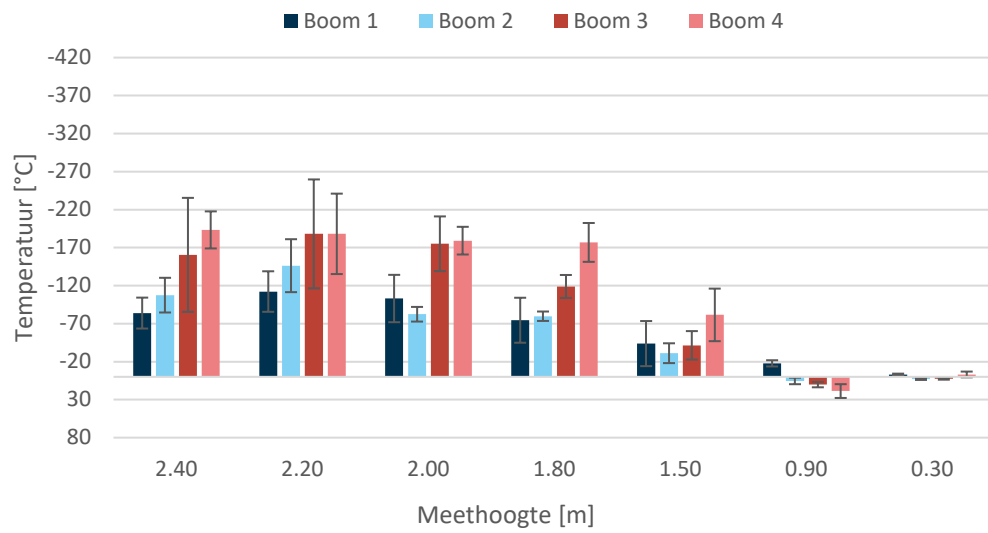






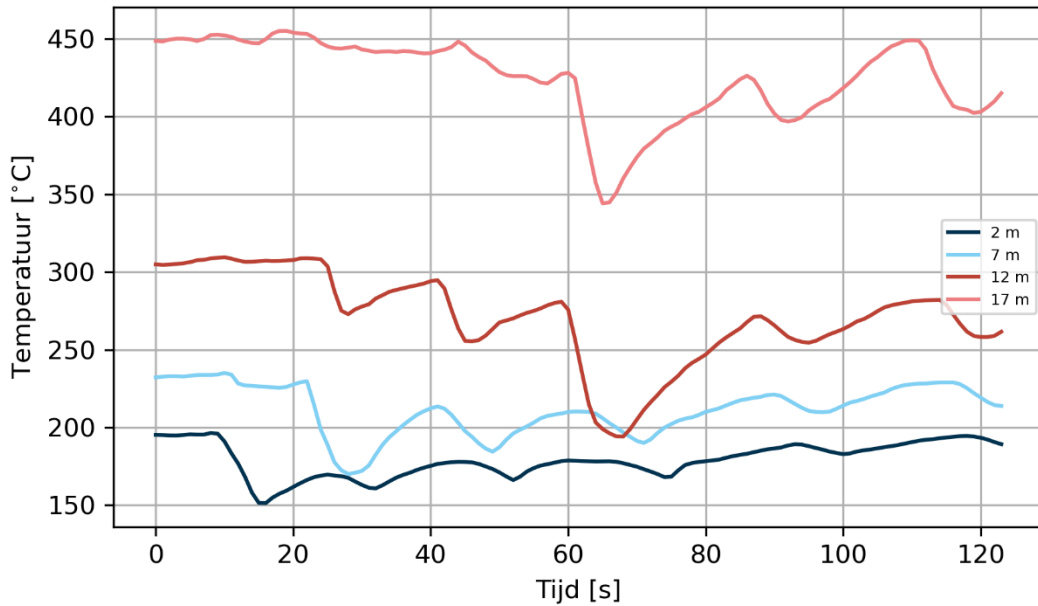


## DLS - Boogmethode

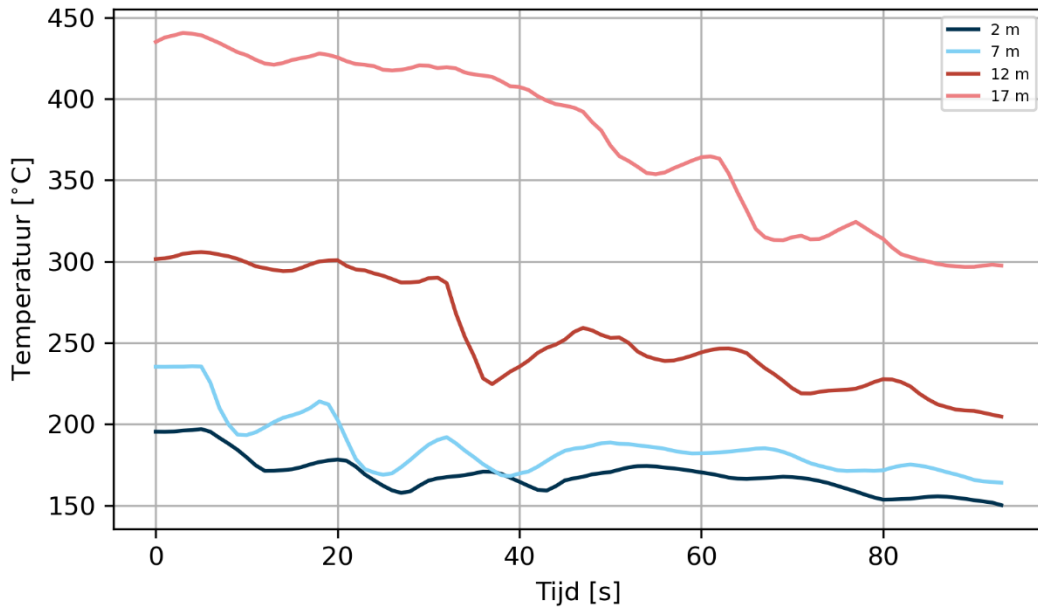


# Bijlage 7 Voorwaartse en achterwaartse koeling

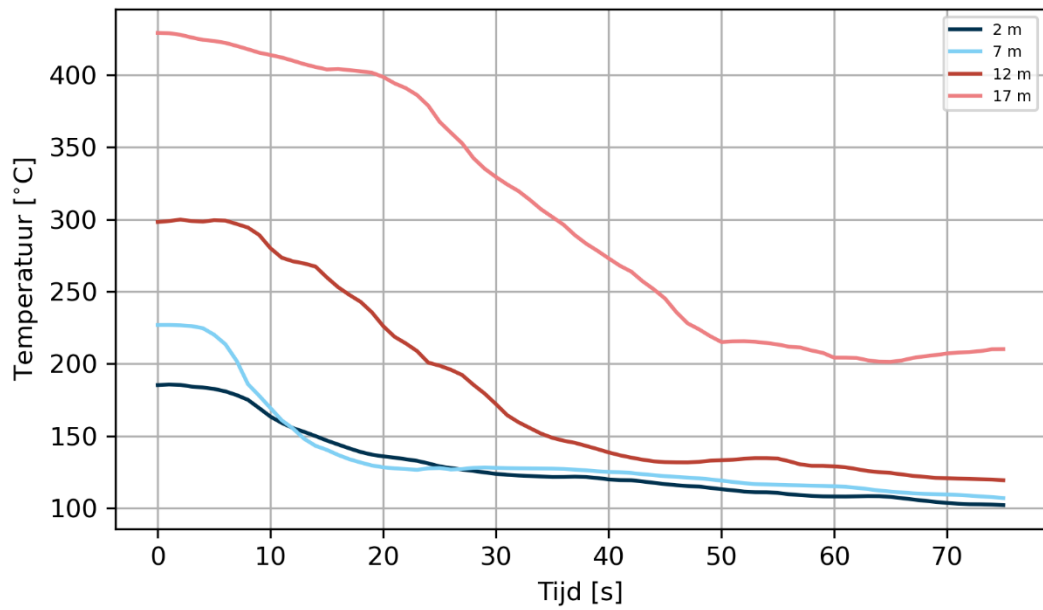
Temperatuur warme zone  
HD lesstof 3D - test 1



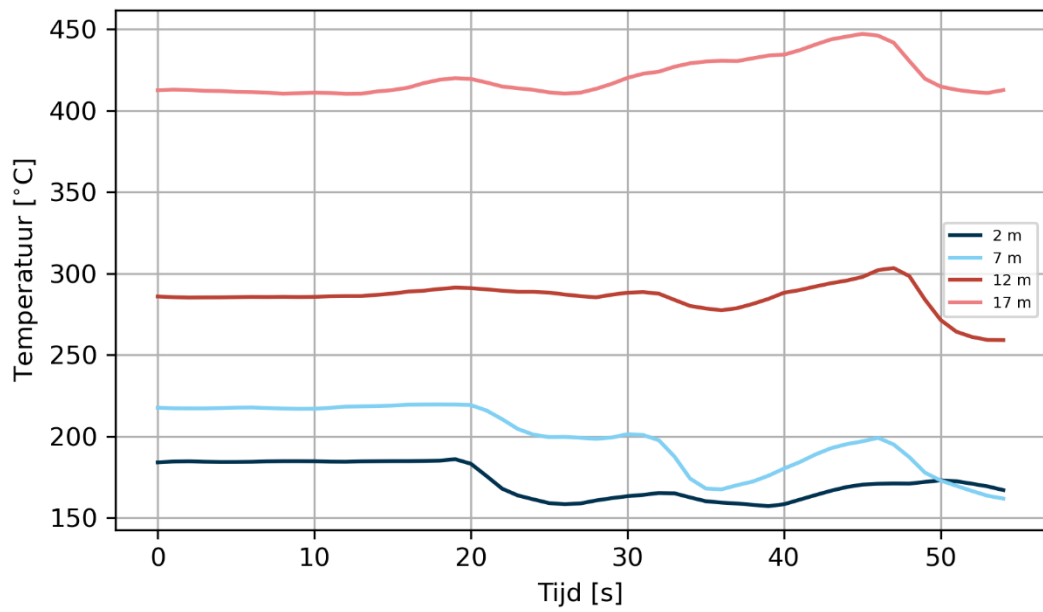
Temperatuur warme zone  
HD lesstof 3D - test 2



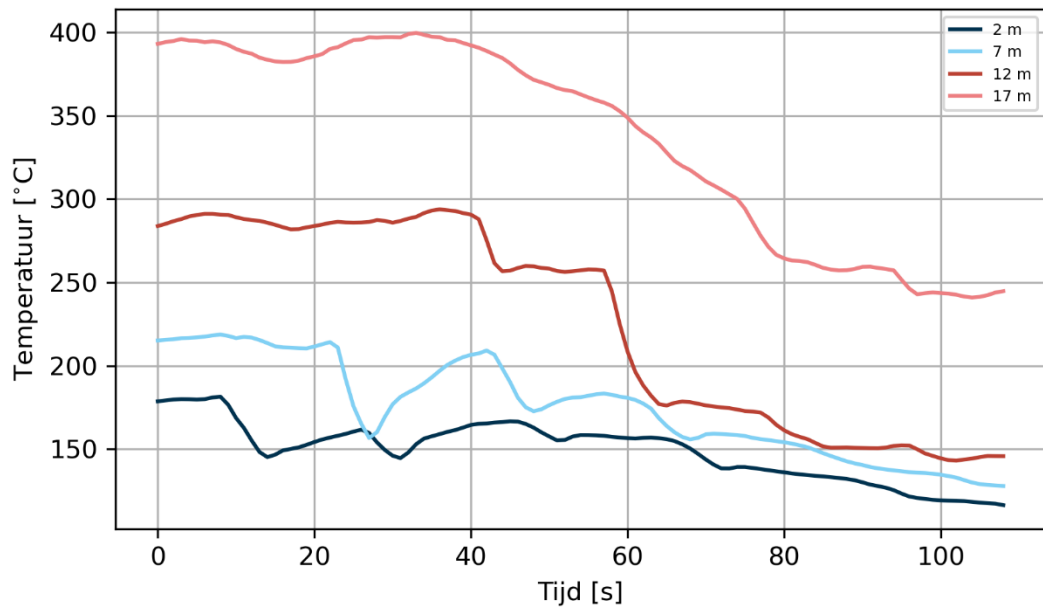
Temperatuur warme zone  
HD halve maan - test 1



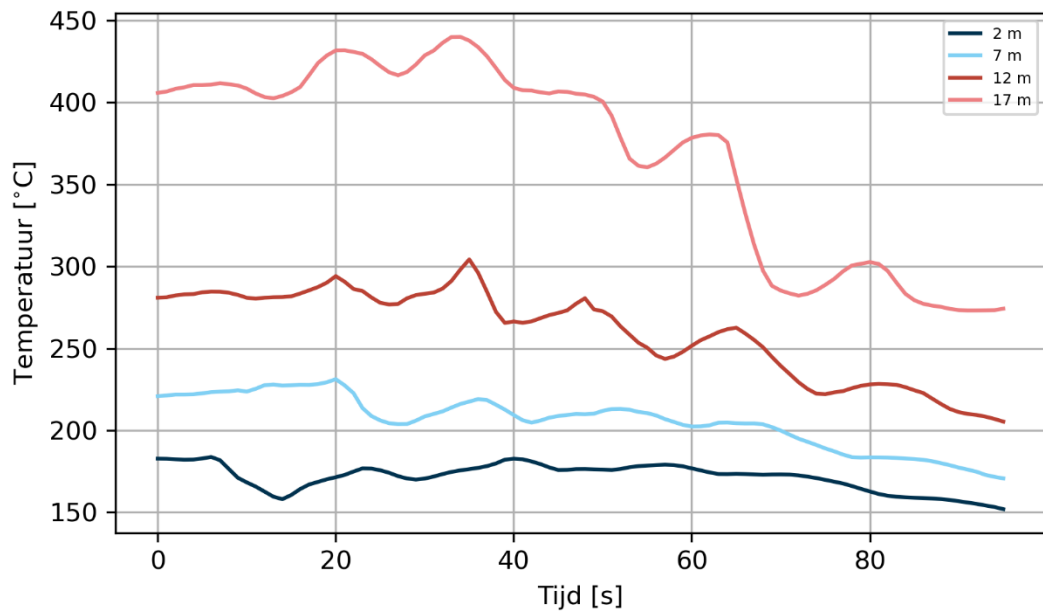
Temperatuur warme zone  
HD halve maan - test 2



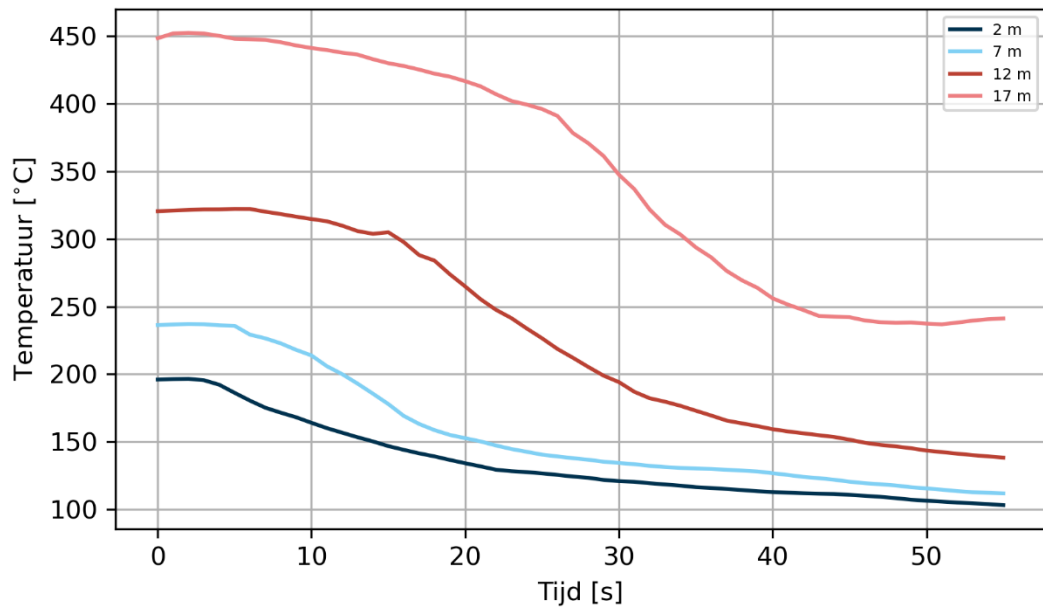
Temperatuur warme zone  
LD 250 lesstof 3D - test 1



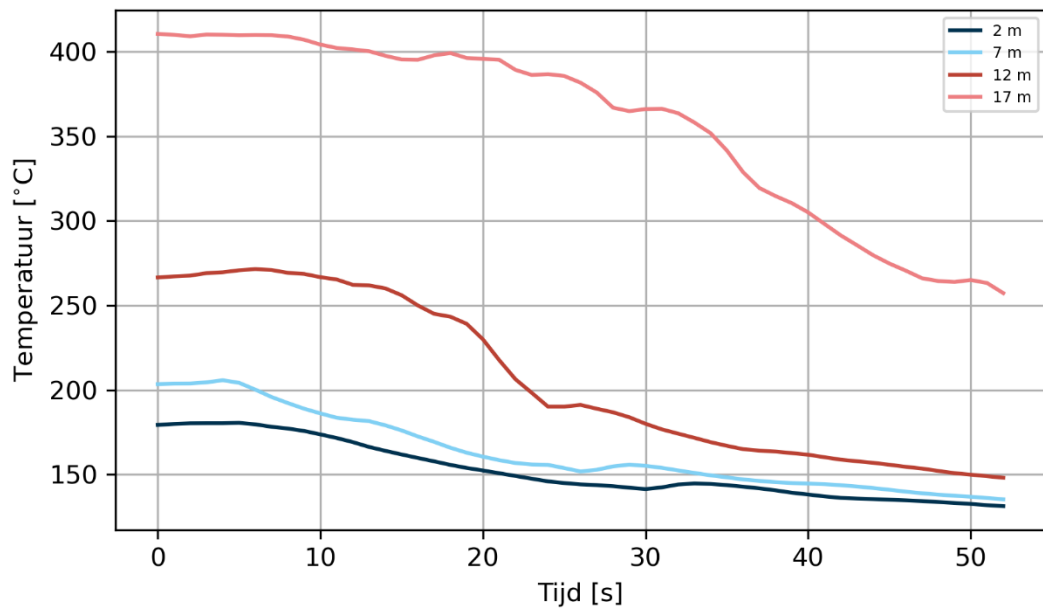
Temperatuur warme zone  
LD 250 lesstof 3D - test 2



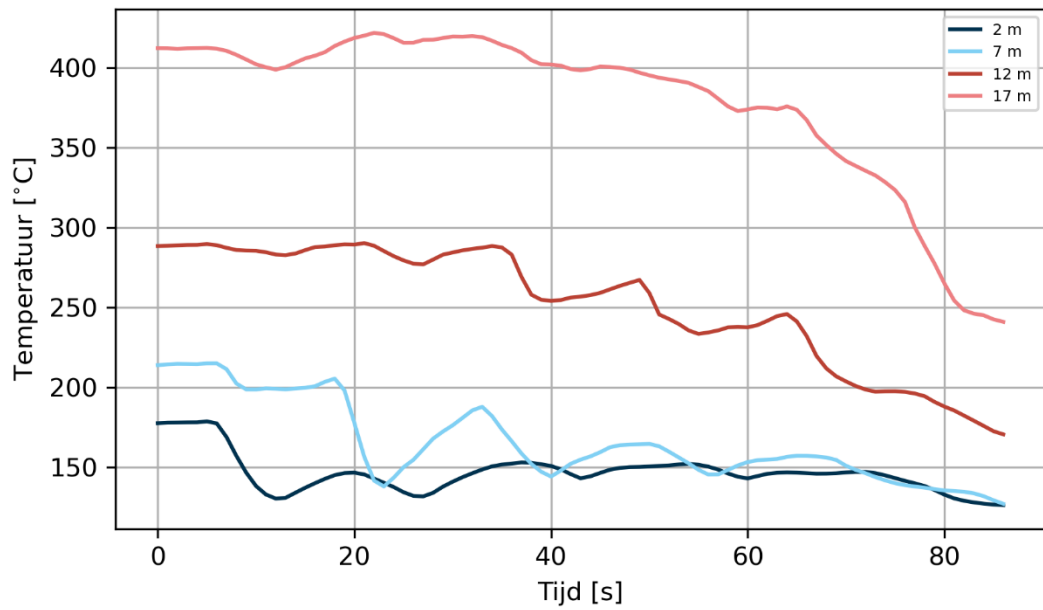
Temperatuur warme zone  
LD 250 halve maan - test 1



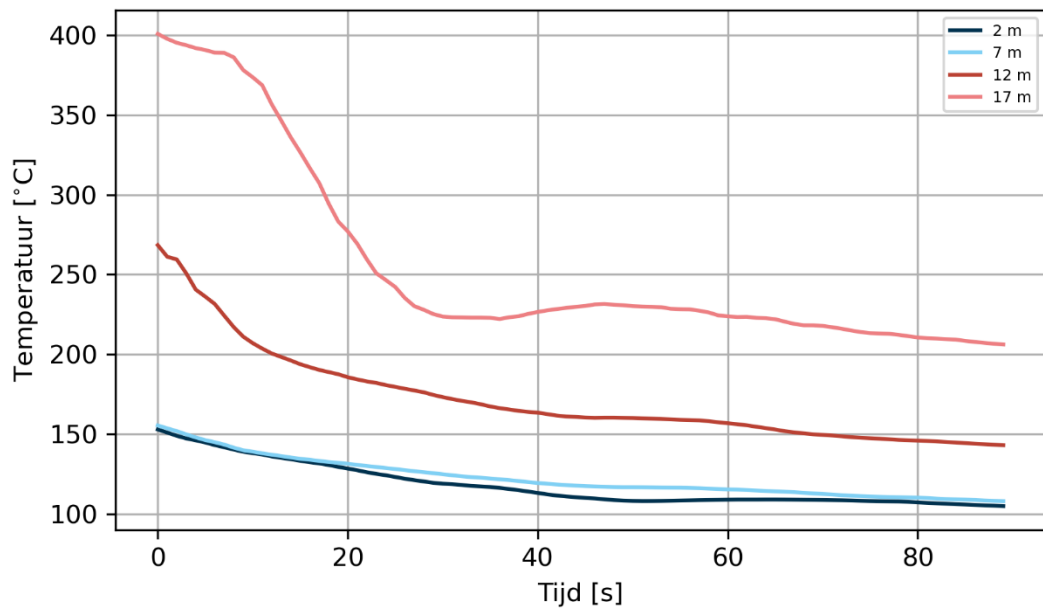
Temperatuur warme zone  
LD 250 halve maan - test 2



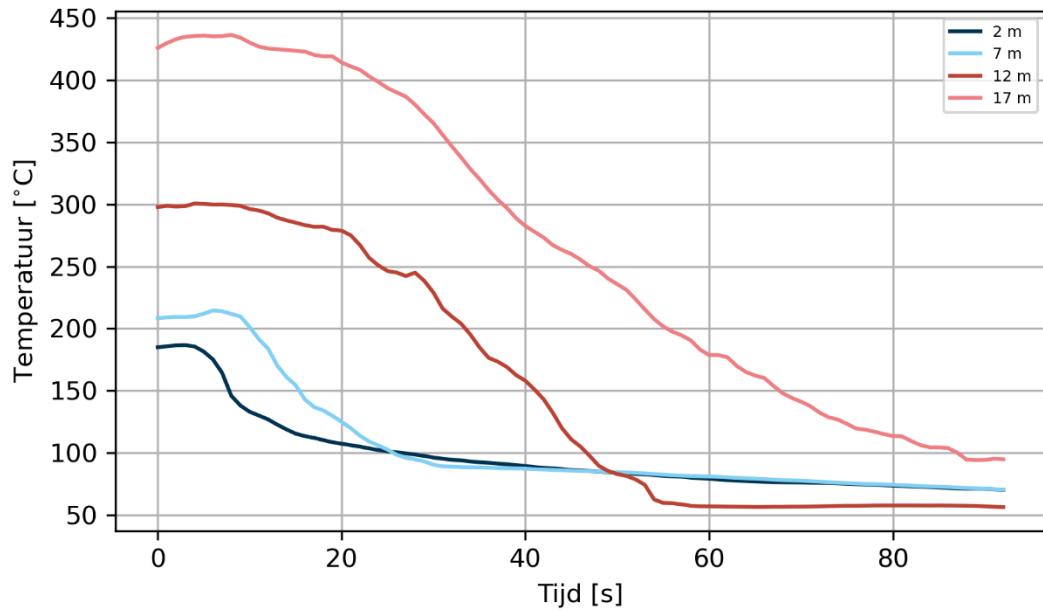
Temperatuur warme zone  
LD 450 lesstof 3D - test 1



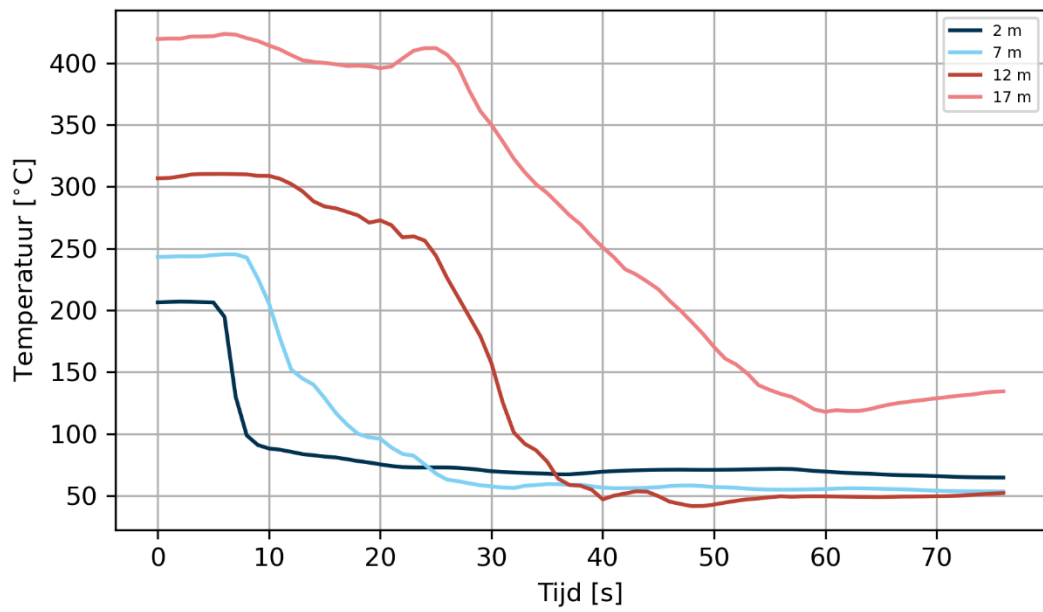
Temperatuur warme zone  
LD 450 lesstof 3D - test 2



Temperatuur warme zone  
LD 450 halve maan - test 1

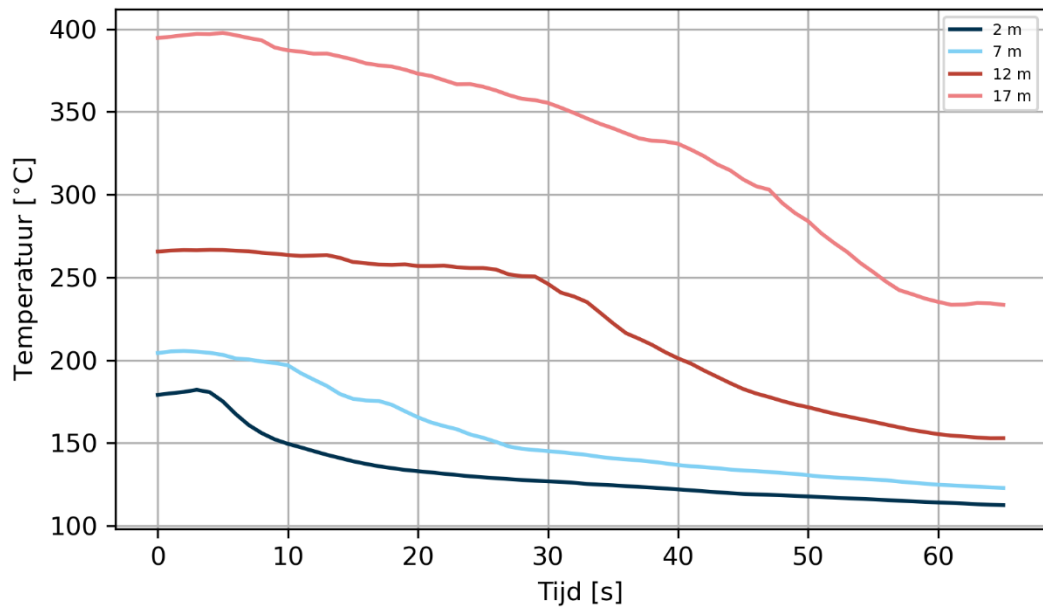


Temperatuur warme zone  
LD 450 halve maan - test 2

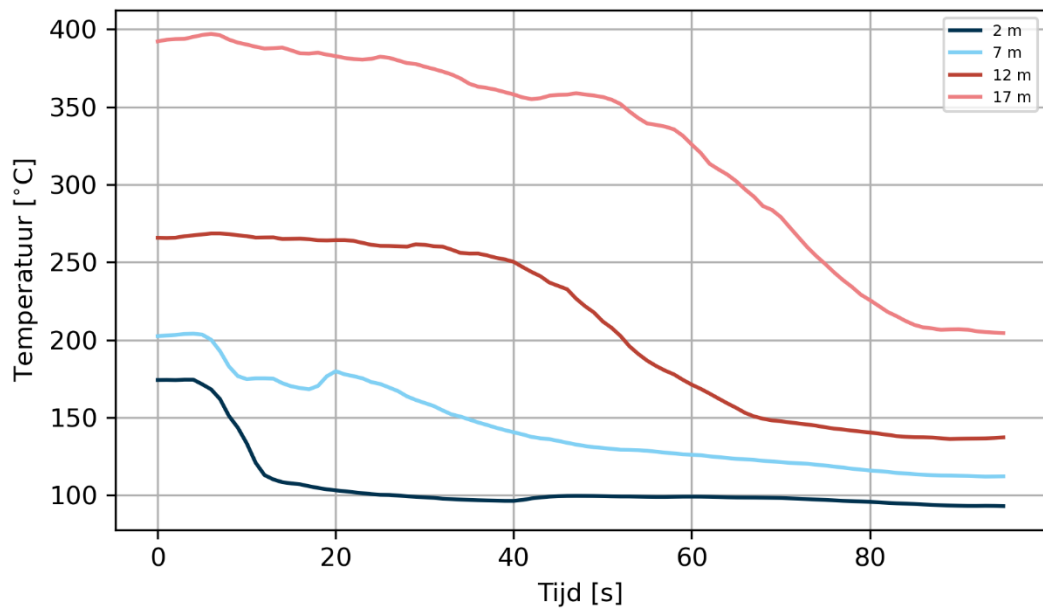




Temperatuur warme zone  
DLS halve maan - test 1



Temperatuur warme zone  
DLS halve maan - test 2



# Bijlage 8 Veiligheid brandweerpersoneel

Voor de veiligheid van brandweerpersoneel is gebruik gemaakt van het stralingsdeel uit de FEDheat methode, waarbij voor de bepaling van de blootstelling een formule is ontwikkeld. Deze formule is gebaseerd op de blootstelling aan stralingswarmte volgens onderstaande tolerantie (Brandweeracademie, 2016):

- Maximale stralingsbelasting van 3 kW/m<sup>2</sup> gedurende 20 minuten
- Maximale stralingsbelasting van 4,6 kW/m<sup>2</sup> gedurende 5 minuten

Met deze twee punten wordt een formule opgesteld met de vergelijking:

$$t_{irad} = a \cdot q^b$$

Hierin is  $t_{irad}$  de tijd in minuten voor de radiatieve component van straling,  $q$  de straling in kW/m<sup>2</sup> en  $a$  en  $b$  de coëfficiënten die bepaald moeten worden.

Het volgende stelsel van vergelijkingen kan dan worden opgelost:

$$20 = a \cdot 3^b$$

$$5 = a \cdot 4,6^b$$

Hieruit volgt dat:

$$a = \frac{5}{4,6^{\left(\frac{\log\left(\frac{20}{5}\right)}{\log\left(\frac{3}{4,6}\right)}\right)}} \approx 705,405$$

$$b = \frac{\log\left(\frac{20}{5}\right)}{\log\left(\frac{3}{4,6}\right)} \approx -3,243$$

Hieruit volgt dat:

$$t_{irad} = 705,405 \cdot q^{-3,243}$$

De dosis op tijdstip T wordt dan berekend middels:

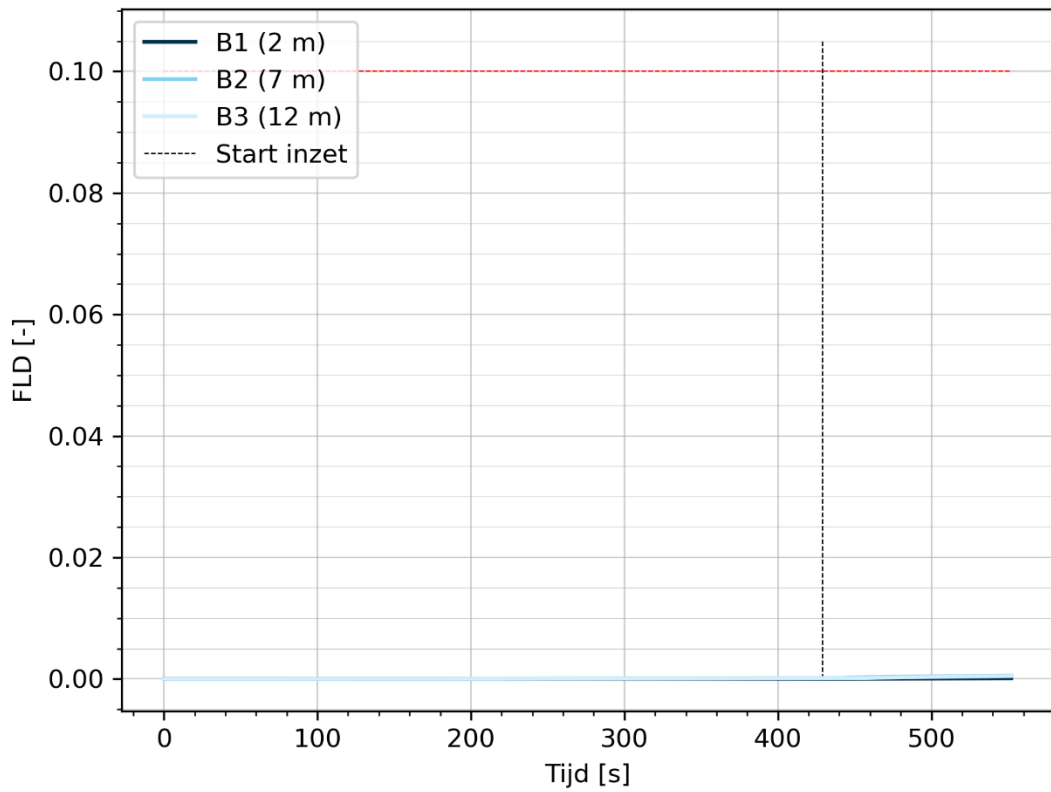
$$FED_{heat} = \sum_{t_i}^{t_2} \frac{1}{t_{irad}} \Delta t$$

# Bijlage 9 Veiligheid slachtoffers

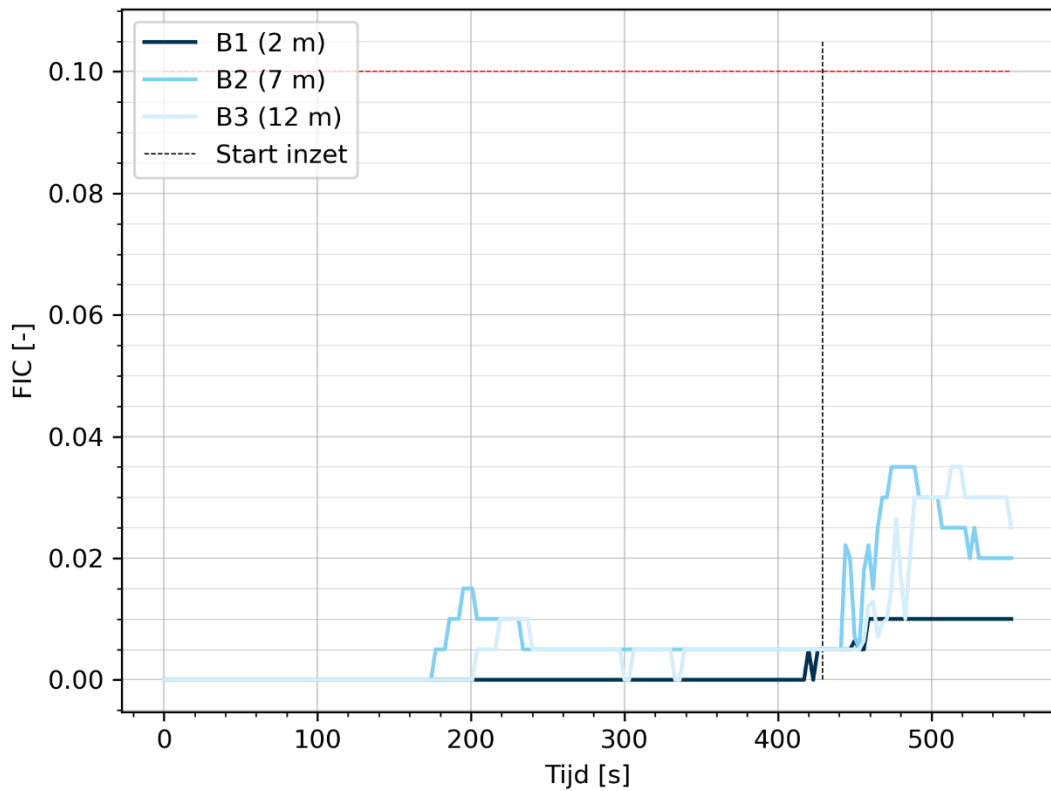
In deze bijlage zijn voor alle experimenten alle methoden voor het berekenen van de veiligheid voor slachtoffers uit het SFPE-handboek (Purser & McAllister, 2016) weergegeven.

De rode horizontale stippellijnen geven de grenswaarden voor de verschillende groepen weer (zie ook Tabel 1.4 Overzicht van grenswaarden volgens het SFPE-handboek). De tijd begint bij het ontsteken van de brandhaard.

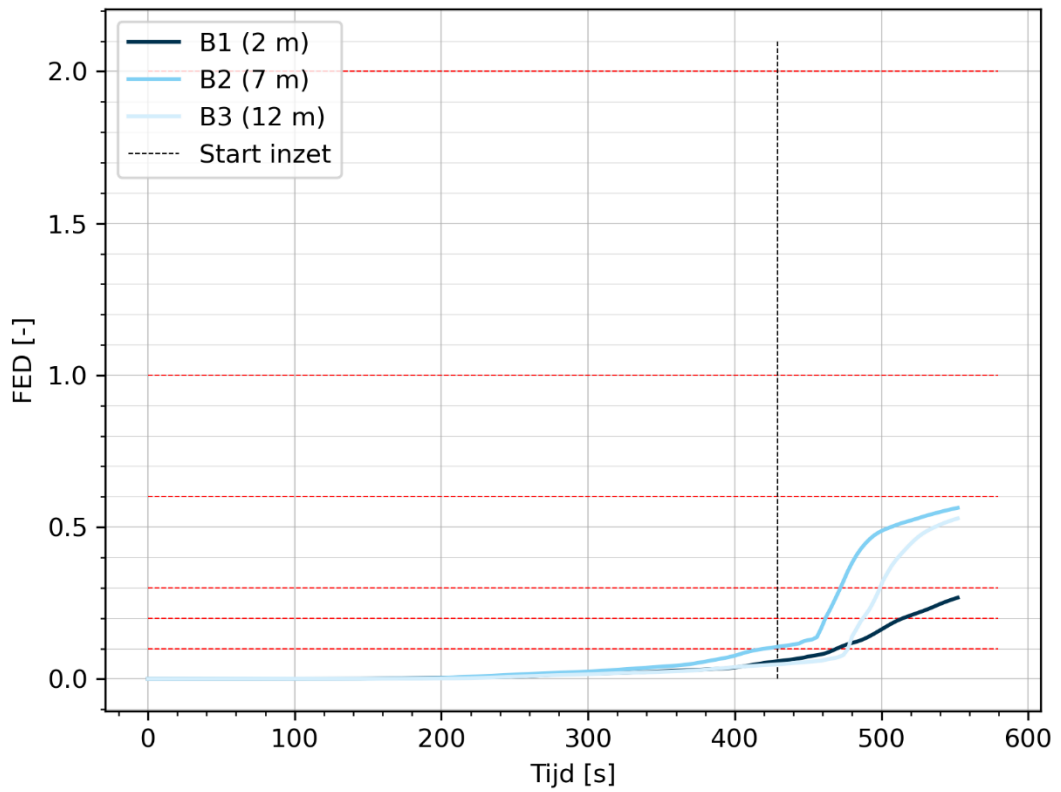
### Irriterende gassen (dosis) HD lesstof 3D - test 1



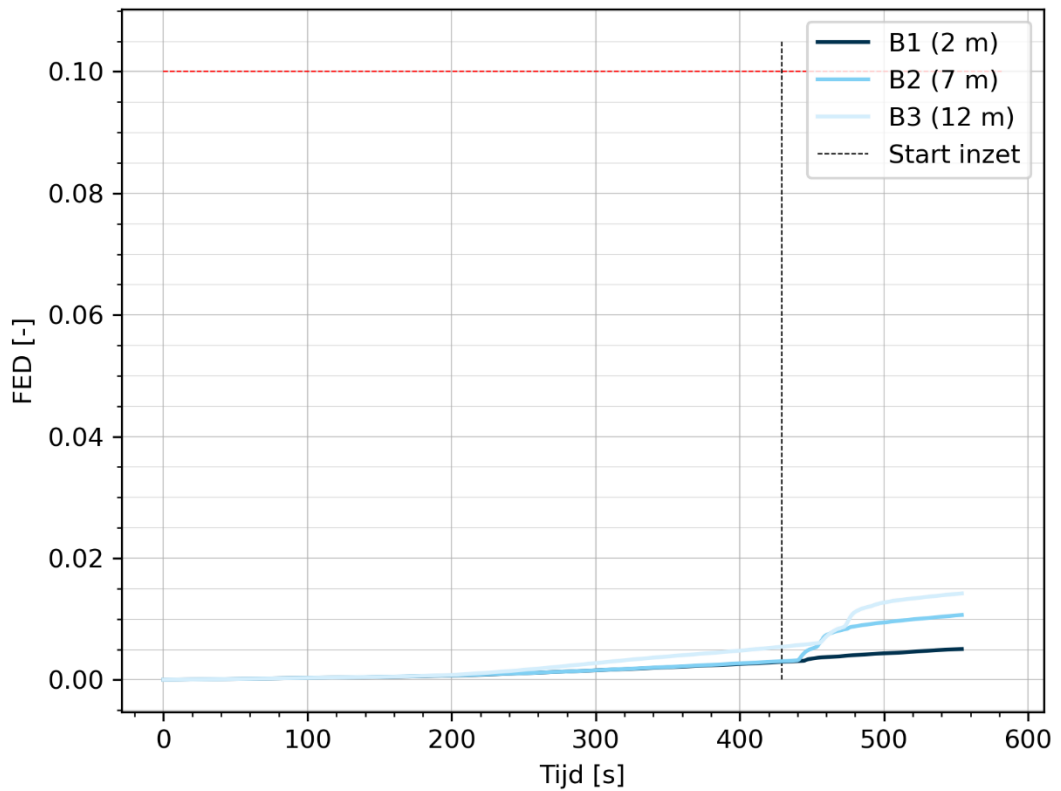
### Irriterende gassen (concentratie) HD lesstof 3D - test 1



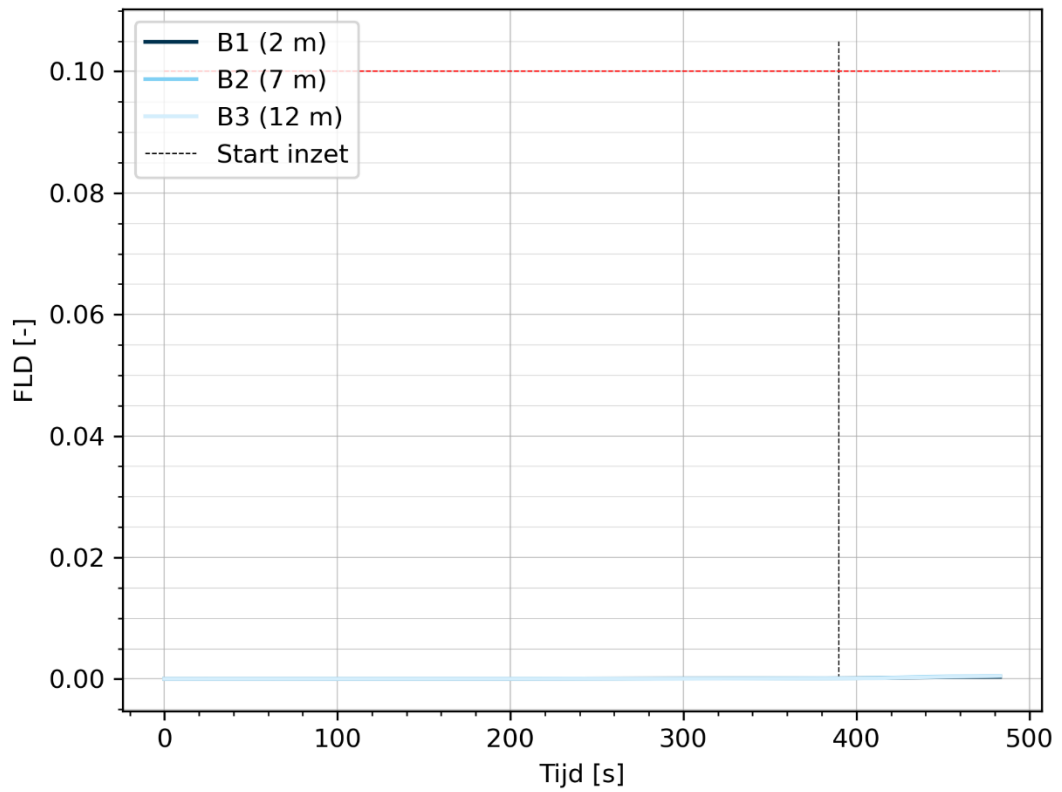
### Verstikkende gassen (dosis) HD lesstof 3D - test 1



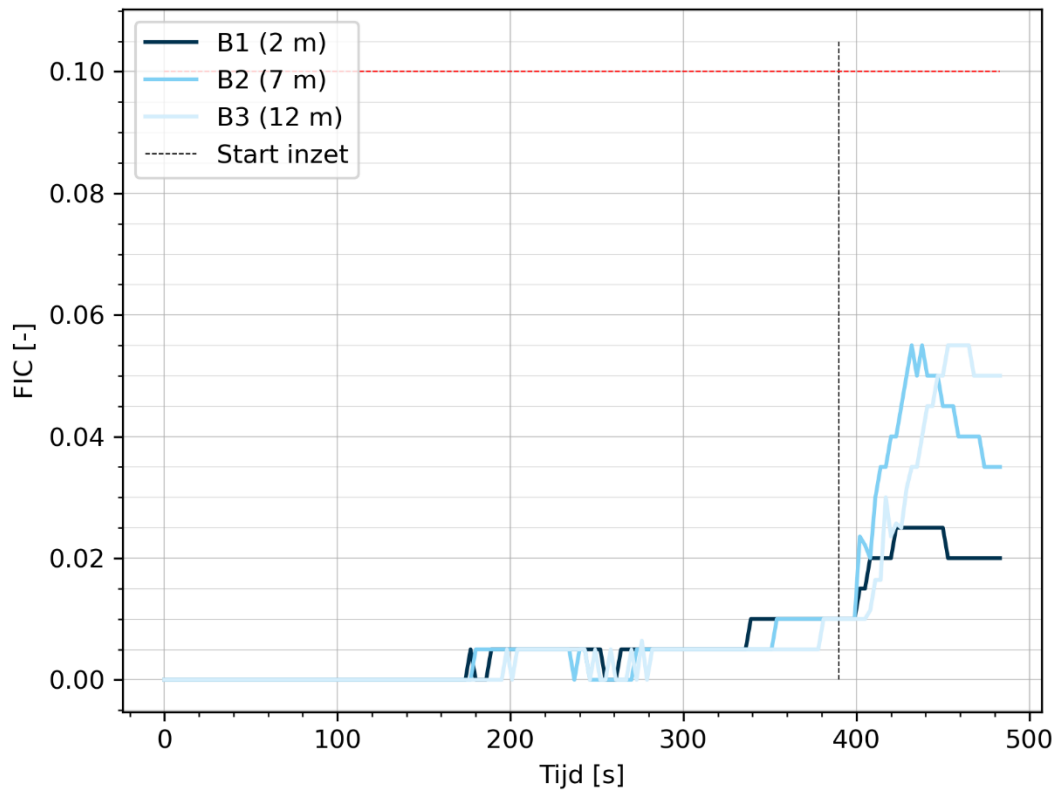
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m HD lesstof 3D - test 1



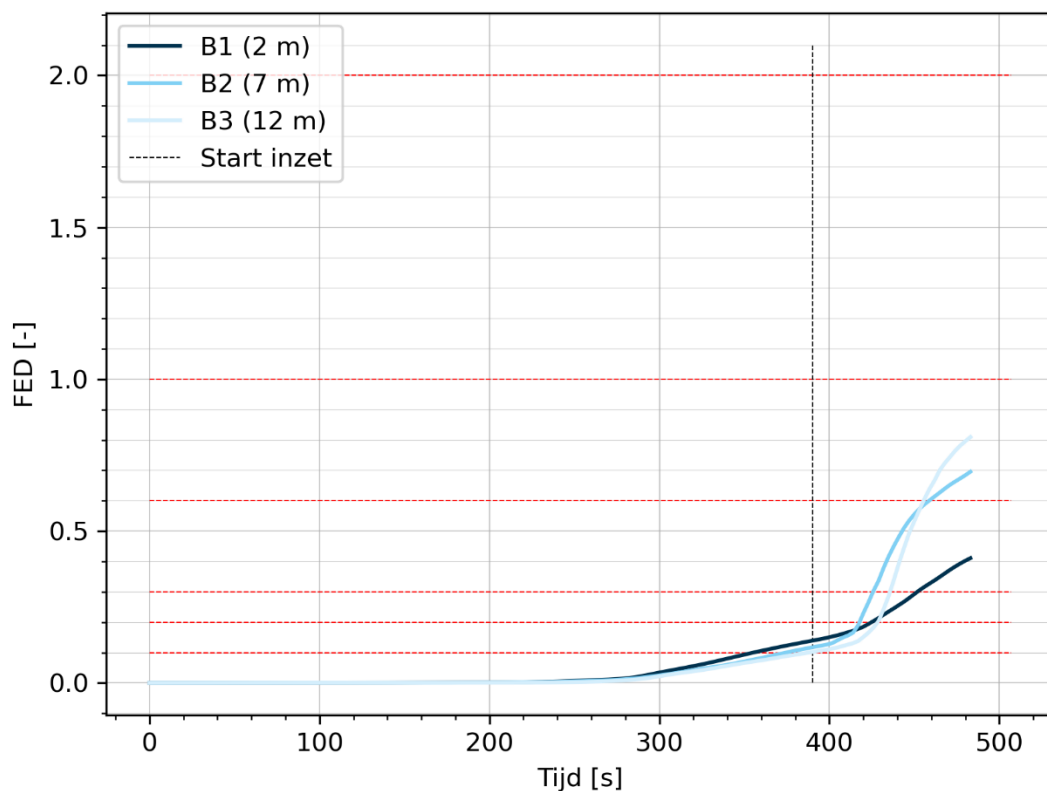
### Irriterende gassen (dosis) HD lesstof 3D - test 2



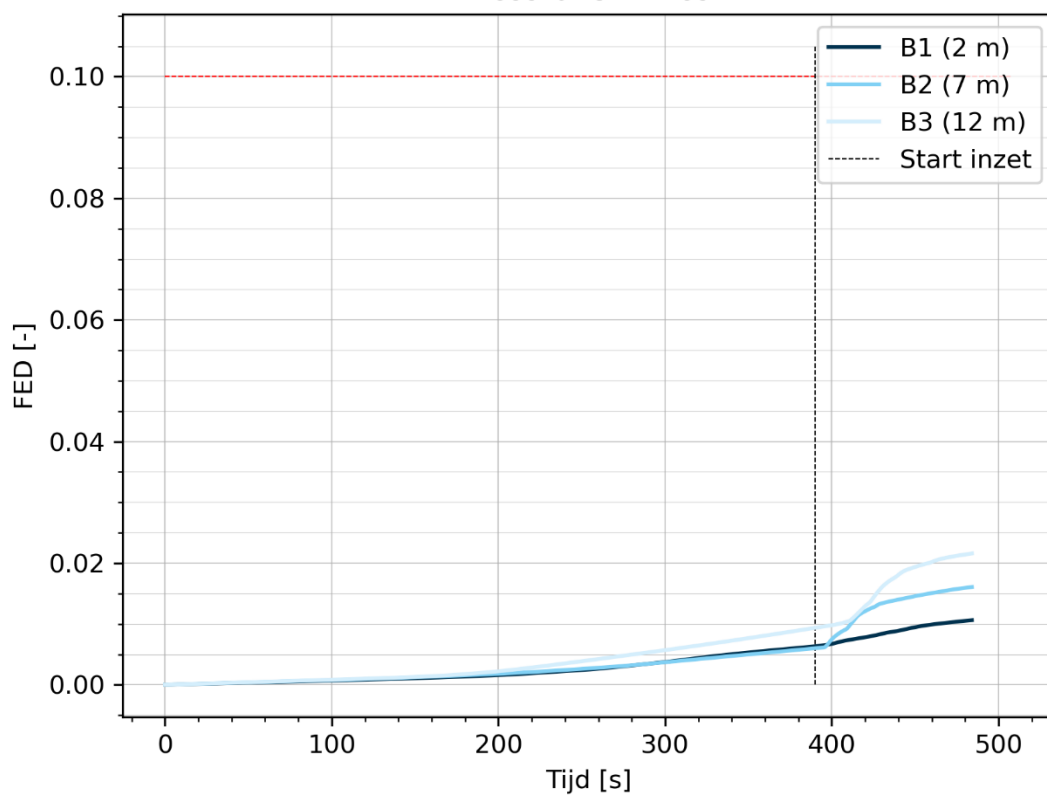
### Irriterende gassen (concentratie) HD lesstof 3D - test 2



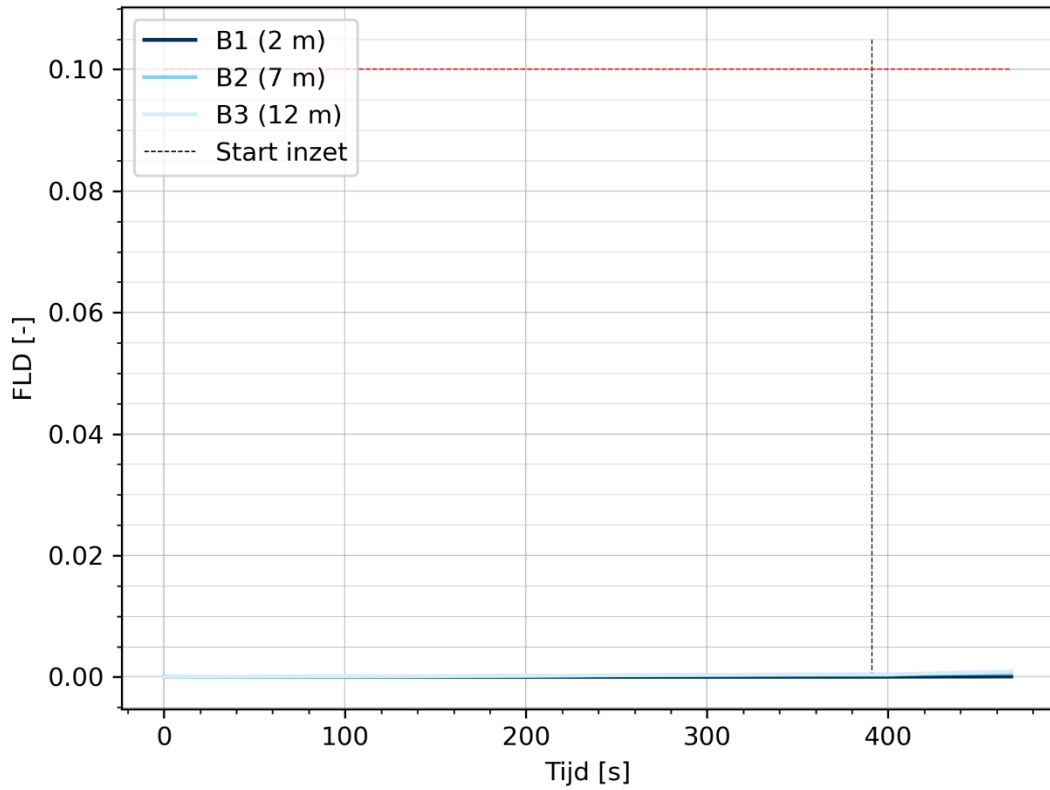
### Verstikkende gassen (dosis) HD lesstof 3D - test 2



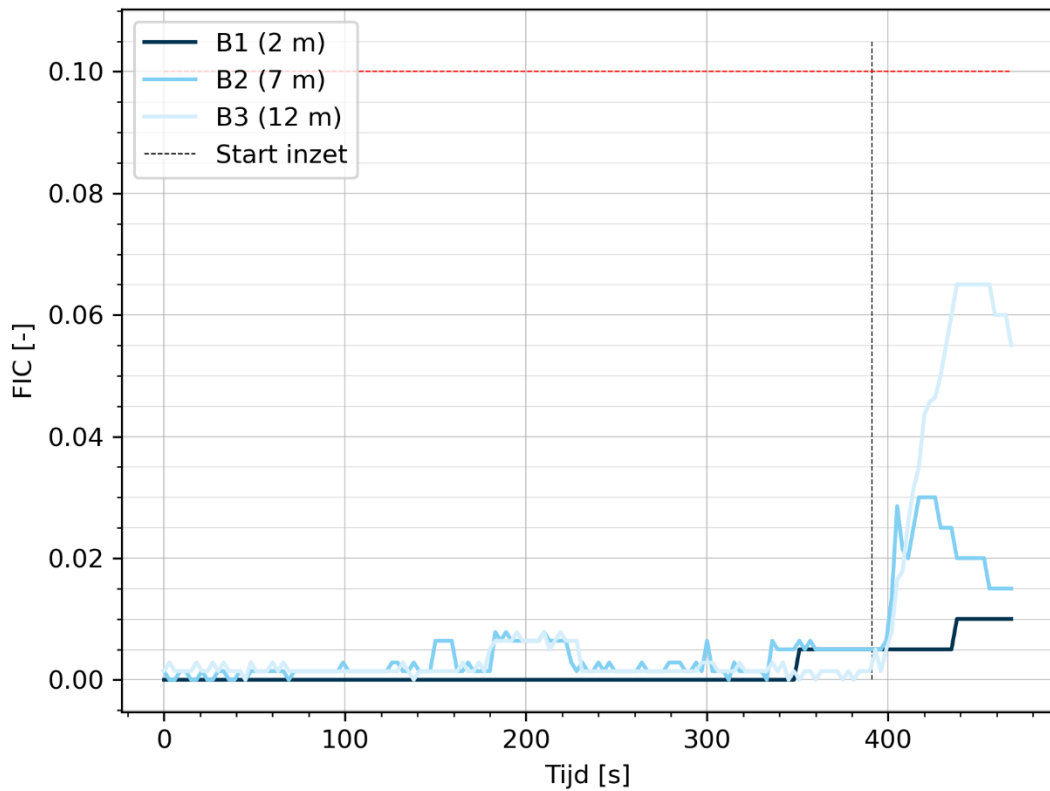
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m HD lesstof 3D - test 2



### Irriterende gassen (dosis) HD halve maan - test 1

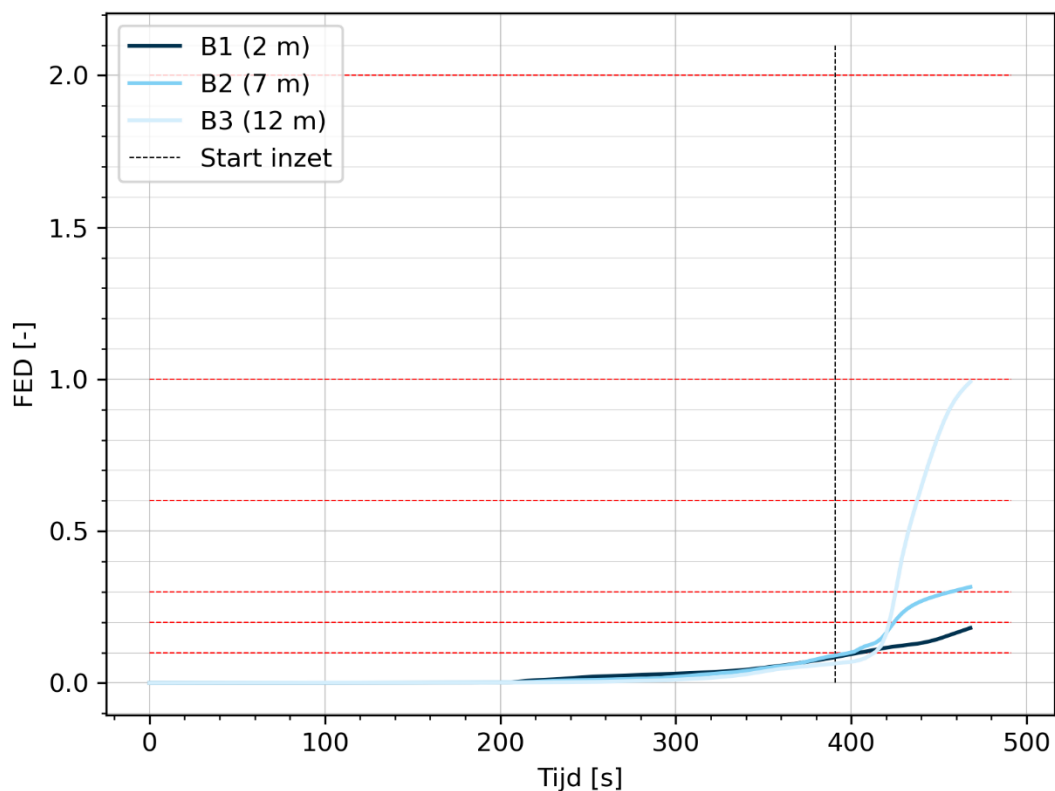


### Irriterende gassen (concentratie) HD halve maan - test 1

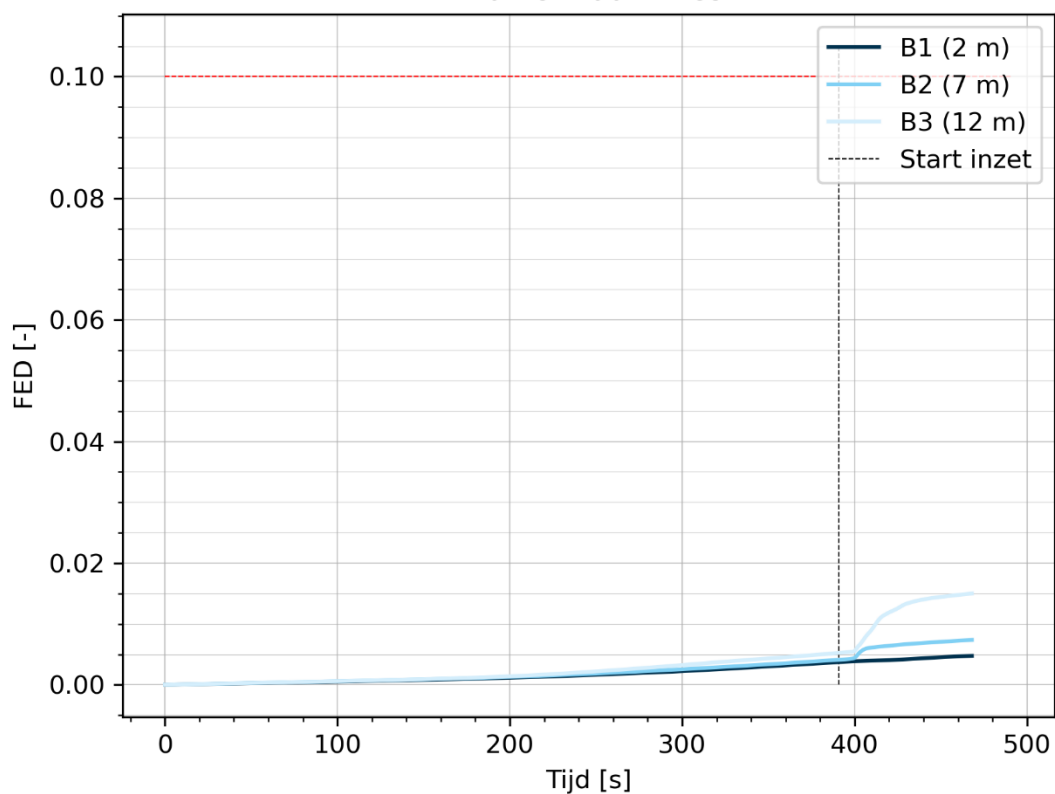




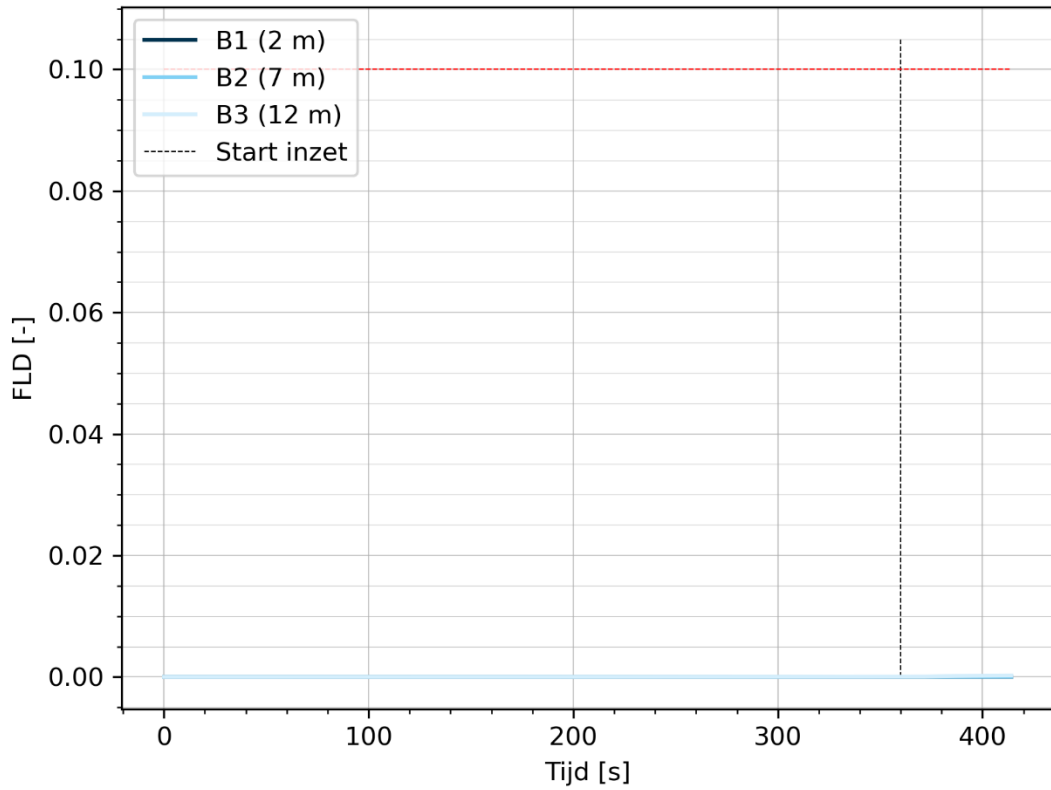
### Verstikkende gassen (dosis) HD halve maan - test 1



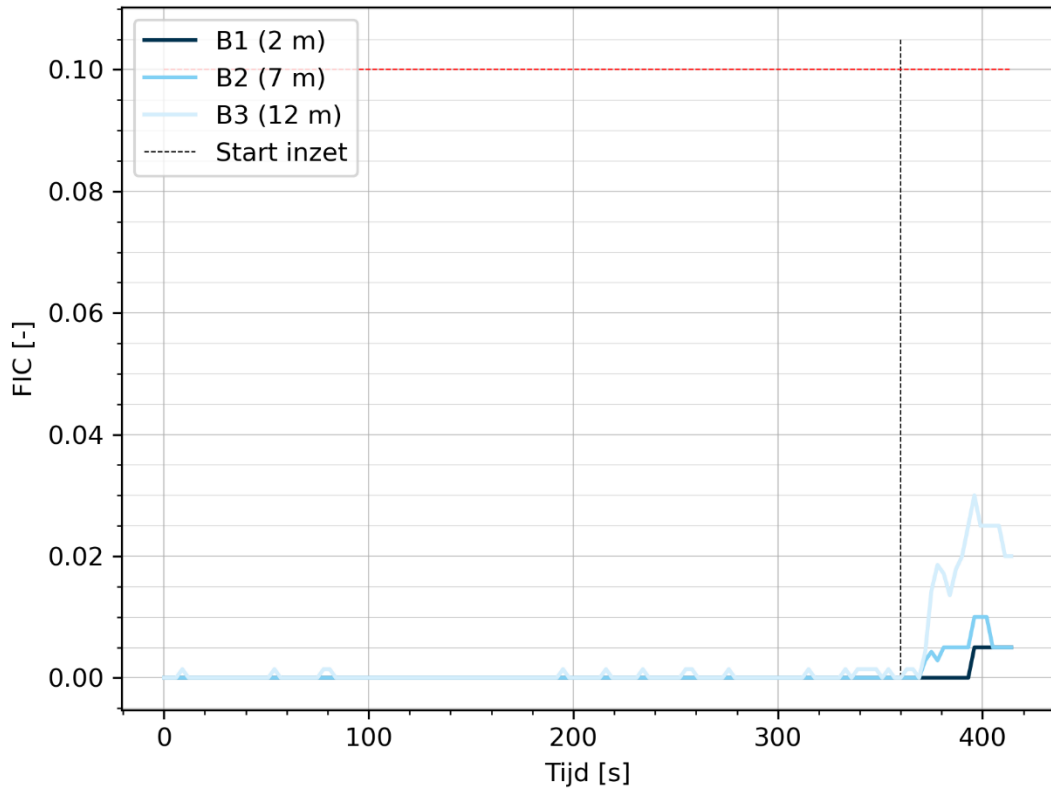
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m HD halve maan - test 1



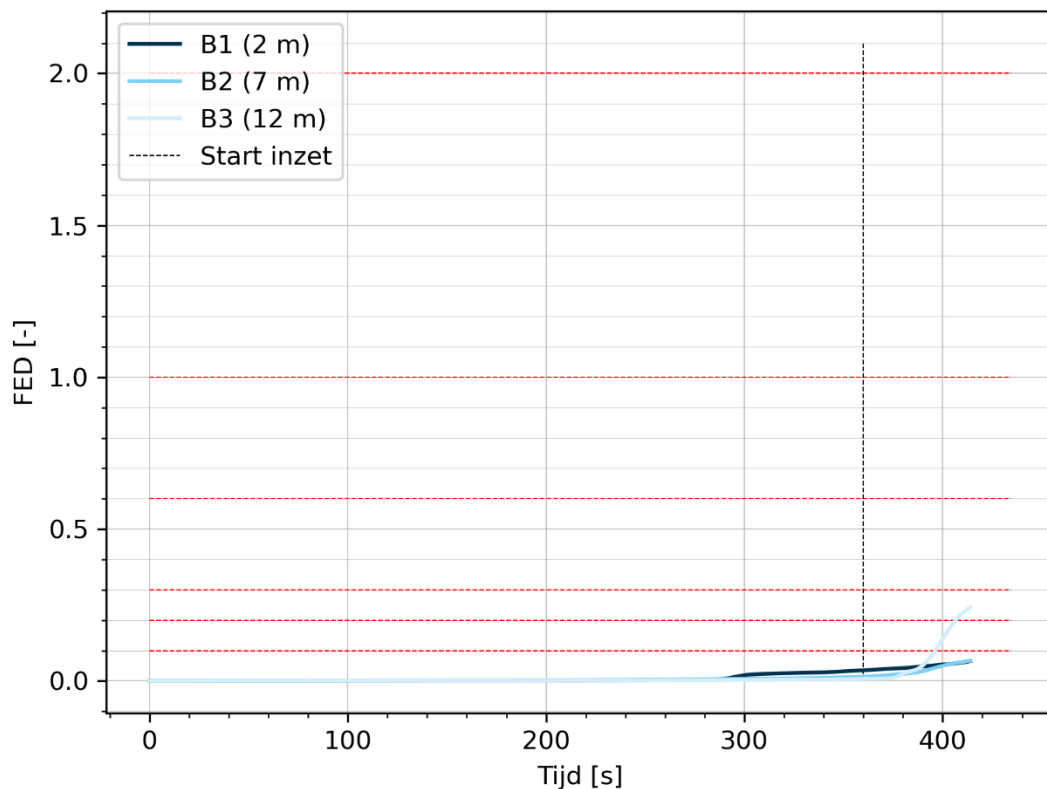
### Irriterende gassen (dosis) HD halve maan - test 2



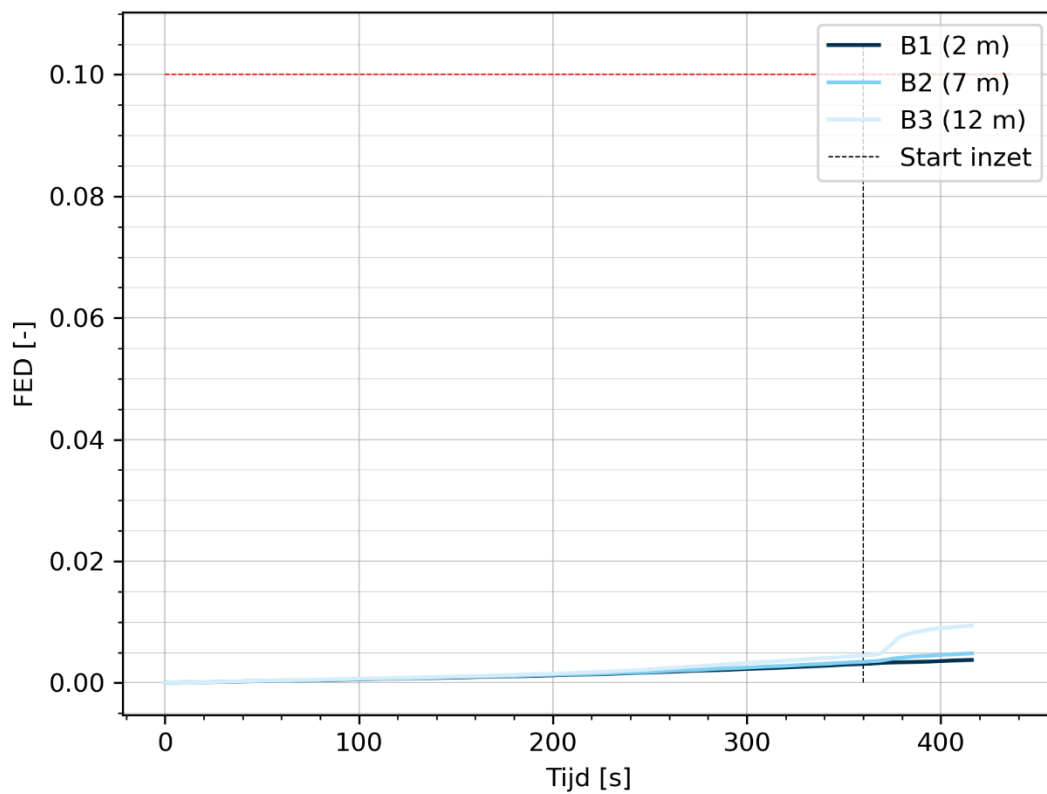
### Irriterende gassen (concentratie) HD halve maan - test 2



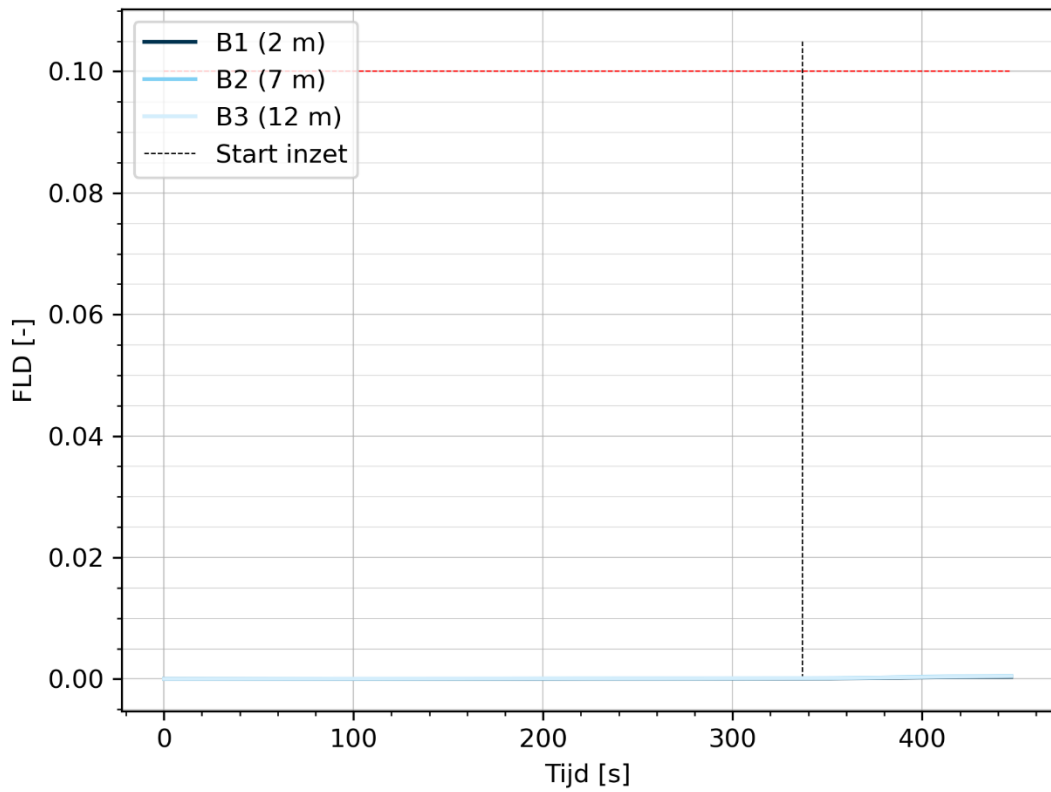
### Verstikkende gassen (dosis) HD halve maan - test 2



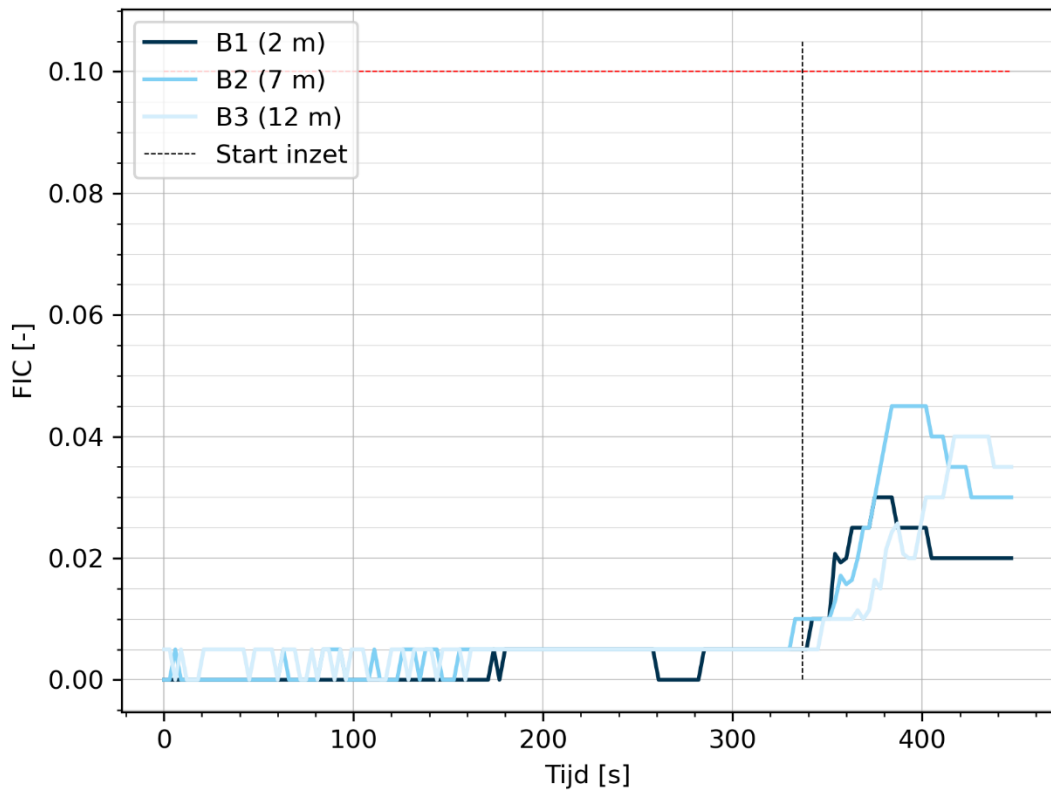
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m HD halve maan - test 2



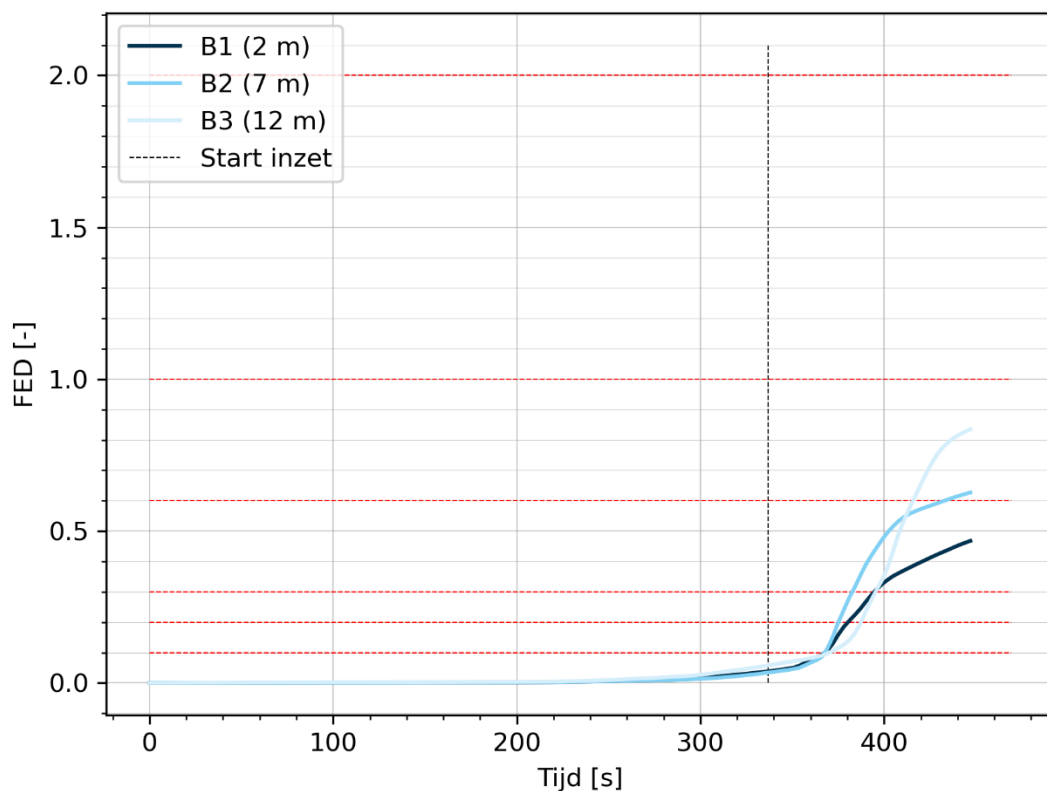
Irriterende gassen (dosis)  
LD 250 lesstof 3D - test 1



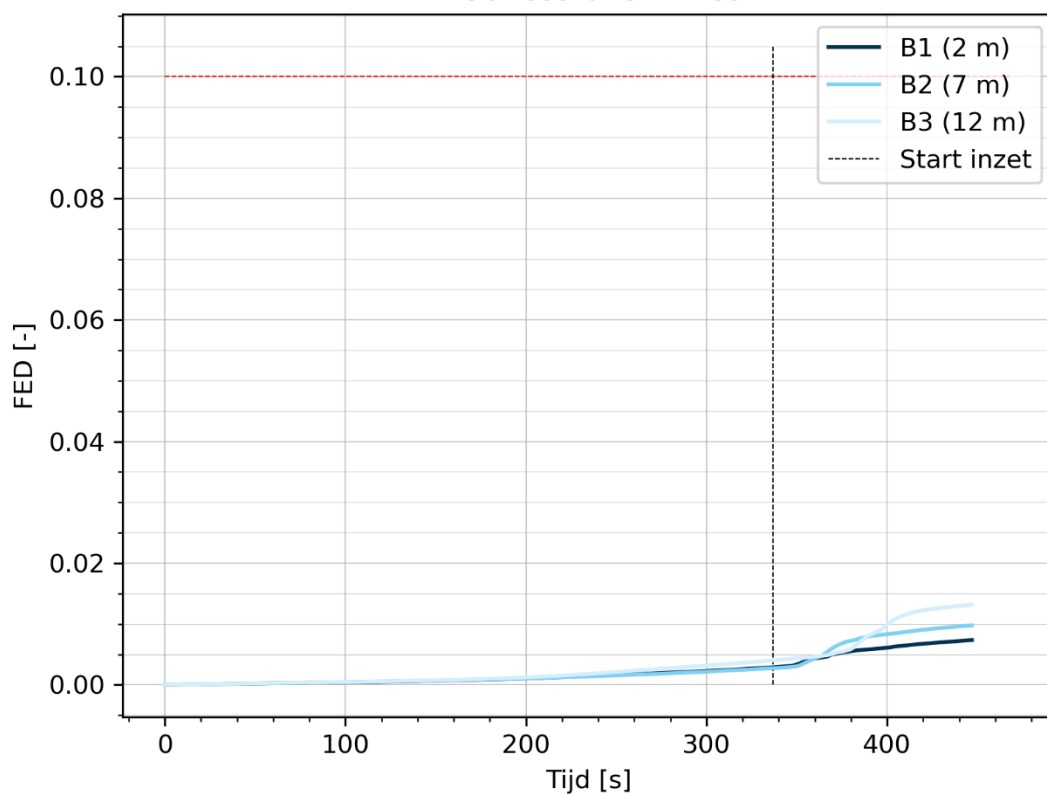
Irriterende gassen (concentratie)  
LD 250 lesstof 3D - test 1



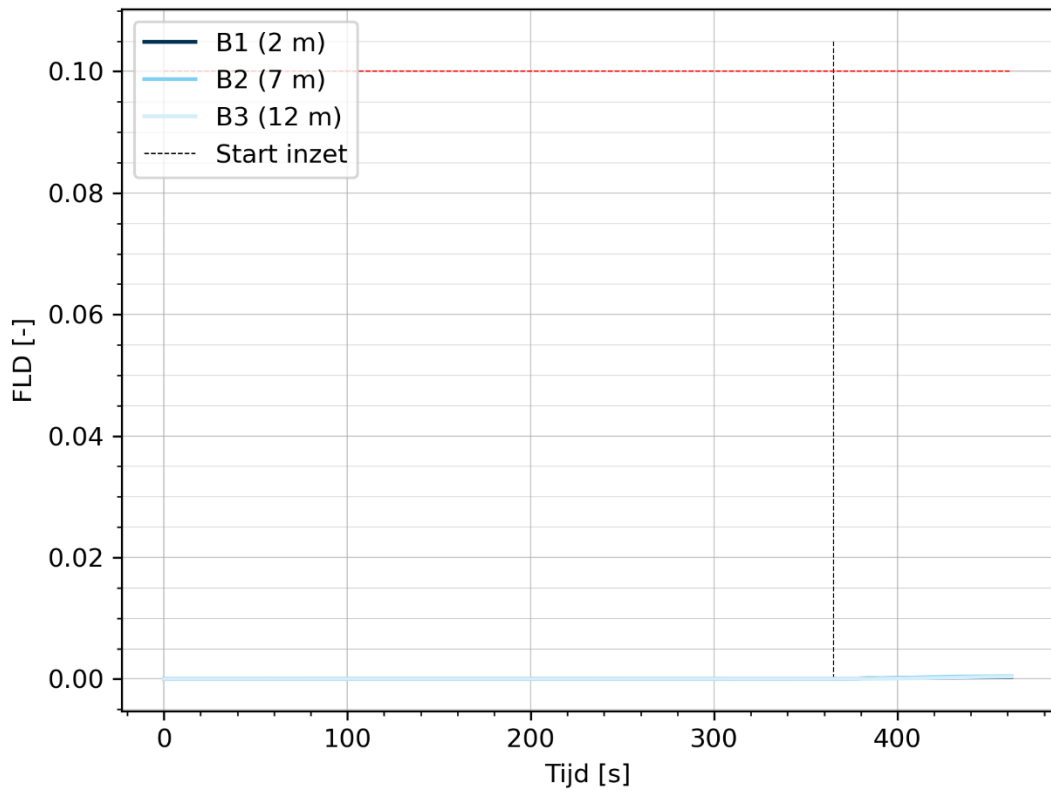
### Verstikkende gassen (dosis) LD 250 lesstof 3D - test 1



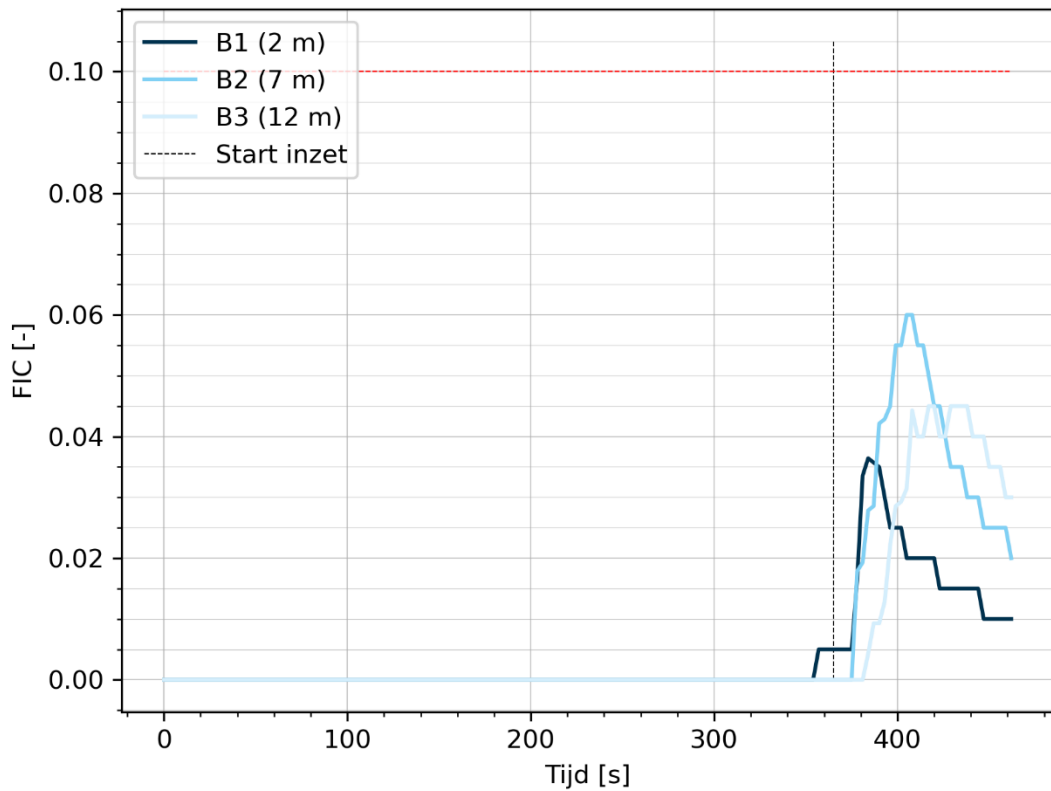
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 250 lesstof 3D - test 1



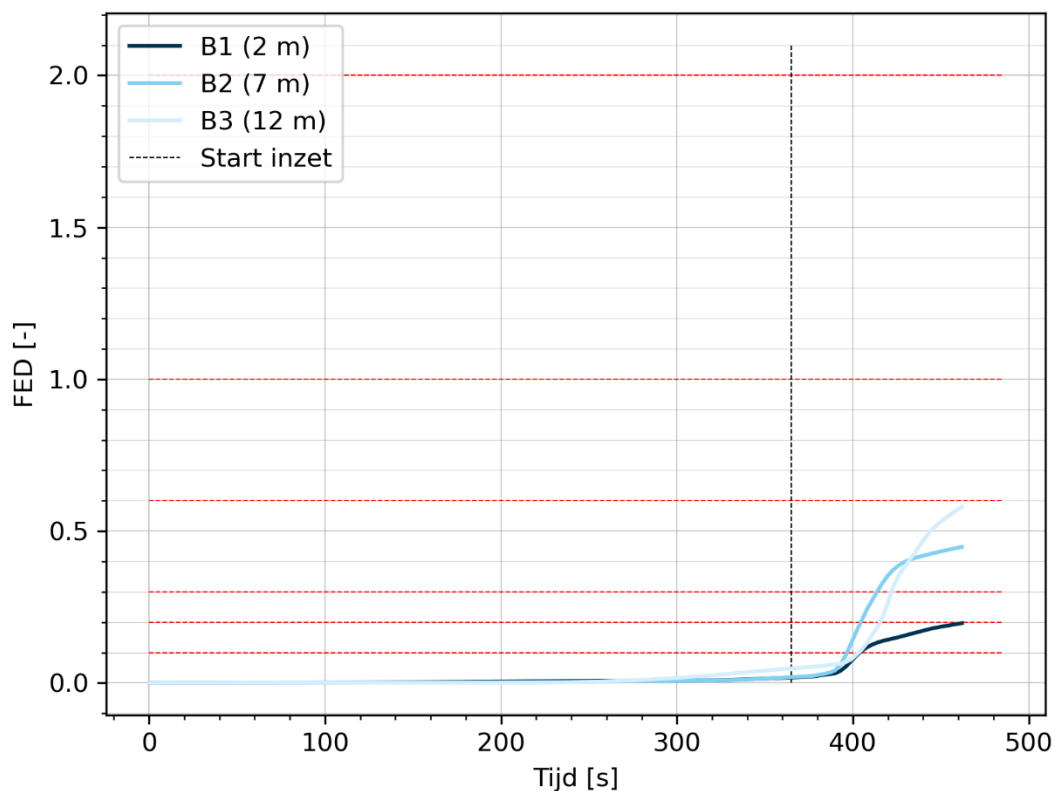
Irriterende gassen (dosis)  
LD 250 lesstof 3D - test 2



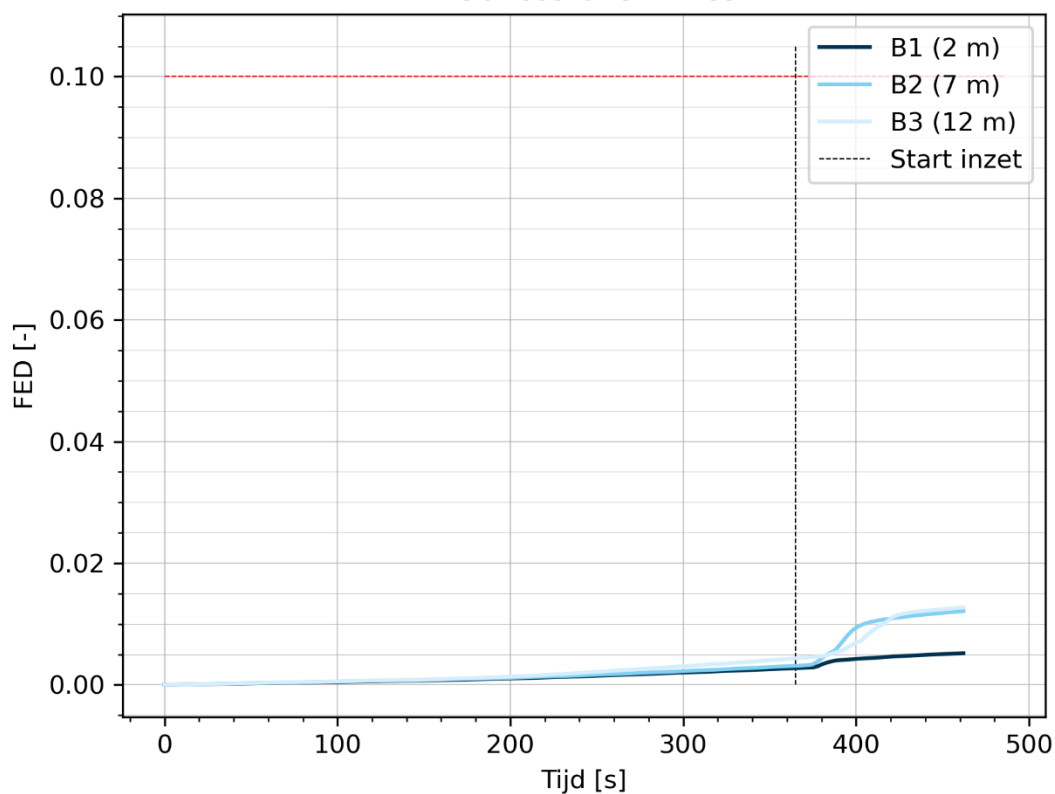
Irriterende gassen (concentratie)  
LD 250 lesstof 3D - test 2



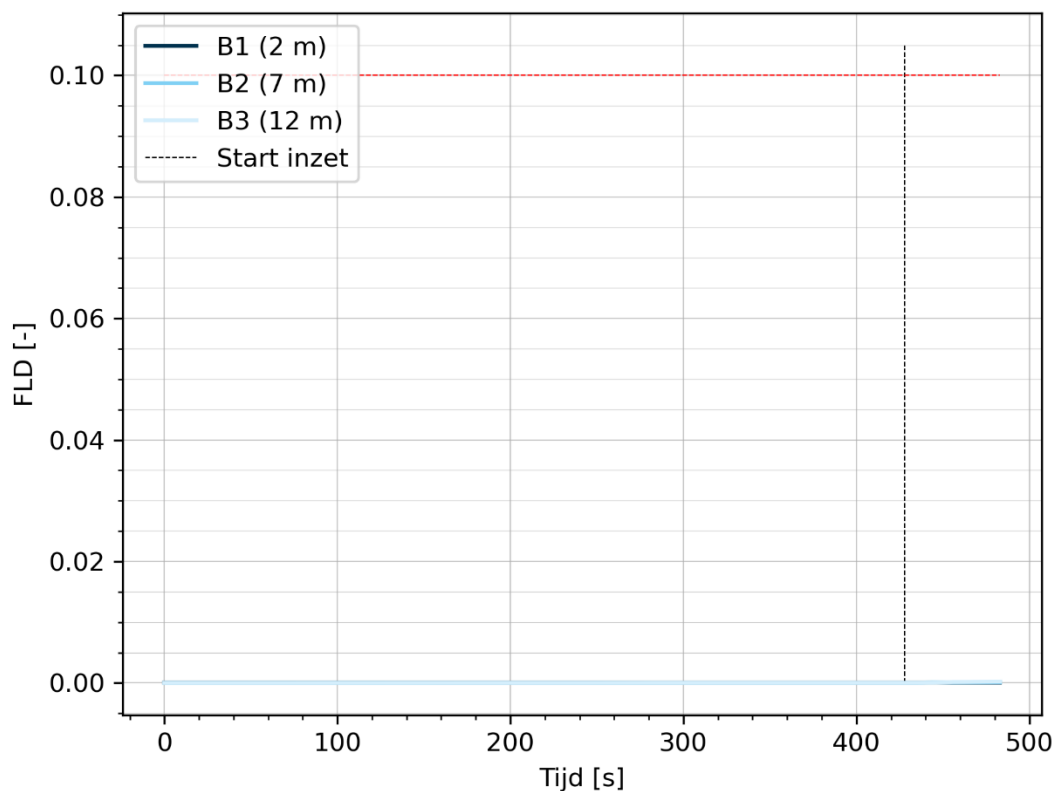
### Verstikkende gassen (dosis) LD 250 lesstof 3D - test 2



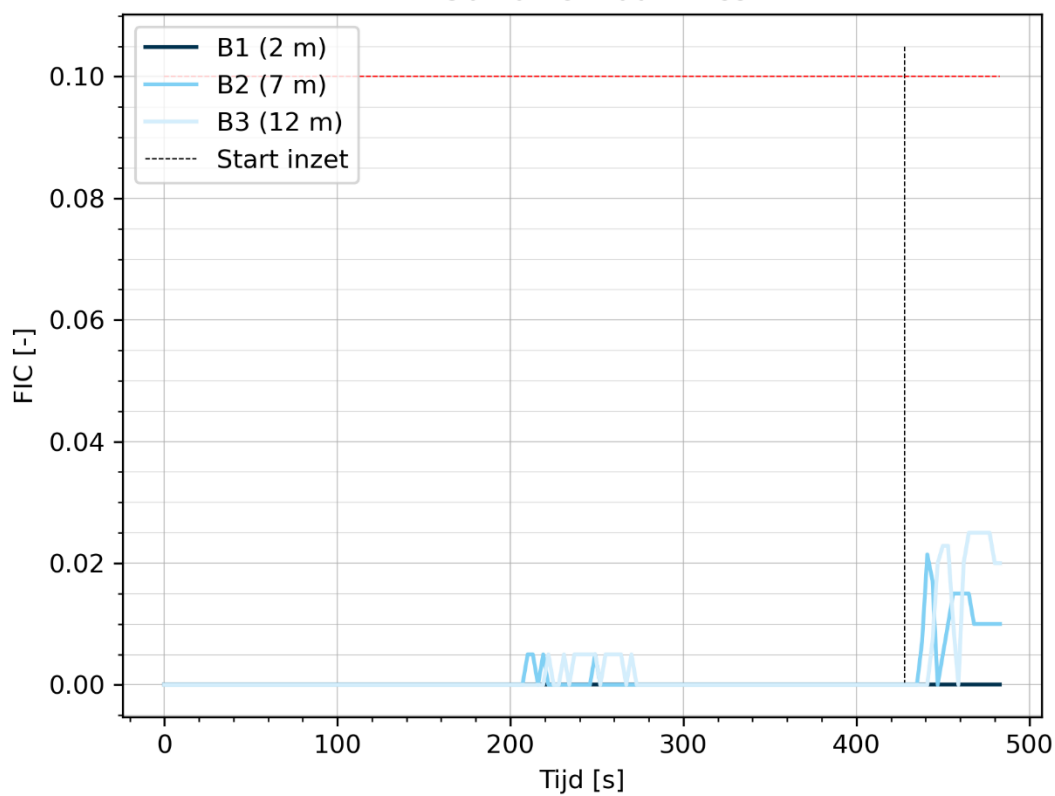
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 250 lesstof 3D - test 2



### Irriterende gassen (dosis) LD 250 halve maan - test 1

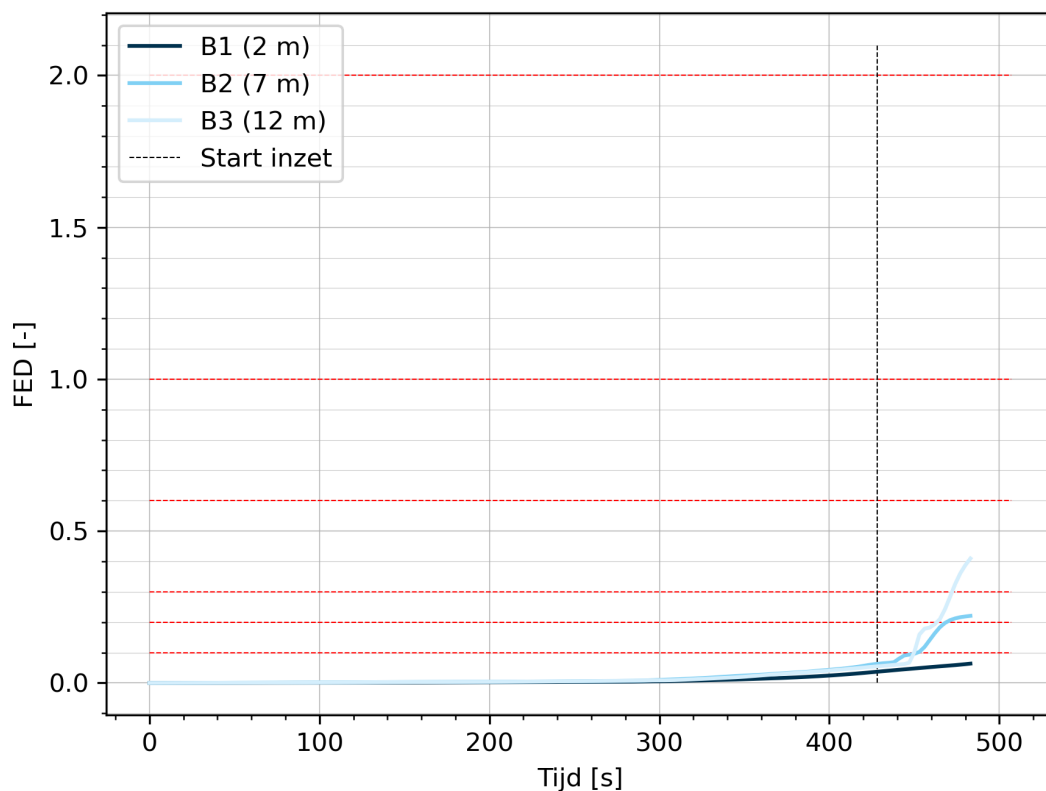


### Irriterende gassen (concentratie) LD 250 halve maan - test 1

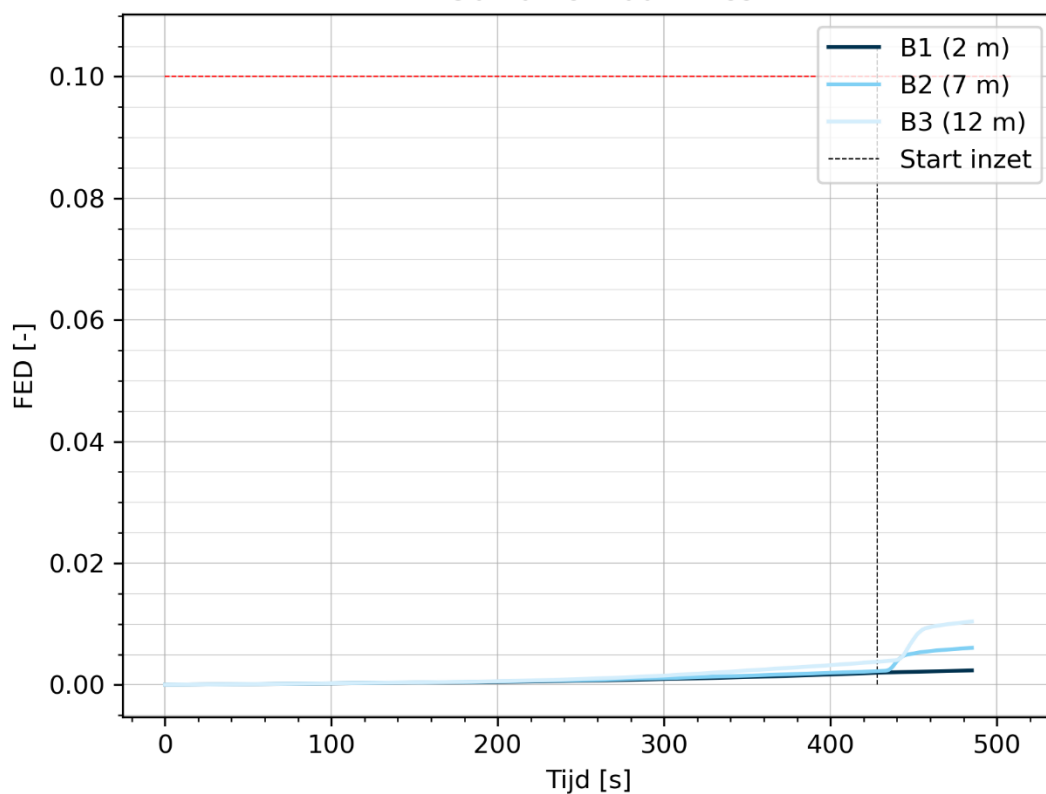




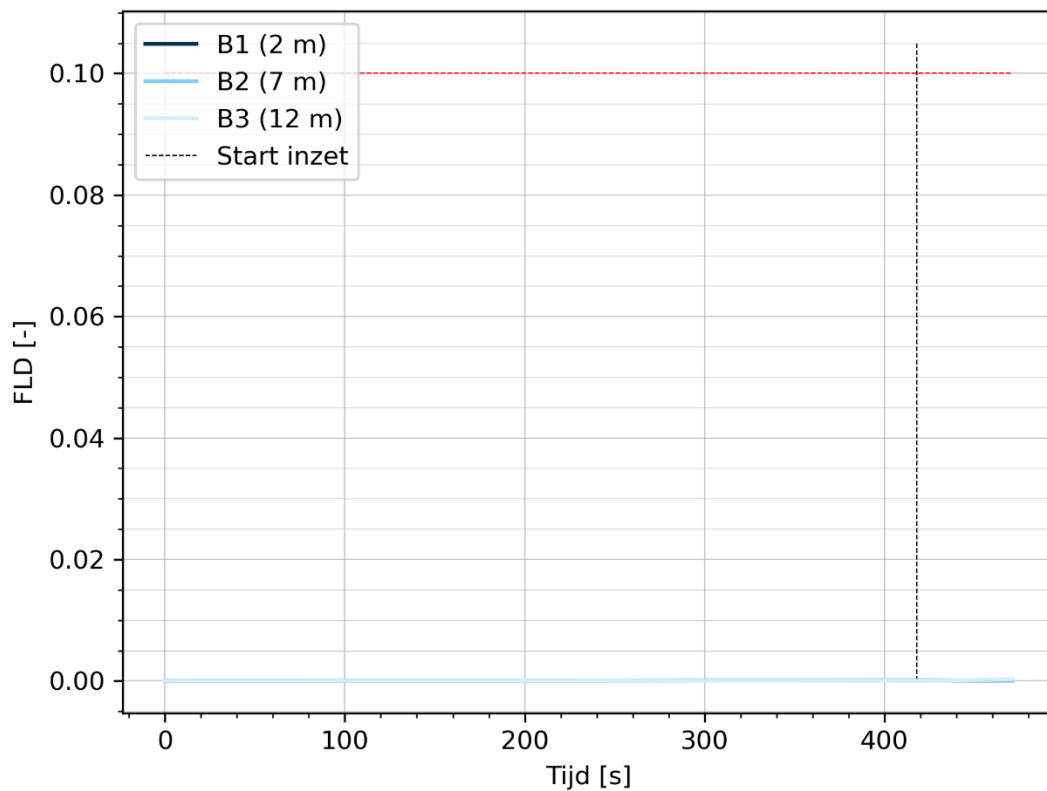
### Verstikkende gassen (dosis) LD 250 halve maan - test 1



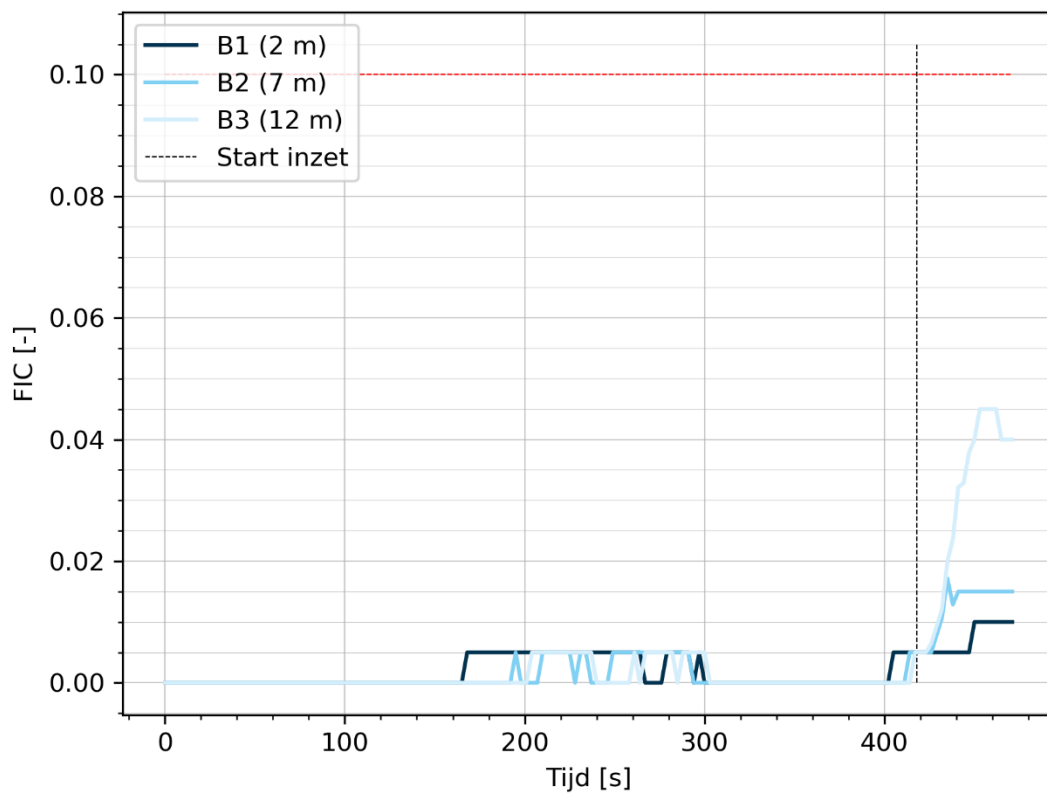
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 250 halve maan - test 1



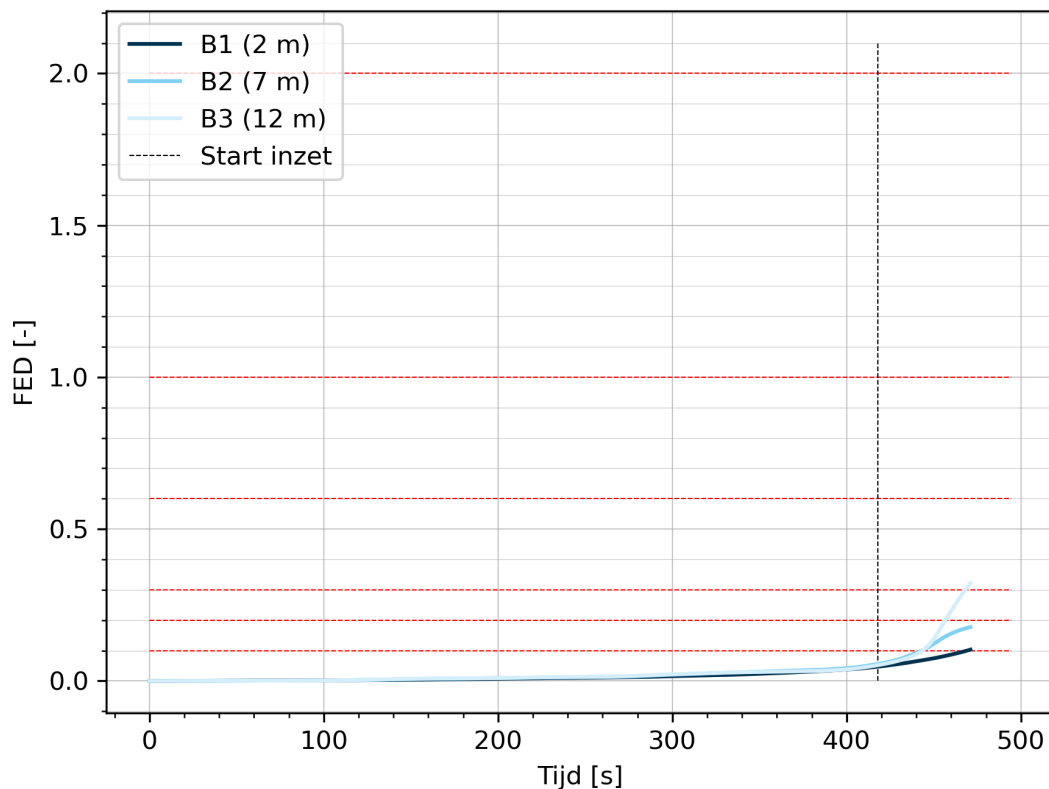
### Irriterende gassen (dosis) LD 250 halve maan - test 2



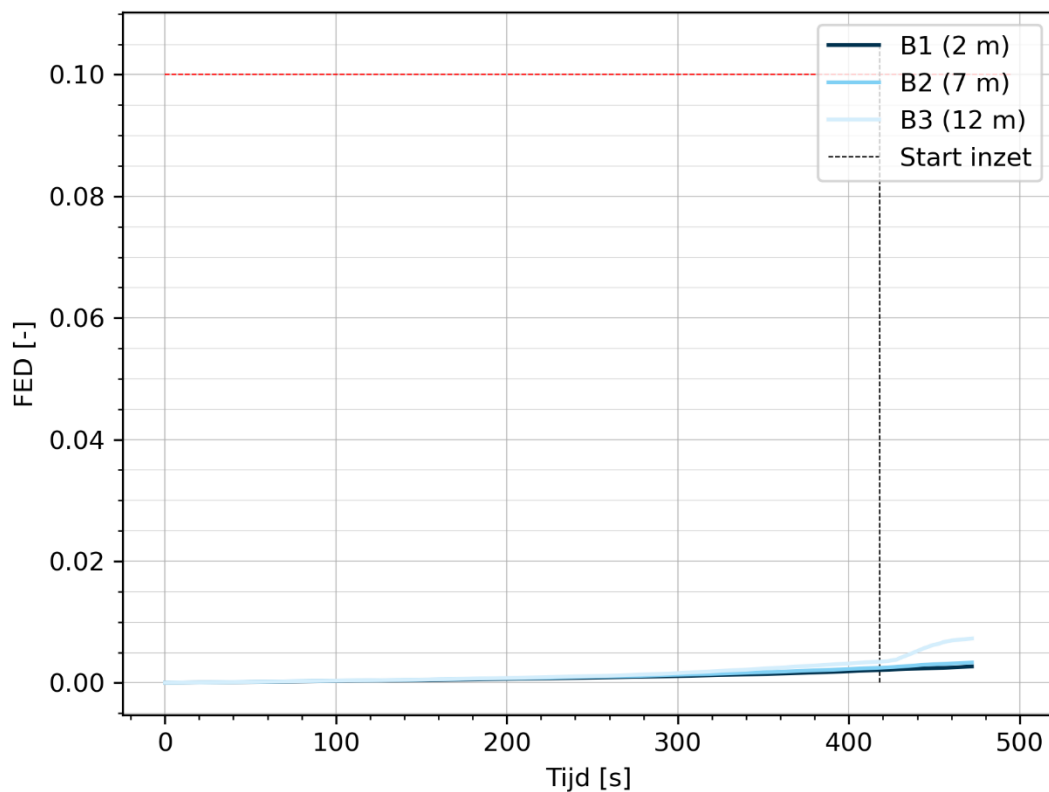
### Irriterende gassen (concentratie) LD 250 halve maan - test 2



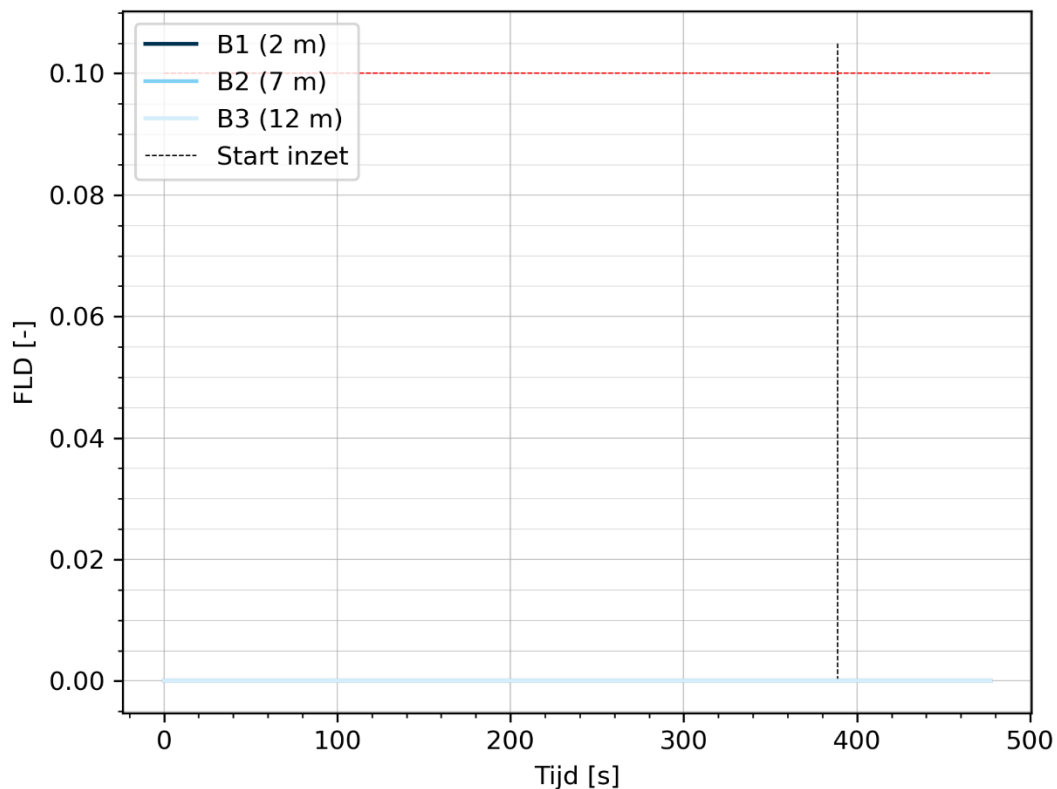
### Verstikkende gassen (dosis) LD 250 halve maan - test 2



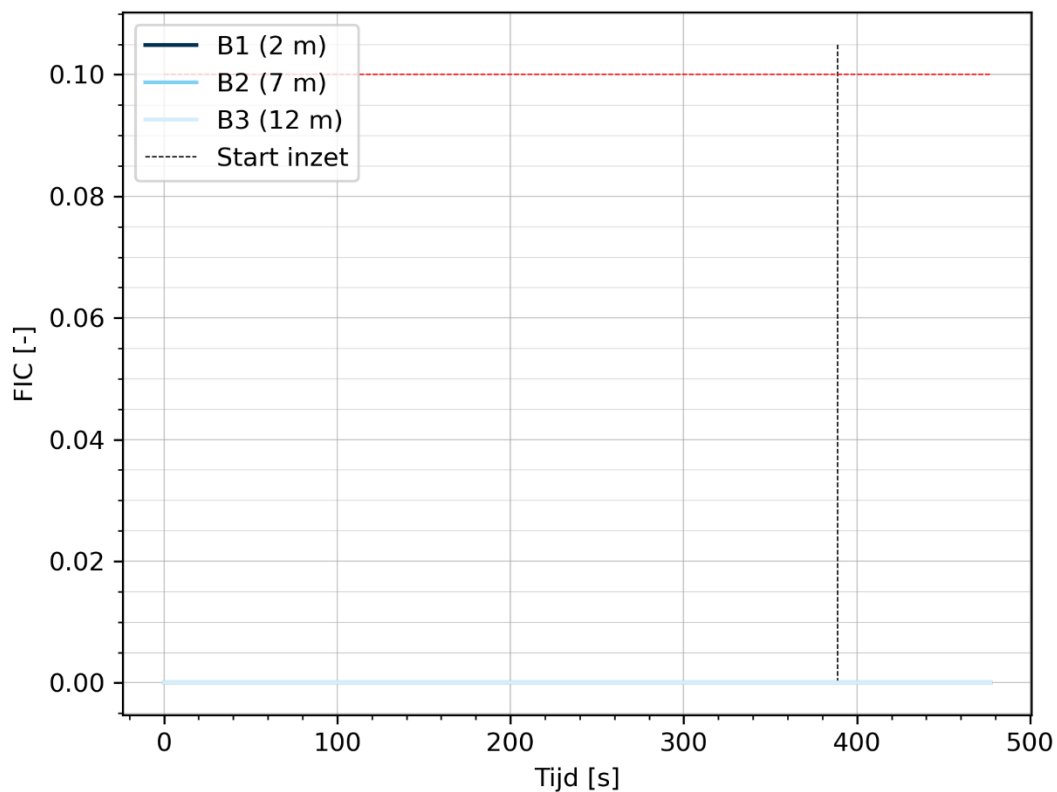
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 250 halve maan - test 2



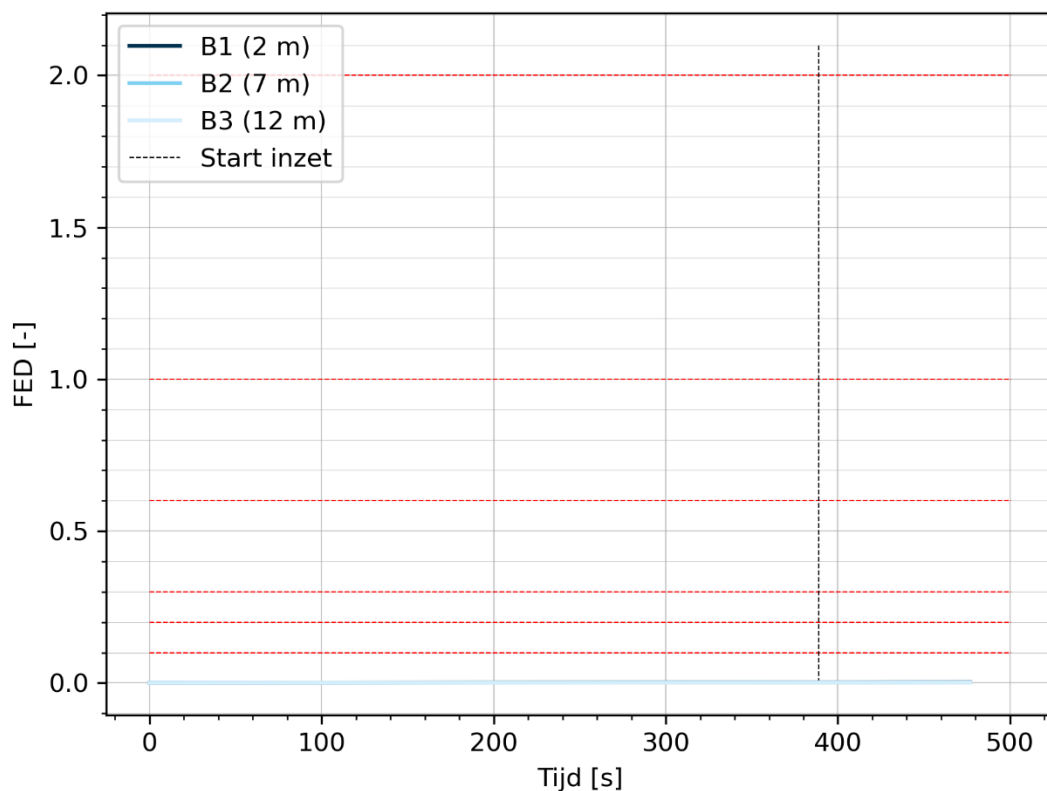
### Irriterende gassen (dosis) LD 450 lesstof 3D - test 1



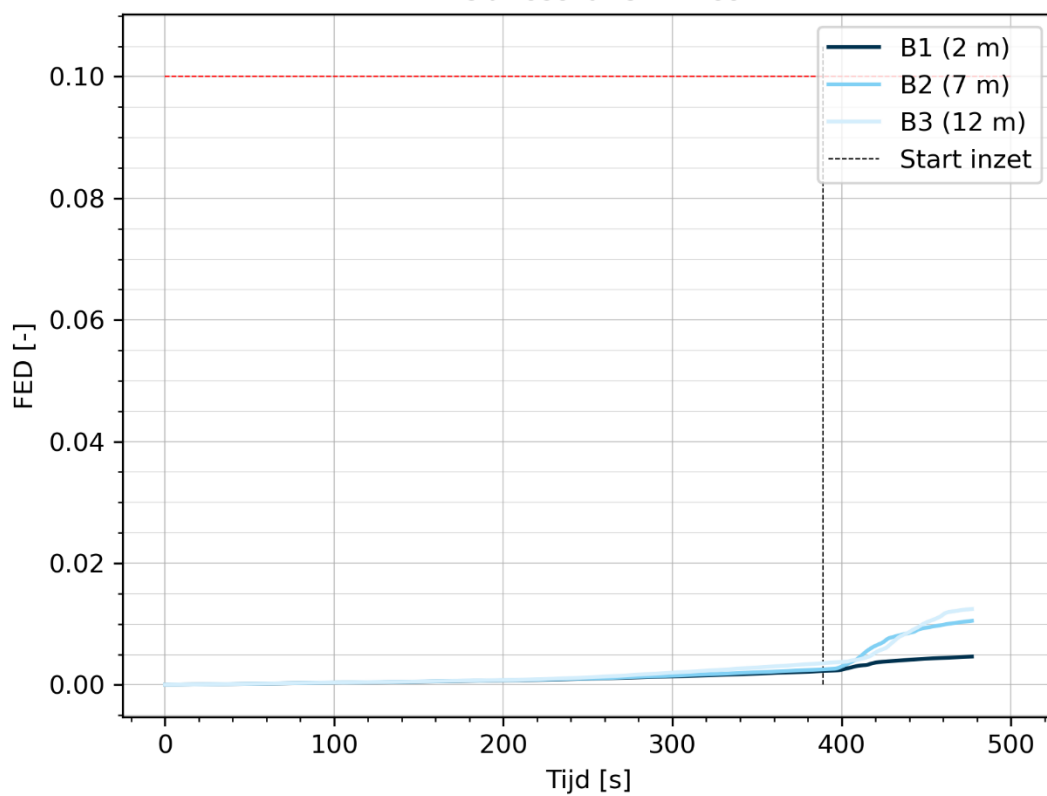
### Irriterende gassen (concentratie) LD 450 lesstof 3D - test 1



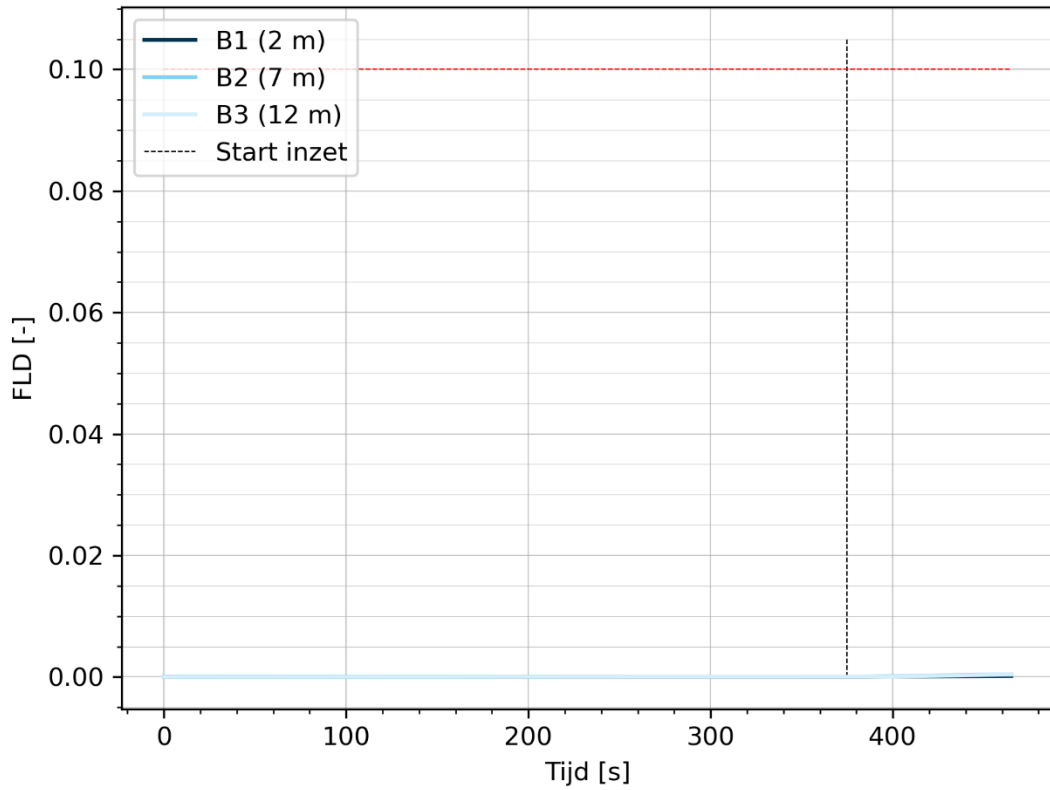
### Verstikkende gassen (dosis) LD 450 lesstof 3D - test 1



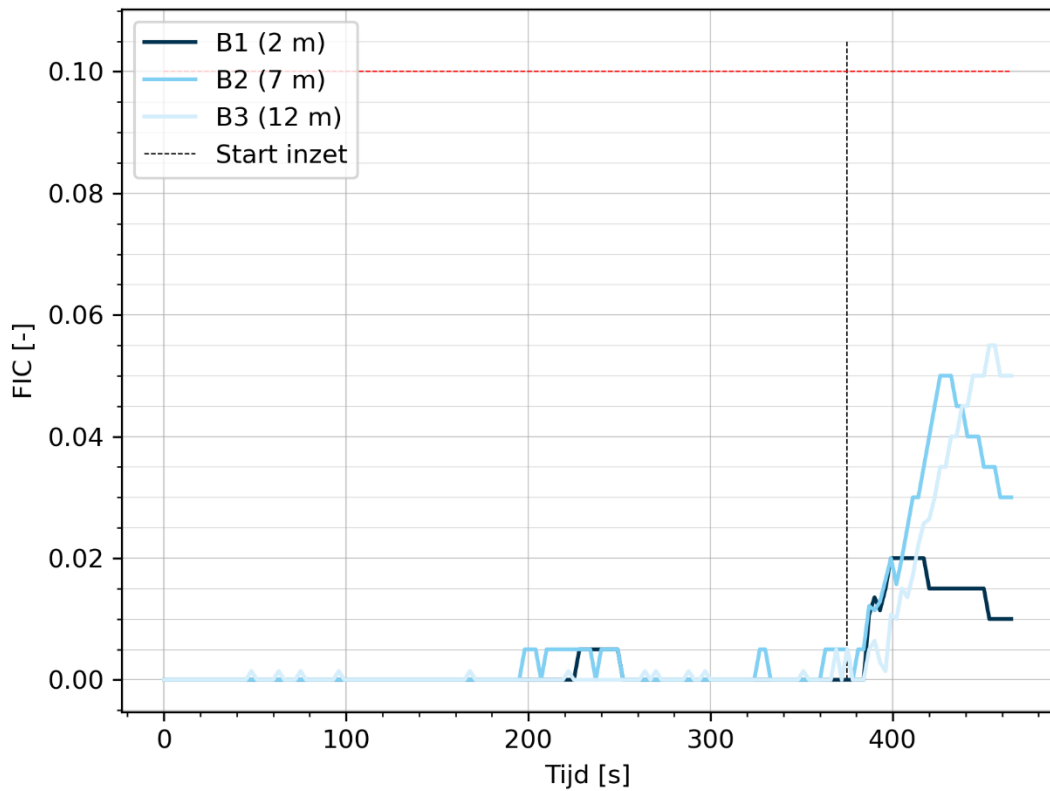
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 450 lesstof 3D - test 1



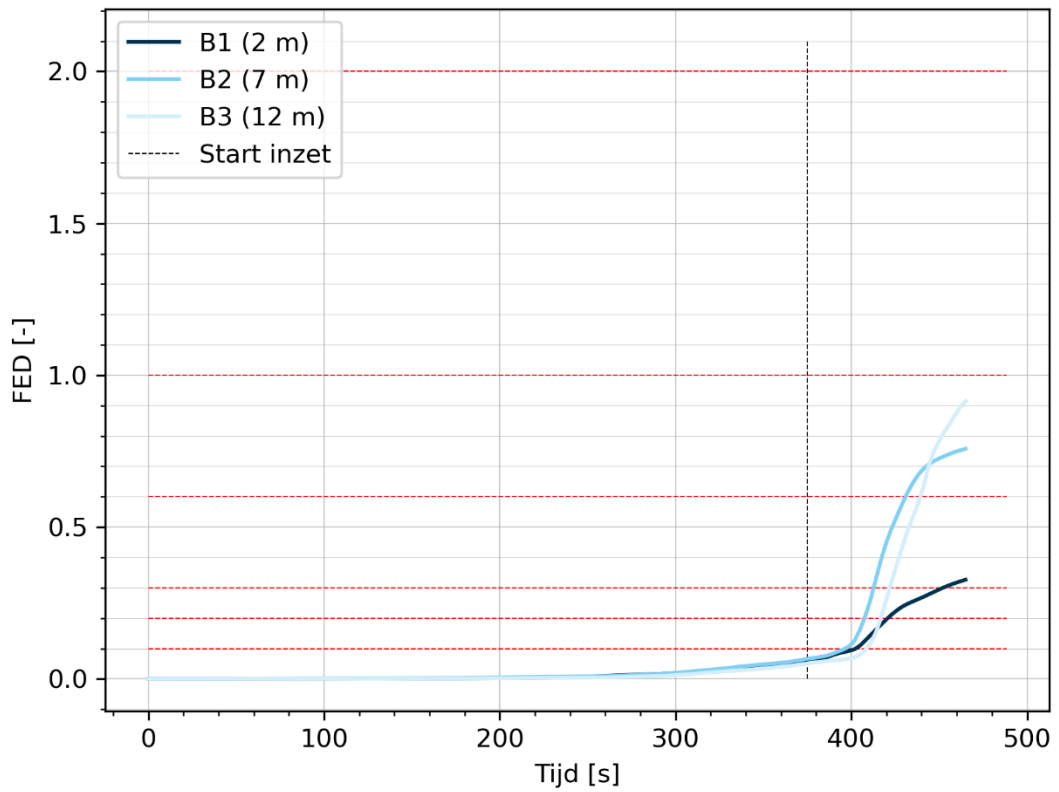
### Irriterende gassen (dosis) LD 450 lesstof 3D - test 2



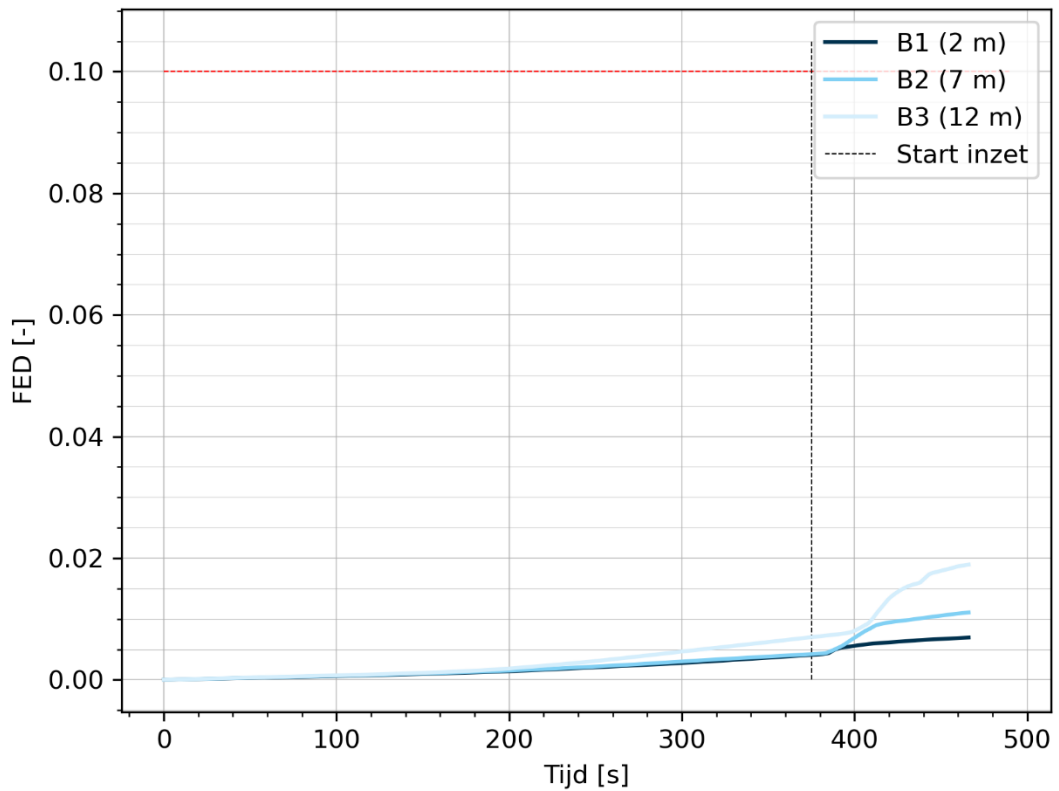
### Irriterende gassen (concentratie) LD 450 lesstof 3D - test 2



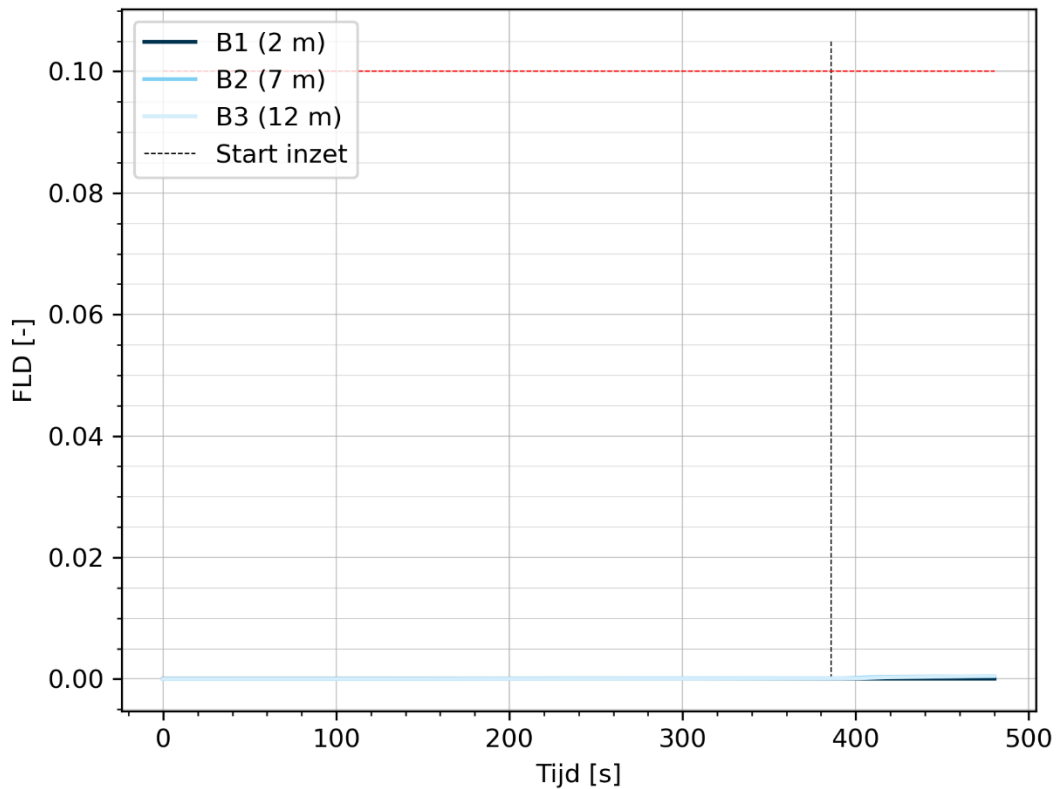
### Verstikkende gassen (dosis) LD 450 lesstof 3D - test 2



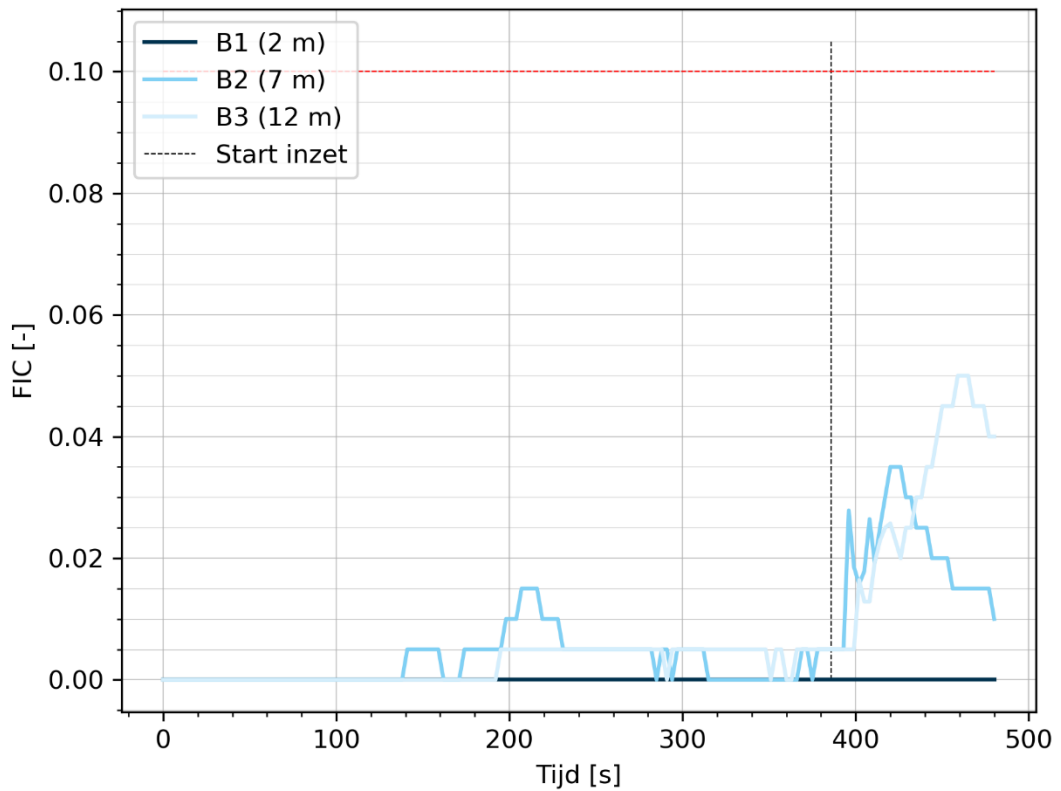
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 450 lesstof 3D - test 2



Irriterende gassen (dosis)  
LD 450 halve maan - test 1

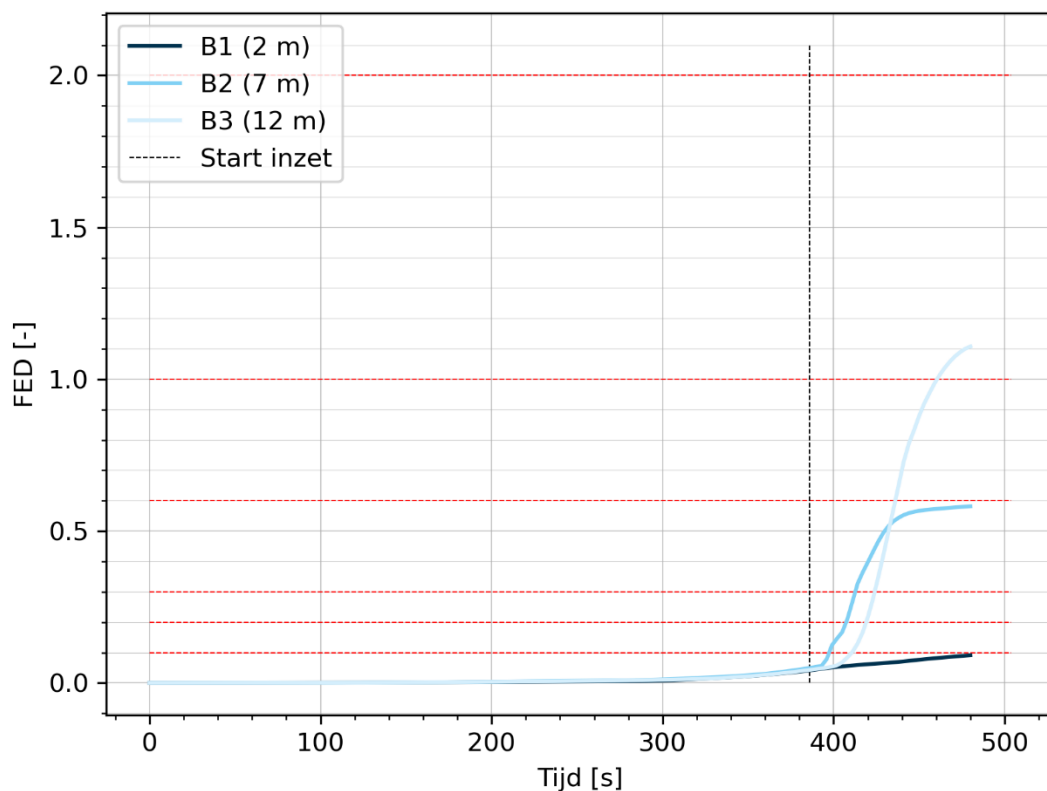


Irriterende gassen (concentratie)  
LD 450 halve maan - test 1

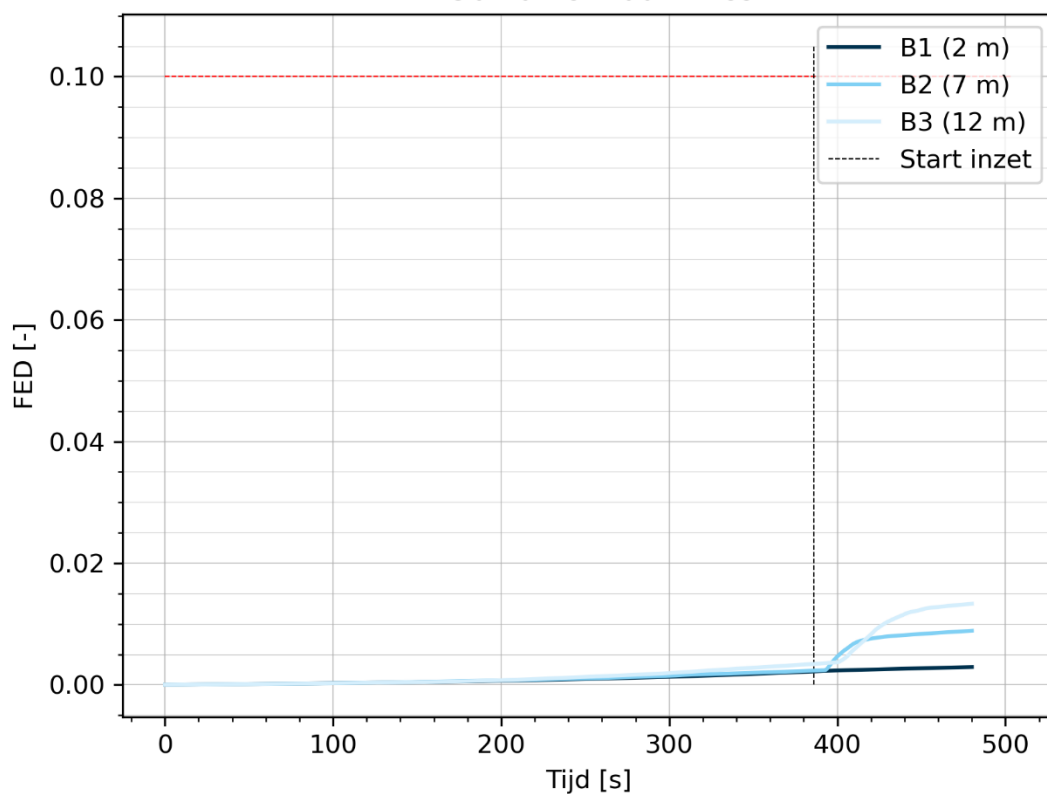




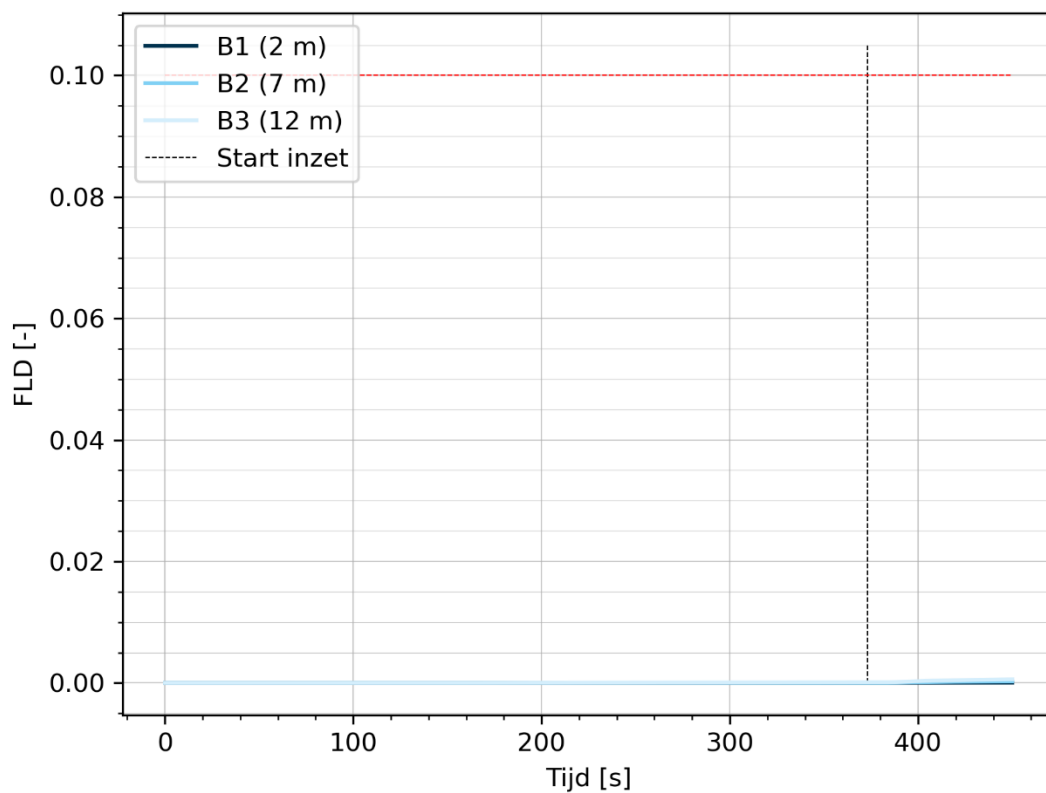
### Verstikkende gassen (dosis) LD 450 halve maan - test 1



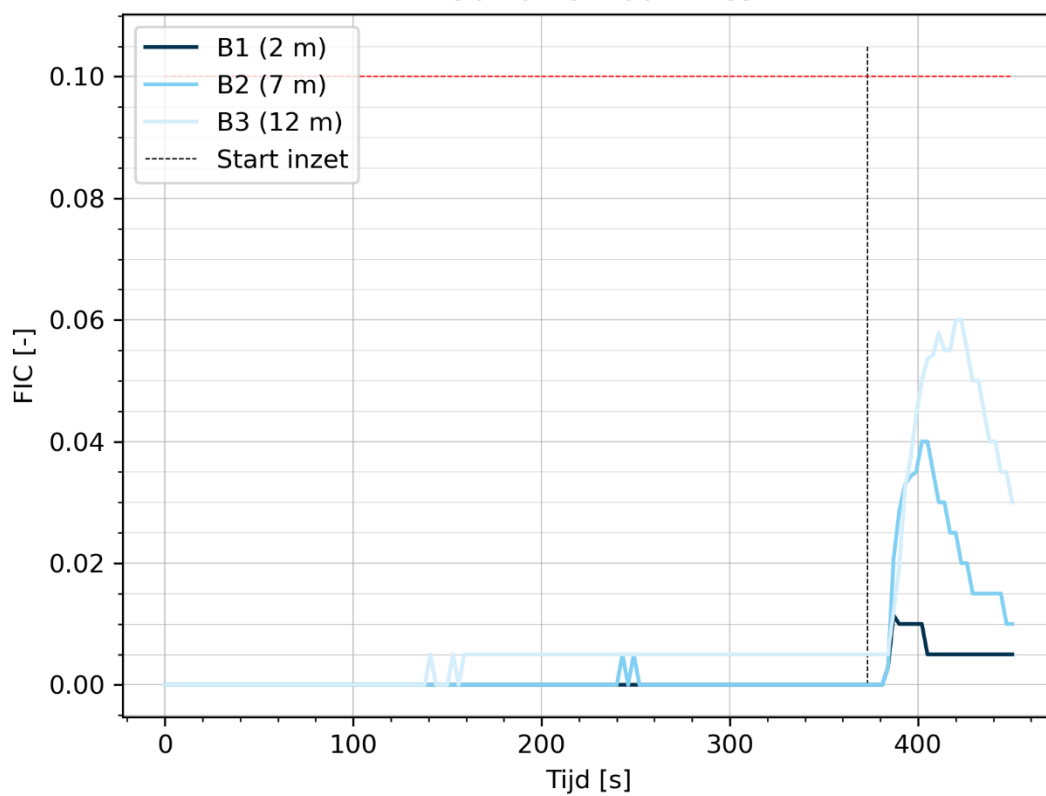
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 450 halve maan - test 1



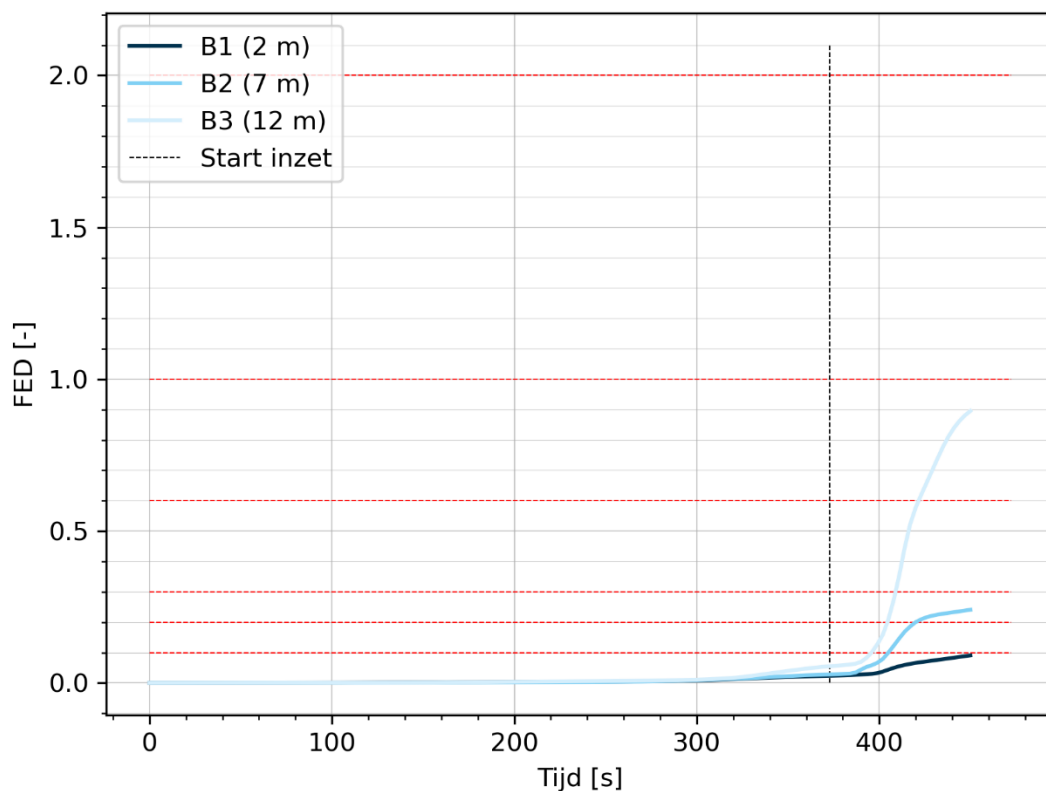
### Irriterende gassen (dosis) LD 450 halve maan - test 2



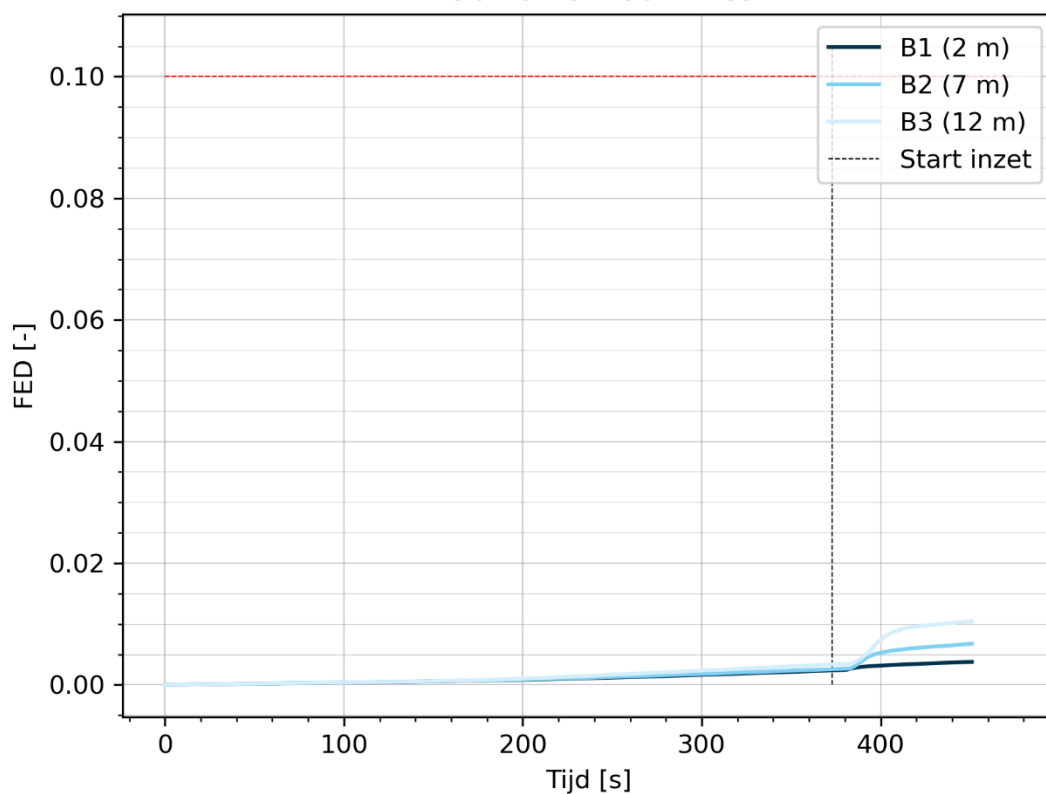
### Irriterende gassen (concentratie) LD 450 halve maan - test 2



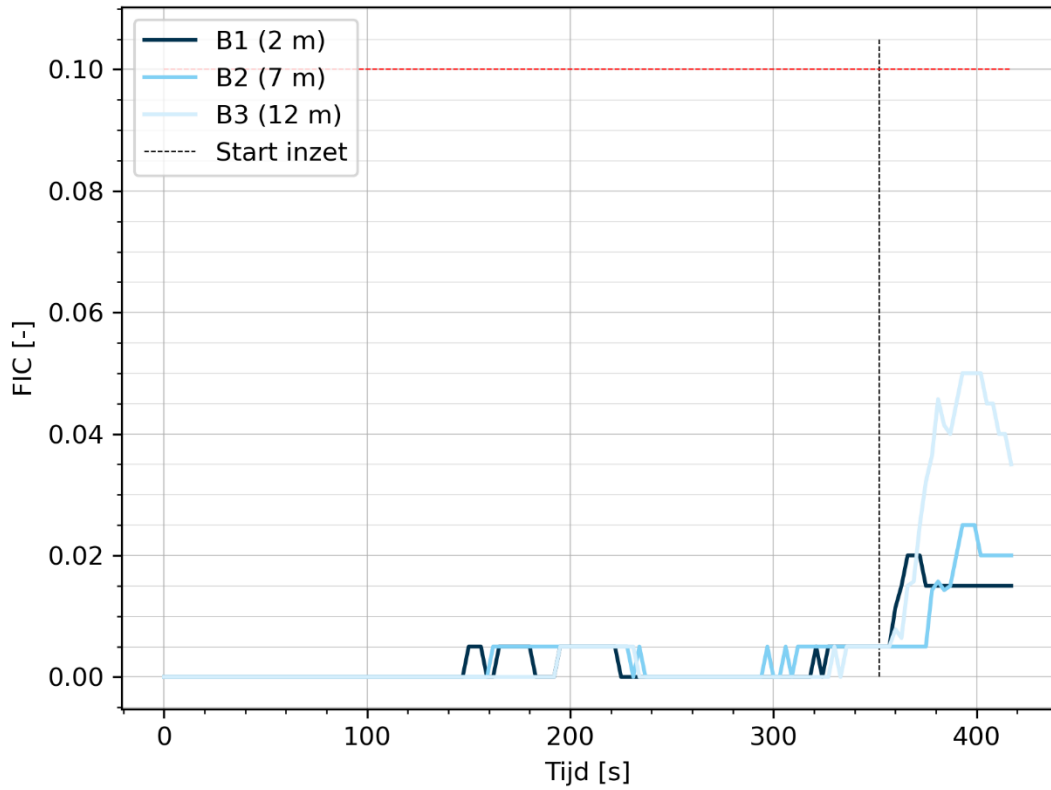
### Verstikkende gassen (dosis) LD 450 halve maan - test 2



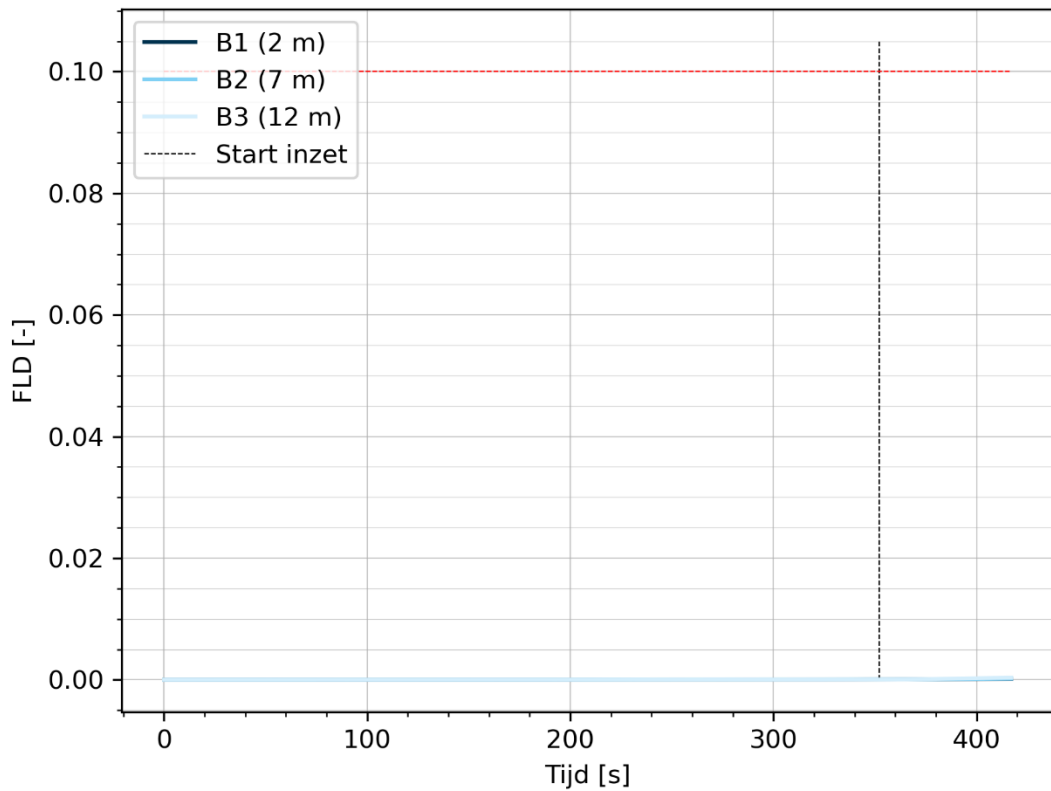
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m LD 450 halve maan - test 2



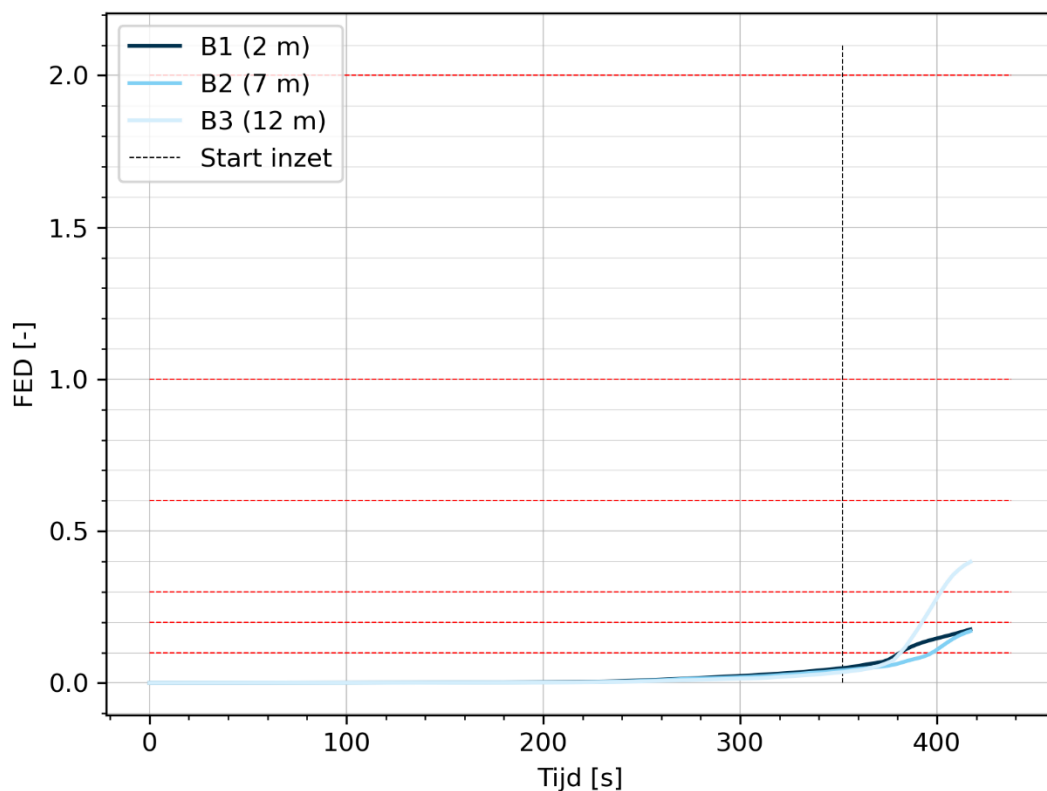
### Irriterende gassen (concentratie) DLS halve maan - test 1



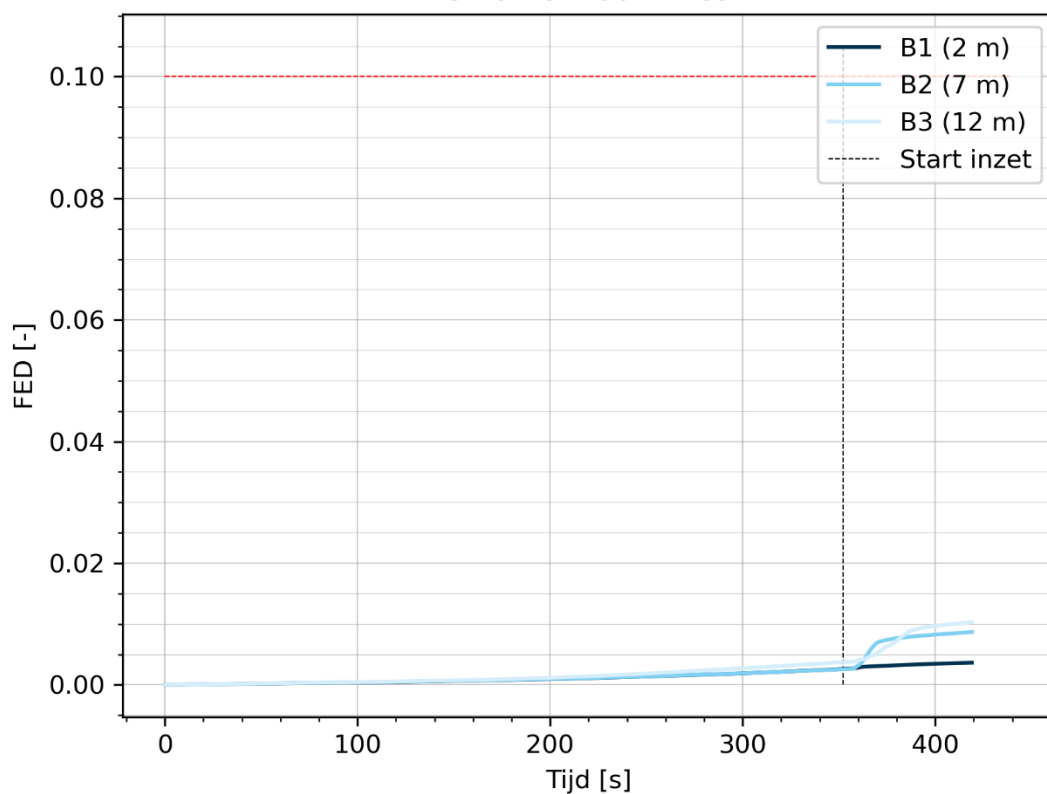
### Irriterende gassen (dosis) DLS halve maan - test 1



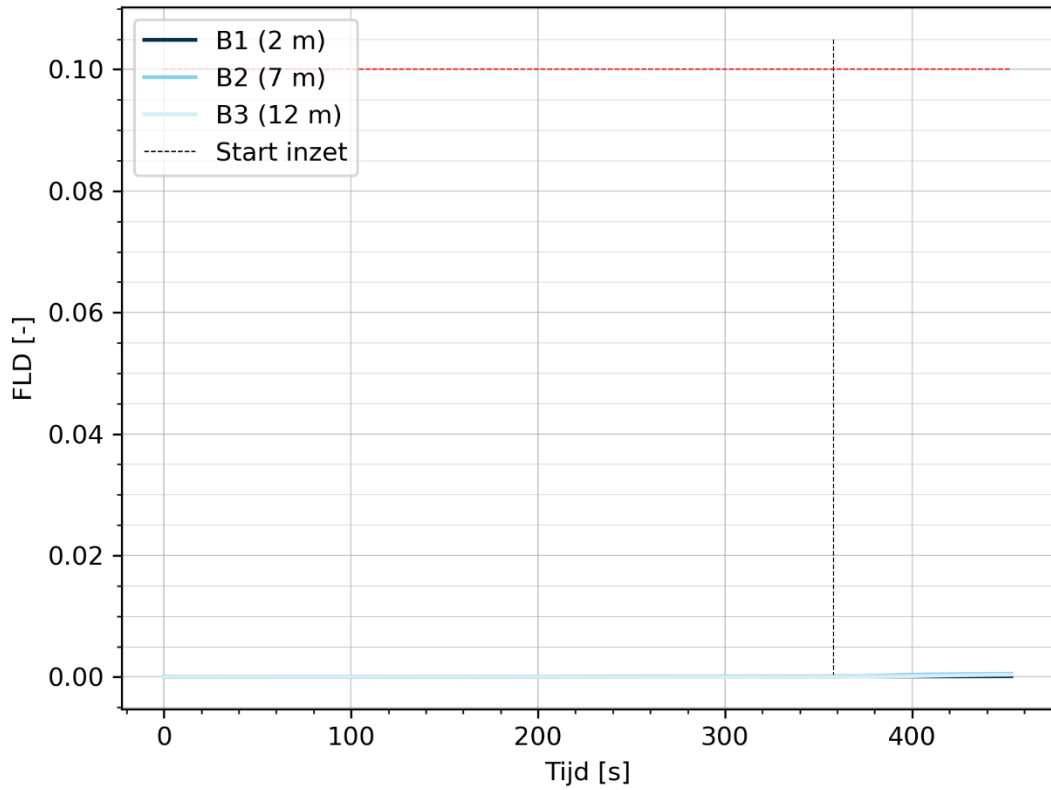
### Verstikkende gassen (dosis) DLS halve maan - test 1



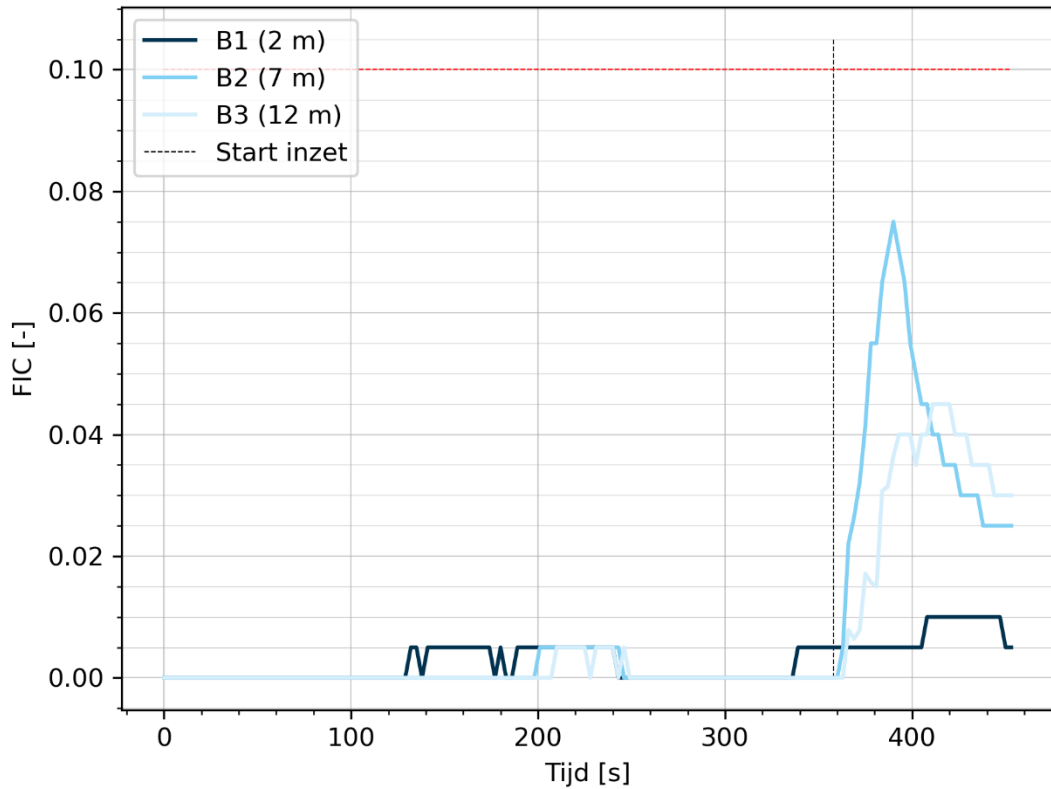
### Warmtestraling (dosis) 0.3 m DLS halve maan - test 1



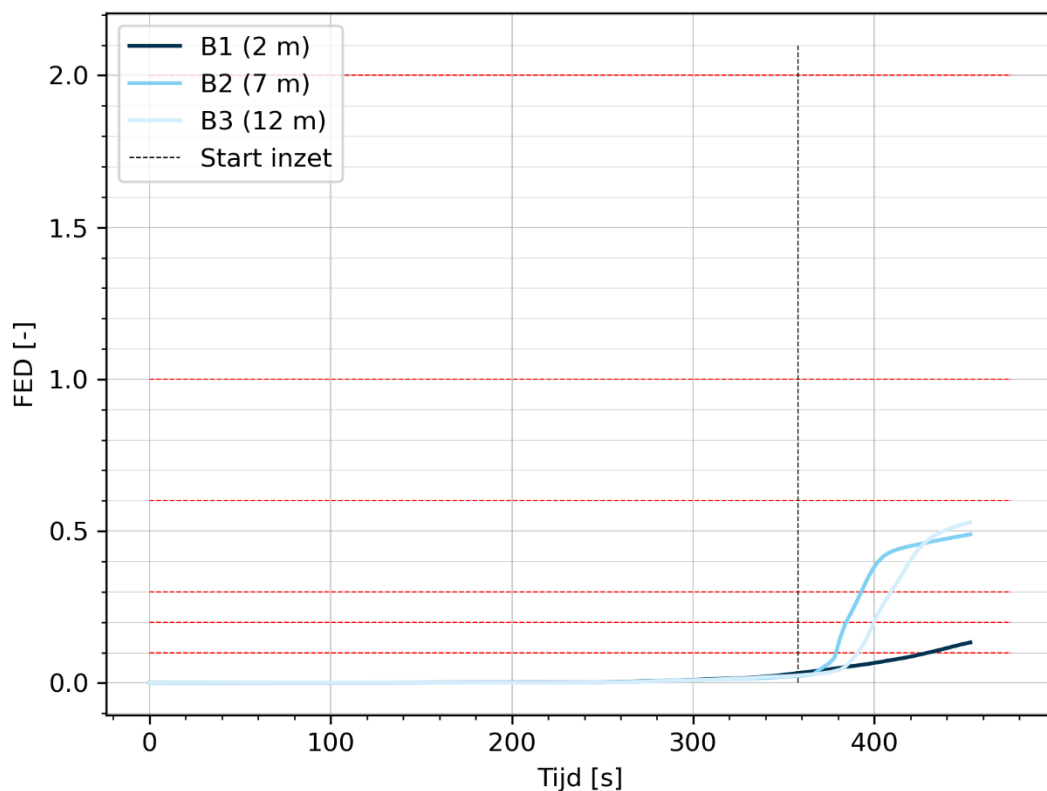
### Irriterende gassen (dosis) DLS halve maan - test 2



### Irriterende gassen (concentratie) DLS halve maan - test 2



### Verstikkende gassen (dosis) DLS halve maan - test 2



### Warmtestraling (dosis) 0.3 m DLS halve maan - test 2

