

Rookgaskoeling opnieuw belicht



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2025

Auteur(s)	I. Tanck, V. Jansen, L. Wolfs, J. Ebus, R. van den Dikkenberg
Review	R. Weewer
Met medewerking van	Brandweermensen uit heel Nederland
Contactpersoon	R. van den Dikkenberg

Datum	11 december 2025
-------	------------------

Foto's	J. Vos
--------	--------

Met dank aan	B. Noyens
--------------	-----------

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

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

Samenvatting

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) heeft in 2025 vervolgonderzoek uitgevoerd naar rookgaskoeling — de techniek waarmee brandweerlieden rookgassen koelen om veiliger naar de brandhaard te kunnen vorderen. Dit onderzoek bouwt voort op experimenten uit 2019 en beoogt vast te stellen of de eerdere resultaten ook gelden bij andere omstandigheden, zoals met gesloten deuren en bij varianten van de boogmethode.

Doel en opzet

Het onderzoek vond plaats in het voorjaar van 2025 in samenwerking met brandweerkorpsen uit het hele land. Er werden gecontroleerde brandexperimenten uitgevoerd in dezelfde testopstelling als in 2019 met verschillende blusmethoden: de **3D-pulsmethode**, de **continue boogmethode** en de **onderbroken boogmethode**, zowel bij lage (LD) als hoge druk (HD) en met gesloten deur. Om de resultaten met 2019 te kunnen vergelijken en omdat de onderbroken boogmethode in 2019 niet is uitgevoerd zijn ook 4 experimenten met open deur uitgevoerd. Tijdens de inzetten werden temperatuur, warmtestraling en gasconcentraties gemeten, evenals de subjectieve beleving van brandweerlieden (comfort, inspanning, pijn).

Belangrijkste resultaten

- **Temperatuur en energie:** In alle experimenten daalde de temperatuur en energie-inhoud van de rooklaag tijdens rookgaskoeling. De daling was het sterkst bij de **continue boogmethode met lage druk (LD)**. De verschillen tussen de methoden waren klein, maar alle inzetten bleken effectiever dan geen inzet.
- **Invloed van de deurpositie:** Sluiten van de deur had een positief effect op de temperatuurverlaging en de beperking van rookverspreiding. Ook bij gesloten deur bleven de resultaten uit 2019 geldig.
- **Veiligheid brandweerlieden:** De warmtestralingsniveaus bleven binnen de veilige grenzen. Brandweerlieden ervoeren lichte toename van inspanning en ongemak door hitte en beperkte zichtbaarheid, maar geen gevaarlijke condities.
- **Veiligheid slachtoffers:** Metingen van zuurstof, koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO₂) en stikstofoxiden (NOx) toonden aan dat CO de belangrijkste risicofactor blijft voor verstikking.
- **Herhaalbaarheid en betrouwbaarheid:** De metingen werden uitgevoerd met gekalibreerde sensoren en bevestigden de robuustheid van de eerdere onderzoeksresultaten. De spreiding tussen experimenten was klein, wat duidt op een consistente uitvoer.

Conclusies

De kernbevinding is dat **de conclusies uit 2019 overeind blijven**, ook bij variaties in deurpositie en straalgebruik. De bestaande leerstof en lesmethodiek van het Centrum voor opleiding en vorming brandweer (COVB) van het NIPV hoeven niet te worden aangepast; ze worden juist verder onderbouwd door dit onderzoek. De continue boogmethode met lage druk blijkt in de praktijk het meest effectief voor rookgaskoeling.

Voorwoord

Met trots presenteer ik u dit rapport over de praktijkexperimenten die we in het voorjaar van 2025 hebben uitgevoerd naar methoden om rookgassen te koelen op weg naar de brandhaard. Met trots om twee redenen.

De eerste is dat ik weer heb mogen zien waar onderzoekers samen met brandweerprofessionals toe in staat zijn. Een praktisch ingewikkeld onderzoek waar praktijk en wetenschap nauw hebben samengewerkt, zowel in de vraagstelling als het ontwerp als in de uitvoering. Dit onderwerp staat internationaal in de belangstelling. De experimenten werden bijgewoond door een delegatie brandweermensen uit het buitenland en er werd zelfs een hele podcast aan gewijd. Het is werkelijk uniek dat dit soort praktijkexperimenten worden uitgevoerd, dat gebeurt nergens in Europa. Daar mogen de brandweer en het NIPV trots op zijn.

In de tweede plaats ben ik trots dat we in staat zijn geweest om te checken of de resultaten uit het onderzoek in 2019 ook in twee andere situaties van toepassing zijn. Destijds hebben we de experimenten uitgevoerd met deur open, en al snel kwam er discussie of de resultaten ook met de deur dicht zouden gelden. Ook werd gesteld dat het “niet eerlijk was” om een onderbroken puls methode te vergelijken met een continue straal zoals in de boogmethode. Dus hebben we nu gekeken wat de boogmethode zou doen als de straal tijdens het voortbewegen gesloten zou worden. Zo waren we in staat de conclusies van weleer te versterken.

Dit onderzoek is uitgevoerd in nauwe samenwerking met de community of practice brand. Het was een belevenis waarin we met elkaar niet alleen de uitvoering hebben gedaan, maar ook discussies over het vak hebben kunnen voeren, zelfs met de internationale gasten. Wij concluderen dat de resultaten van de vorige praktijkexperimenten ook onder de geteste omstandigheden blijven gelden. Dat betekent dat we niets in de les en leerstof hoeven te veranderen, maar datgene wat we doceren nog sterker door de praktijk wordt ondersteund.

Ik wil iedereen die heeft meegedaan of bijgedragen aan dit onderzoek van harte bedanken en wens u veel genoegen bij het lezen van dit rapport.

Ricardo Weewer
Lector Brandweerkunde
Nederlandse Academie voor Crisisbeheersing en Brandweezorg

Inhoud

	Samenvatting	3
	Inleiding	7
1	Onderzoeksopzet	10
1.1	Algemene informatie over de opzet	10
1.2	Locatie	10
1.3	Brandstof	12
1.4	Onderzochte blussystemen en inzetmethodes	12
1.5	Meetopstelling	15
1.6	Protocollen	17
1.7	Data-analyse	20
1.8	De kwaliteit van het onderzoek	27
2	Resultaten	30
2.1	Experimentcondities	30
2.2	Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op temperatuur en energie	31
2.3	Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op de vuurhaard	37
2.4	Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers	38
2.5	Rookgaskoeling met de continue en onderbroken boogmethode	43
3	Conclusie	52
3.1	Beantwoording van de deelvragen	52
3.2	Beantwoording van de hoofdvraag	54
4	Discussie	56
5	Vergelijking 2019 en 2025	58
6	Literatuurlijst	59
	Bijlage 1 Inzetprotocol	60
	Bijlage 2 Meetapparatuur	70
	Bijlage 3 Vragenlijst subjectieve beleving brandweerpersoneel	80
	Bijlage 4 Herhaalbaarheid	84
	Bijlage 5 Nulmeting	89
	Bijlage 6 Temperatuur	90
	Bijlage 7 Voorwaartse en achterwaartse koeling	95

Bijlage 8 Veiligheid brandweerpersoneel	102
Bijlage 9 Veiligheid slachtoffers	103

Inleiding

Aanleiding

In 2019 zijn er in samenwerking met de studiegroep Brand praktijkexperimenten met rookgaskoeling uitgevoerd (Brandweeracademie, 2021). Hiertoe zijn twee methoden met verschillende debieten met elkaar vergeleken. Omdat een (klein) deel van de Nederlandse brandweer gebruikmaakt van drukluchtschuim (DLS), was ook dit blusmiddel betrokken bij deze praktijkexperimenten.

De methoden die zijn gebruikt in het onderzoek waren de tot dan toe gebruikelijke 3D-pulsmethode, waarbij met lange pulsen water werd gebracht in de rookgaslaag tijdens het vorderen naar de vuurhaard, en de zogenaamde continue boogmethode. Met deze laatste methode werd met een continue straal water op het plafond en wanden gebracht tijdens het vorderen naar de vuurhaard. De experimenten zijn uitgevoerd met verschillende debieten, met zowel hoge druk (HD) als lage druk (LD) bij een dynamische rookgaslaag. Dit werd beschouwd als een worst-case scenario, omdat de brand voortdurend werd voorzien van zuurstof en zich maximaal kon ontwikkelen.

De conclusies uit deze experimenten zijn:

- > Met beide methoden en met DLS kunnen rookgassen gekoeld worden.
- > De continue boogmethode is bij lagere debieten eenvoudiger uit te voeren en koelt iets beter dan de 3D-pulsmethode en DLS.
- > Meer water betekende niet meer stoom, dus geen ongemak.

Toch werden er vanuit het werkveld ook een paar kanttekeningen geplaatst. De situatie van een dynamische rookgaslaag waarbij de deur van het pand openstaat, strookt niet met de basisprincipes van brandbestrijding (hou het pand zoveel mogelijk dicht). Dat ook de stoom op deze manier ontsnapt, zou de reden kunnen zijn dat er geen ongemak is ervaren. Dit zou anders zijn indien de deur van het pand (zoveel mogelijk) dicht wordt gehouden waardoor de stoom niet weg kan en er dus eventueel veel ongemak/slechte condities voor brandweermensen en slachtoffers gecreëerd wordt. Daarnaast werd aangegeven dat het continu openhouden van de straalspijp bij hogere debieten erg belastend is voor de brandweermensen en vertragend werkt op het vorderen. Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen beide technieken zou daarom de continue boogmethode ook pulserend toegepast moeten worden, immers het verschil tussen beide technieken is niet alleen de manier waarop het water wordt ingebracht, maar ook of de straalspijp continu openblijft (zoals bij de continue boogmethode) of pulserend open en dicht is (zoals bij de 3D-pulsmethode). Naar aanleiding van de bovengenoemde kanttekeningen is besloten om de experimenten uit 2019 opnieuw uit te voeren, maar ditmaal met de deur (zoveel mogelijk) dicht en de onderbroken boogmethode als extra methode.

Doel

Het doel van dit onderzoek is te bepalen op welke wijze en in welke mate diverse methoden van rookgaskoeling (3D-pulsmethode, continue boogmethode en onderbroken boogmethode) invloed hebben op de condities in de ruimte (temperatuur en energie) en voorwaartse en achterwaartse koeling), op de vuurhaard en op de veiligheid van brandweermensen en eventuele slachtoffers tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag. De deur wordt daarbij dicht gehouden. Voor de onderbroken boogmethode zijn ook experimenten gedaan met een dynamische rooklaag (deur open).

Hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

In welke mate worden, bij gebruik van de 3D-pulsmethode, de continue boogmethode en de onderbroken boogmethode, rookgassen gekoeld en de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed bij het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag en voor de onderbroken boogmethode ook met een dynamische rookgaslaag?

Om deze hoofdvraag te beantwoorden zijn vijf deelvragen geformuleerd:

- > In hoeverre komen de condities van de experimenten in 2025 overeen met de condities van de experimenten in 2019?
- > In welke mate is het bij gebruik van de continue boogmethode, onderbroken boogmethode en 3D-pulsmethode mogelijk om rookgassen te koelen bij het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht), in termen van:
 - temperatuur
 - energie
 - voorwaartse en achterwaartse koeling
- > In welke mate is het bij gebruik van de continue boogmethode, onderbroken boogmethode en 3D-pulsmethode mogelijk om tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht) de vuurhaard te beïnvloeden?
- > In welke mate wordt de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed tijdens het koelen van rookgassen bij het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht)?
- > Wat is het effect van de rookgaskoeling met de onderbroken boogmethode ten opzichte van de continue boogmethode met de straal voortdurend open in zowel een dynamische rooklaag (deur open) als een statische rooklaag (deur dicht)?

Afbakening

Het onderzoek richt zich uitsluitend op methoden van rookgaskoeling waarbij gebruik gemaakt wordt van LD 250 l/min en HD. Rookgaskoeling met LD 450 l/min is niet meegenomen in het onderzoek, omdat uit de experimenten van 2019 is gebleken dat het continu openhouden van de straalpijp bij dit debiet erg belastend is voor brandweermensen en vertragend werkt op het vorderen. Ook DLS is niet meegenomen in het onderzoek, aangezien dit blusmiddel bij steeds minder brandweerkorpsen in Nederland wordt gebruikt.

De 3D-pulsmethode en de continue boogmethode voor rookgaskoeling uit de les- en leerstof worden tijdens de praktijkexperimenten uitgevoerd en vergeleken met de onderbroken boogmethode. Andere blussystemen die mogelijk voor rookgaskoeling kunnen worden gebruikt, maken geen onderdeel uit van dit onderzoek.

Betrokkenheid van het brandweerveld

Zoals gebruikelijk bij praktijkexperimenten is het werkveld ook bij onderhavige praktijkexperiment betrokken, namelijk de Community of Practice (CoP) brand. De leden van de CoP brand hebben samen met onderzoekers van het NIPV 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.

1 Onderzoeksopzet

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het onderzoek beschreven, te beginnen met enige algemene informatie. Vervolgens wordt er nader ingegaan op de locatie, waarna een overzicht wordt gegeven van de brandstof, de onderzochte blussystemen en inzetmethodes en de meetopstelling. Ten slotte komen de protocollen, de data-analyse en de kwaliteit van het onderzoek aan bod.

1.1 Algemene informatie over de opzet

De praktijkexperimenten hebben plaatsgevonden van 28 april tot en met 1 mei 2025. Elke dag zijn vier experimenten uitgevoerd. In totaal zijn er 16 experimenten uitgevoerd.

Tijdens de experimenten is uitgegaan van één bassiscenario:

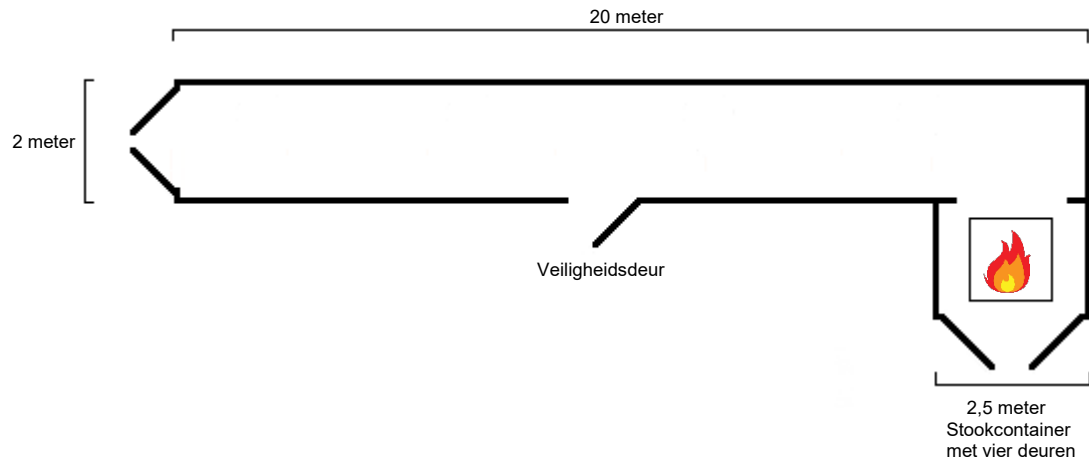
Een flinke woonkamerbrand (6 – 8 MW) met de deur van de woonkamer naar de gang open, waarbij rook de aangrenzende gang instroomt, en met de voordeur van de woning open bij aankomst van de brandweer.

Tijdens de experimenten is de buitendeur (voordeur) na binnentreden van de inzetploeg zoveel mogelijk dichtgedaan, met alleen een verticale kier van 9 cm breed om de slang door te voeren. In alle experimenten is er een open verbinding geweest tussen de woonkamer en de gang. Tijdens 10 experimenten heeft er een inzet plaatsgevonden met de verschillende blussystemen en inzetmethodes met de deur zo veel mogelijk dicht (zie paragraaf 1.4.1 voor een overzicht van de experimenten). Daarnaast zijn er twee nulmetingen uitgevoerd waarbij er geen inzet heeft plaatsgevonden. Om tijdens de nulmetingen de slangdoorvoer na te bootsen, is de voordeur op een kier gezet door er een steen van 9 cm breed tussen te leggen. Omdat experimenten met een onderbroken boogmethode in 2019 niet zijn uitgevoerd, zijn er nu ook twee experimenten met de onderbroken boogmethode met de deur open uitgevoerd. Verder zijn er nog twee experimenten met de continue boogmethode met de deur open uitgevoerd als herhaling van 2019, om de reproduceerbaarheid van de resultaten te verifiëren.

1.2 Locatie

De experimenten zijn uitgevoerd bij Troned Training Factory van Twente Safety Campus, een trainingscentrum voor professionele hulpdiensten. Het bouwwerk waarin de experimenten zijn uitgevoerd, is in 2019 gebouwd voor de eerste experimenten naar rookgaskoeling (Brandweeracademie, 2021). Het gebouw is L-vormig, met een gang van 20 m lang en 2 m breed. De gang is opgebouwd uit kalkzandsteen (wanden), betonkanaalplaten (dak) en betonplaten (vloer). Bij de toegang tot de gang zitten twee deuren. De breedte van de toegang is met geopende deuren 1,60 m breed en 2,15 m hoog. Elke deur is 0,83 m breed en 2,12 m hoog. Halverwege de gang zit een veiligheidsdeur naar buiten (0,83 m breed en 2,12 m hoog). De korte kant van de L-vorm wordt gevormd door een

aangepaste stalen zeecontainer waarin de vuurhaard is geplaatst. Dit stookgedeelte met een totale afmeting van 2,5 bij 2,5 m heeft vier deuren en een schuifluik (circa 0,4 x 0,6 m) voor ventilatie. Boven de deuren van de gang is een rookschot van 43 cm aangebracht. De plattegrond van de locatie en het buitenaanzicht zijn weergegeven in Figuur 1.1 en 1.2.

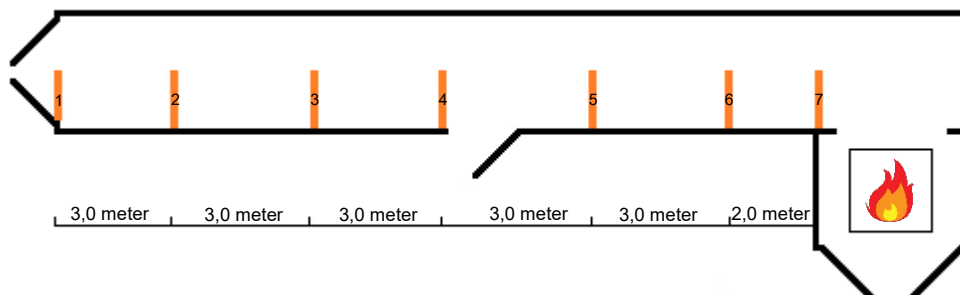


Figuur 1.1 Plattegrond van testlocatie



Figuur 1.2 Buitenaanzicht van testlocatie

In de gang bevinden zich zeven drempels. Tussen alle drempels zit 3 meter, met uitzondering van de ruimte tussen drempel 6 en 7, waar 2 meter tussen zit (zie Figuur 1.3). Bij de deur ligt geen fysieke drempel (maar in de experimenten wordt dit wel drempel 1 genoemd). Met behulp van deze drempel kan de inzetploeg zich oriënteren in de gang als er weinig tot geen zicht is en kan de vordering van de ploeg worden bijgehouden.



Figuur 1.3 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
- > schuimblok¹
- > spaanplaat
- > 5 pallets.

Verder is aan beide zijden een spaanplaat schuin geplaatst (onderin tegen vuurhaard) en boven de vuurhaard net onder 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, een links en een rechts. De hoeveelheid brandstof is weergegeven in Figuur 1.4. In totaal bestond de brandstof uit circa 180 kg vurenhout, 143 kg spaanplaat en 9 kg schuim. Het potentieel brandvermogen lag tussen de 6 en 8 megawatt, vergelijkbaar met dat van een brand in een woonkamer.



Figuur 1.4 Hoeveelheid brandstof

1.4 Onderzochte blussystemen en inzetmethodes

De volgende blussystemen zijn onderzocht:

- > hogedruk 125 l/min (HD)

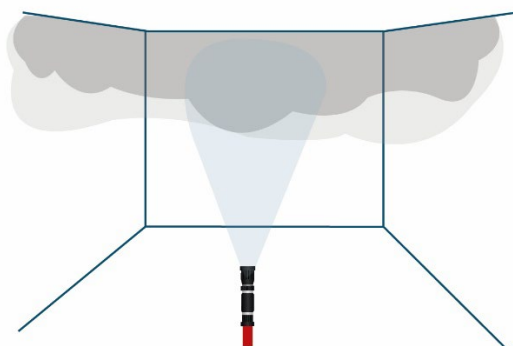
¹ HR-polyetherschuim, schuimtype R37130, dichtheid 33-36 kg/m³, afmeting 100 x 100 x 21 cm.

> lagedruk 250 l/min (LD)

Daarbij zijn er drie verschillende rookgaskoelingsmethodes ingezet: de 3D-pulsmethode (3D), de continue boogmethode (CB) en de onderbroken boogmethode (OB). Hieronder is kort beschreven wat de methodes inhouden. Een volledige beschrijving van de methodes is te vinden in het inzetprotocol in Bijlage 1.

3D-pulsmethode

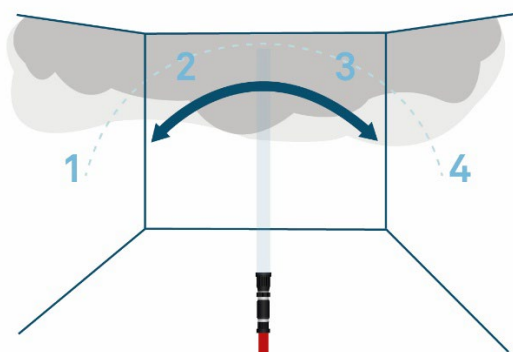
De 3D-pulsmethode zoals gebruikt in dit onderzoek is gebaseerd op de les- en leerstof van de opleiding voor manschap uit 2019. De straalpijpvoerder geeft aan het begin van de gang een lange puls van drie seconden in de rooklaag met een kegelhoek van 30 graden, zie Figuur 1.5. Na de puls vordert de ploeg richting de vuurhaard. Vanaf de toegang van het gebouw en bij elke drempel wordt er een puls van drie seconden gegeven, totdat de ploeg de vuurhaard heeft bereikt.



Figuur 1.5 3D-Pulsmethode

Continue boogmethode

De continue boogmethode is gebaseerd op de methode 'flow and move' die in de Verenigde Staten wordt toegepast (Zevotek et al., 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 Boogmethode

De straalpijpvoerder zet aan het begin van de gang de straalpijp open. Hij begint het boogpatroon te maken met een gebonden straal. De ploeg vordert naar de vuurhaard en de straalpijpvoerder blijft continu het boogpatroon maken tot de vuurhaard bereikt is. De

straalpijpvoerder begint vrij dicht voor zich (1 meter) met koelen, maar koelt gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit.

Onderbroken boogmethode

De onderbroken boogmethode is een variant van de continue boogmethode, waarbij tijdens het vorderen de straalpijp dicht wordt gedaan zoals bij de 3D pulsmethode. Deze methode is ontwikkeld, omdat bij de eerdere experimenten het tegelijk vorderen en het maken van het boogpatroon door de inzetploegen als vrij zwaar werd ervaren, zeker met LD 450 l/min (Brandweeracademie, 2021) en om een goede vergelijking te maken tussen de twee onderbroken pulsmethoden (3D-pulsmethode en onderbroken boogmethode).

De beweging die gemaakt wordt met de straalpijp, komt overeen met de continue boogmethode, namelijk het patroon 1-2-3-4-3-2-1 (Figuur 1.6). De straalpijp wordt met deze methode niet voortdurend opengehouden, maar wordt gesloten tijdens het vorderen. Bij de eerste drempel aan het begin van de gang maakt de straalpijpvoerder met een gebonden straal het patroon van de continue boogmethode, waarna hij of zij de straal dichtdoet. Hierna vordert de ploeg richting de vuurhaard. Bij elke drempel opent de straalpijpvoerder de straalpijp om een boog te maken, om vervolgens de straalpijp weer dicht te doen, totdat de vuurhaard is bereikt.

1.4.1 Overzicht van de experimenten

In Tabel 1.1 is een overzicht opgenomen van alle experimenten die uitgevoerd zijn.

Tabel 1.1 Overzicht uitgevoerde experimenten

Experiment	Datum	Blussysteem (druk / debiet)	Inzetmethode	Stand deur (open / dicht)
1	28-04-2025	Nulmeting	Geen	Dicht
2	28-04-2025	Nulmeting	Geen	Dicht
3	28-04-2025	LD 250 l/min	Continue boogmethode	Open
4	28-04-2025	LD 250 l/min	Continue boogmethode	Open
5	29-04-2025	LD 250 l/min	Continue boogmethode	Dicht
6	29-04-2025	LD 250 l/min	Continue boogmethode	Dicht
7	29-04-2025	LD 250 l/min	3D pulsmethode	Dicht
8	29-04-2025	LD 250 l/min	3D pulsmethode	Dicht
9	30-04-2025	LD 250 l/min	Onderbroken boogmethode	Dicht
10	30-04-2025	LD 250 l/min	Onderbroken boogmethode	Dicht
11	30-04-2025	LD 250 l/min	Onderbroken boogmethode	Open
12	30-04-2025	LD 250 l/min	Onderbroken boogmethode	Open
13	01-05-2025	HD 125 l/min	3D pulsmethode	Dicht

14	01-05-2025	HD 125 l/min	3D pulsmethode	Dicht
15	01-05-2025	HD 125 l/min	Onderbroken boogmethode	Dicht
16	01-05-2025	HD 125 l/min	Onderbroken boogmethode	Dicht

1.5 Meetopstelling

Tijdens de experimenten zijn diverse parameters gemeten. Het gaat daarbij om de temperatuur, straling, gasconcentraties en beeld van binnen en buiten. Daarnaast is de subjectieve beleving 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 ieder zeven thermokoppels geplaatst op verschillende hoogtes: 0,3 meter, 0,9 meter, 1,5 meter, 1,8 meter, 2,0 meter, 2,2 meter en 2,4 meter. De bovenste zes thermokoppels van iedere meetboom 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.. Daarnaast zijn in de brandruimte vijf losse thermokoppels geplaatst voor het meten van de temperatuur aldaar. De data van deze thermokoppels zijn geregistreerd met behulp van het systeem LabVIEW. Straling

Er zijn twee typen warmtestralingsmeters gebruikt om de straling te meten: drie watergekoelde fluxmeters (Schmidt-Boelter) en vier plaatfluxmeters (PTHFM). De plaatfluxmeters zijn geplaatst in meetbomen B1 tot en met B4 op 1,5 meter hoogte en worden gebruikt als maat voor de straling die wordt ervaren door de inzetploeg tijdens het vorderen. De watergekoelde fluxmeters zijn gevoeliger en hebben een kleiner meetbereik. Daarom zijn ze geplaatst bij meetbomen B1 tot en met B3 op 0,3 meter, als maat voor een eventueel slachtoffer op die locaties. De data van deze warmtestralingsmeters zijn ook geregistreerd met behulp van LabVIEW. De watergekoelde fluxmeter is met groen omcirkeld en plaatfluxmeter is met geel omcirkeld in Figuur 1..



Figuur 1.7 Meetboom met sensoren

1.5.2 Gasconcentraties

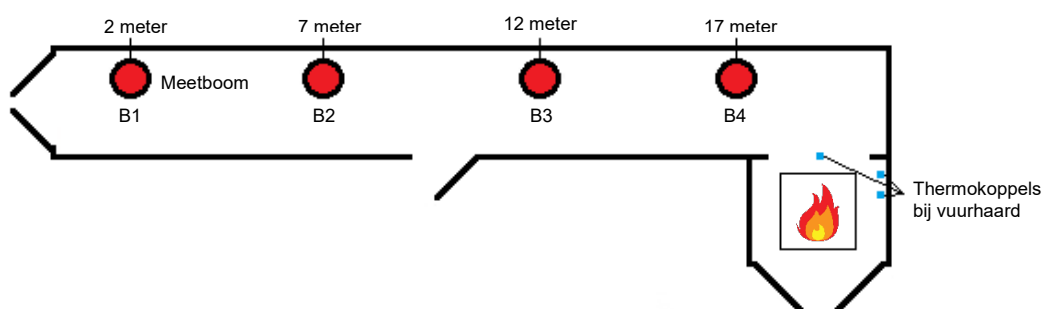
De gasconcentraties van zuurstof (O_2), koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO_2) en stikstofoxiden (NO_x) zijn ook van belang voor eventuele slachtoffers en zijn daarom ook gemeten op 0,3 meter hoogte. De gasmetingen zijn uitgevoerd met Testo-meetapparatuur. In Figuur 1. is de Testo-sonde met blauw omcirkeld.

In totaal zijn op drie posities gasmetingen gedaan bij B1 tot en met B3. De data van de gasmetingen zijn geregistreerd met behulp van het systeem van Testo.

In Tabel 1.2 is een overzicht weergegeven van de manier waarop en de locaties waar de parameters zijn gemeten. Detailgegevens over de gebruikte meetapparatuur zijn opgenomen in Bijlage 2. De meetlocaties zijn weergegeven in Figuur 1.8.

Tabel 1.2 Overzicht van parameters, meetwijze en meetlocatie

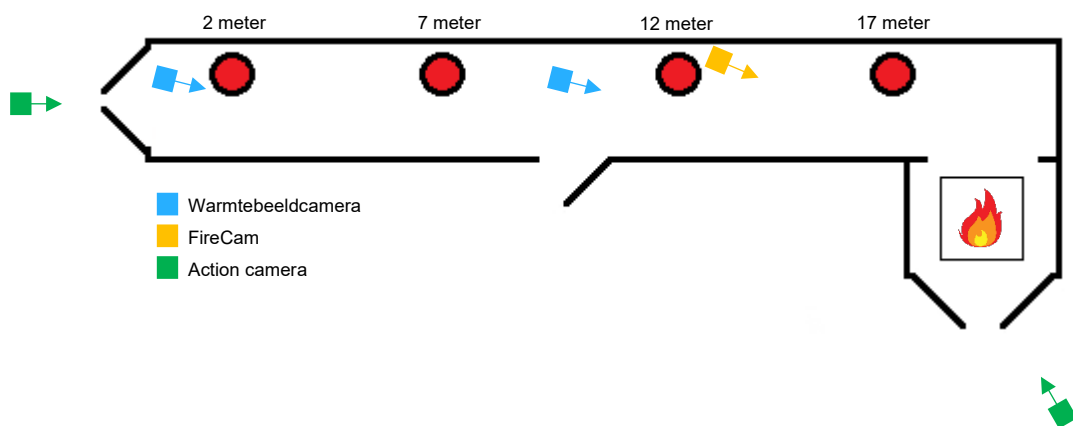
Parameter	Meetwijze	Meetlocatie	Meethoogte (m)
Temperatuur	Thermokoppels type K	B1 t/m B4	0,3 - 0,9 - 1,5 - 1,8 – 2,0 - 2,2 - 2,4
		Brandruimte	2,0 (uitstroomopening) - 2,2 - 2,4
Straling	Plaatfluxmeter (PTHFM)	B1 t/m B4	1,5
	Watergekoelde fluxmeter (SB)	B1 t/m B3	0,3
Gasconcentraties	Rookgasanalyser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



Figuur 1.8 Plattegrond met locaties van meetapparatuur

1.5.3 Camerabeelden

De experimenten zijn geregistreerd met vijf videocamera's: twee actioncamera's, twee 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 en om de inzet te analyseren. Voor ieder experiment zijn de camera's geijkt om achteraf de beelden gelijk te kunnen stellen. Drie camera's zijn in de gang van het gebouw op de grond geplaatst. Daarnaast zijn twee camera's buiten geplaatst: een gericht op de deuren van de ingang en een op de stook-container. De locaties van de camera's zijn weergegeven in Figuur 1.9.



Figuur 1.9 Plattegrond met locaties van de camera's

1.5.4 Subjectieve beleving van de inzetploeg

Voor de invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van de brandweermensen is uitgegaan van de stralingsmetingen die zijn uitgevoerd op 1,5 m hoogte. Daarnaast is de subjectieve beleving van de brandweermensen gemeten aan de hand van een vragenlijst. De straalspijvoerder en de nummer 2 hebben voor en na elke inzet een korte vragenlijst ingevuld over warmtebeleving, (dis)comfort, pijnsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning tijdens de inzet. Ook konden ze aangeven op de plattegrond van de testlocatie waar zij de meeste warmte hadden ervaren. De vragenlijst voorafgaande aan het experiment (nulmeting) bestond uit zes vragen en de vragenlijst na afloop bestond uit tien vragen. De vragenlijsten zijn opgenomen in Bijlage 3.

1.6 Protocollen

1.6.1 Inzetploeg

Brandweermensen uit verschillende veiligheidsregio's vormden de inzetploegen die de experimenten hebben uitgevoerd. Aan het begin van de dag werden de inzetploegen geïnstrueerd. Daarnaast hebben de inzetploegen de inzetmethode en het inzetprotocol buiten naast de testlocatie (nat) (zie Figuur 1.10) en in de testlocatie (droog) beoefend, voorafgaande aan de inzet.



Figuur 1.10 Inzetploeg oefent inzet buiten naast de testlocatie (nat)

Per blussysteem en inzetmethode zijn twee experimenten uitgevoerd. Elk experiment is de rol van straalpijpvoerder afgewisseld. De persoon die bij het eerste experiment straalpijpvoerder was, werd bij het tweede experiment de nummer 2. De nummer 2 van het eerste experiment werd straalpijpvoerder bij het tweede experiment.

1.6.2 Experimentprotocol

Om alle branden op uniforme wijze aan te steken en op te stoken, is een experimentprotocol opgesteld. Hierin staat beschreven op welk moment bepaalde deuren van de testlocatie gesloten moesten worden.

Inhoud experimentprotocol

De brand is aangestoken en kreeg door het openlaten van alle deuren van de stookcontainer voldoende zuurstof. Op het moment dat de vlammen het schuimblok hadden bereikt, zijn de bovenste twee deuren van de stookcontainer gesloten, zie Figuur 1.11.



Figuur 1.11 Bovenste deuren van de stookcontainer worden 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 openstaan. Vervolgens werd aan de hand van de temperatuurmetingen bepaald wanneer de temperatuur in de hele gang boven de 100 °C was, waarna de rechteronderdeur van de stookcontainer werd gesloten, zie Figuur 1.12.



Figuur 1.12 Alle deuren van de stookcontainer worden gesloten

Wanneer 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 deze in de hele gang op 2,20 m hoogte meer dan 200 °C had bereikt. Zodra de temperatuur een minuut lang boven de 200 °C bleef, werd het startsein voor de inzet gegeven.

Toegangsdeuren

Tijdens de experimenten is de rechertoegangsdeur van de gang na het binnentreden van de brandweer zoveel mogelijk gesloten, met een kier van 9 cm in verband met het doorvoeren van de slang. Tijdens vier experimenten is de rechterdeur opengehouden, namelijk bij experiment 3, 4, 11 en 12. De linker toegangsdeur was bij alle experimenten gesloten.

1.6.3 Inzetprotocol

Om alle inzetten zo uniform mogelijk uit te voeren, is een inzetprotocol opgesteld. Per inzetmethode is beschreven hoe de inzet eruit moest zien en welke handelingen de inzetploeg moest uitvoeren.

3D pulsmethode

De inzetploeg startte direct bij de ingang en gaf daar een puls van drie seconden met een kegelhoek van 30 graden. Daarna werd de deur op een kier gesloten. Vervolgens vorderde de ploeg naar de volgende drempel. Wanneer hij of zij de drempel bereikte, benoemde de straalpijpvoerder dit en herhaalde de nummer 2 het in de portofoon voor de commandoruimte. Op dat moment deed de straalpijpvoerder de straal drie seconden open. Doordat de nummer 2 de portofoon ingedrukt hield, kon de straalpijpvoerder doorgeven wanneer de straal werd gesloten. Op deze manier konden de vordering en de tijd van de puls worden geregistreerd. Dit werd uitgevoerd bij de eerste zes drempels; bij drempel 7 werd doorgegeven dat inzetploeg de vuurhaard had bereikt en werd er geen puls gegeven.

Continue boogmethode

De inzetploeg begon direct bij de ingang. De straalpijpvoerder zette de straalpijp open en begon het boogpatroon te maken met gebonden straal. Tijdens het vorderen richting de vuurhaard (tot aan drempel 7) bleef de straalpijpvoerder het boogpatroon maken. Het bereiken van elke drempel werd doorgegeven aan de commandoruimte. Bij drempel 7 werd doorgegeven dat de inzetploeg de vuurhaard had bereikt en werd gestopt met het maken van het boogpatroon.

Onderbroken boogmethode

De inzetploeg startte direct bij de ingang en maakte daar eenmaal het boogpatroon met gebonden straal. Daarna vorderde de ploeg naar de volgende drempel. Zodra deze was bereikt, werd dit door de straalpijpvoerder genoemd en herhaalde de nummer 2 het in de portofoon aan de commandoruimte. Op dat moment deed de straalpijpvoerder de straal open om het boogpatroon uit te voeren. Doordat de nummer 2 de portofoon ingedrukt hield, kon de straalpijpvoerder doorgeven wanneer de straal werd gesloten. Zodra de straal gesloten was, vorderde de inzetploeg naar de volgende drempel. Dit werd uitgevoerd bij de eerste zes drempels, bij drempel 7 werd doorgegeven dat de inzetploeg de vuurhaard had bereikt en werd er geen puls gegeven.

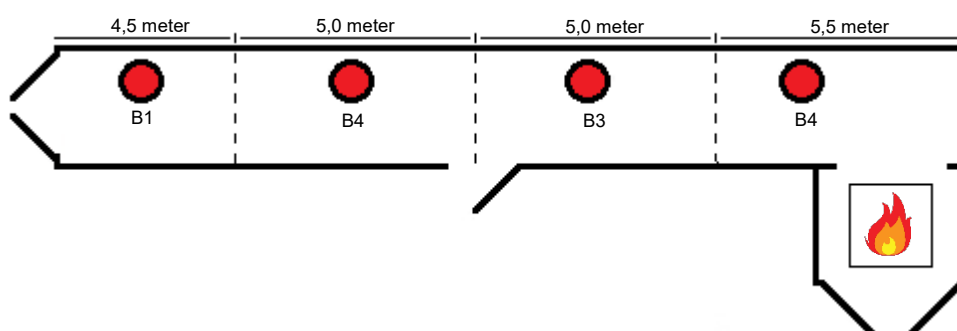
Einde inzet

Wanneer de inzetploeg had doorgegeven dat de vuurhaard (drempel 7) was bereikt, trok de ploeg zich terug en werden de deuren van de ingang en de veiligheidsdeur opgezet.

Zodra de inzetploeg uit de gang was, kon de stookcontainer worden opgemaakt en door de stokers afgeblust worden. Het inzetprotocol is te vinden in Bijlage 1.

1.7 Data-analyse

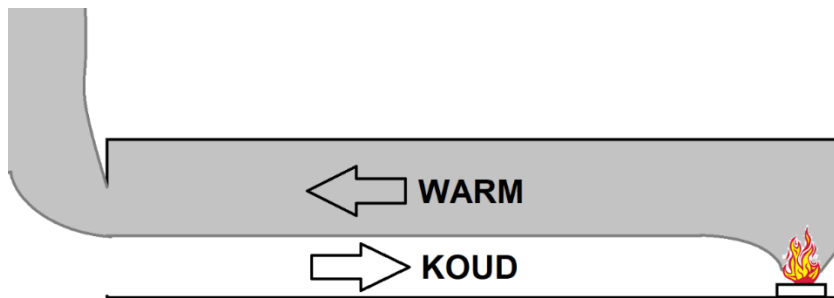
Voor het beantwoorden van de hoofdvraag is met name gebruikgemaakt van de temperatuurmetingen. Om uitspraken te kunnen doen over het effect van de inzet in de gang, is de gang in de lengterichting opgedeeld in segmenten (analoog aan de opzet uit 2019 (Brandweeracademie, 2021)). De grens tussen elk segment 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 1.13 Verdeling van de gang in verticale segmenten

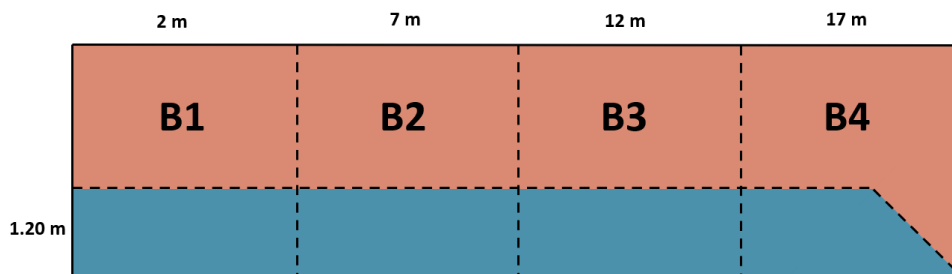
1.7.1 Warme en koude zone

Naast de indeling in segmenten in de lengterichting van de gang, is er gebruikgemaakt van principes uit zonemodellering vanuit Fire Safety Engineering (FSE) voor de hoogte. Hierbij is een tweedeling gemaakt in een warme en koude zone. Deze zones ontstaan doordat de vuurhaard hete rookgassen produceert, de aanwezige lucht opwarmt en daarnaast koudere lucht aanzuigt richting de brandhaard. Onder invloed van temperatuurverschillen ontstaan drukverschillen die ervoor zorgen dat warme gassen naar buiten stromen. Tegelijk komt er door de vraag naar zuurstof van de brand een stroming op gang van buiten naar de vuurhaard. Hierdoor ontstaan twee tegengestelde stromingen onder en boven, met boven de hete rookgassen (de warme zone) en onder de aanzuiging van buitenlucht (de koude zone). Omdat de meeste experimenten met de deur dicht werden uitgevoerd, was de verwachting dat er minder stroming zou optreden dan in 2019 met de deur open, en dat ook de scheiding tussen warme en koude zone minder duidelijk zou zijn. Om de experimenten echter op dezelfde wijze te kunnen analyseren als die uit 2019, is daarom dezelfde scheiding tussen warme en koude zone aangehouden, namelijk op 1,2 m.



Figuur 1.14 Zijaanzicht verdeling warme en koude zone

Omdat bij segment B4 nog uitstroom van rook uit de brandruimte plaatsvond, was de temperatuur ook laag bij de grond nog hoog. De grens tussen de warme en koude zone is daarom vanaf de locatie van B4 doorgetrokken tot de grond (0 m) in plaats van op 1,2 m hoogte (zie Figuur 1.15).



Figuur 1.15 Zijaanzicht verdeling van de gang in verticale segmenten en horizontale warme zone (rood) en koude zone (blauw)

1.7.2 Rookgaskoeling

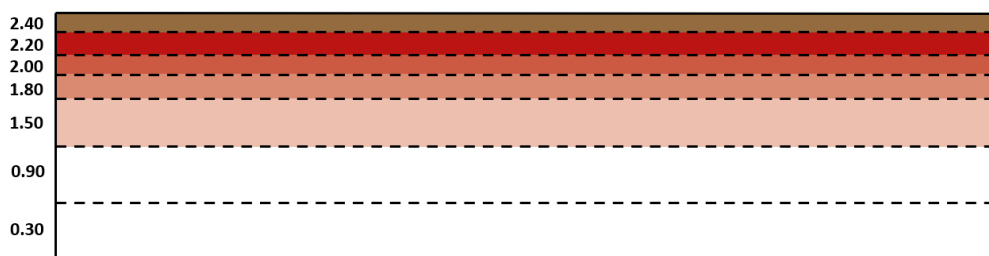
Om het effect te bepalen van de verschillende methoden op de rookgassen, is gekeken naar de temperatuurmetingen in de verschillende segmenten en zones tijdens het vorderen. De temperatuur is lokaal gemeten. Binnen een zone of segment kunnen uiteenlopende temperaturen aanwezig zijn. De metingen per zone en segment zijn daarom gemiddeld over alle thermokoppels die aanwezig zijn in een bepaalde zone of segment. De gemiddelde temperatuur tijdens het vorderen in een zone of segment is een maat voor de koeling die is verkregen door opname van warmte. Daarnaast is de energie-inhoud van een volume aan rookgas in een segment berekend. Dit is een globale eigenschap van een segment. Deze waarde is vooral gebruikt om te zien of er sprake was van een energie toe- of afname binnen een segment. De metingen zijn geanalyseerd voor de gehele duur van de inzet, dus vanaf het moment van binnentreden van de gang tot het bereiken van de vuurhaard. 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.

1.7.3 Temperatuur

De invloed van rookgaskoeling op de temperatuur op elke hoogte is als volgt bepaald: er is 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. De netto verandering van elk experiment is per methode gemiddeld om tot een algemeen effect van de gebruikte methode te komen. Omdat

de nadruk hier ligt op het effect van rookgaskoeling op de verschillende hoogtes, is hier over de gehele lengte van de gang gemiddeld.

Voor de warme zone is gekeken naar de temperaturen tussen het plafond van de gang en een hoogte van 1,2 m (Figuur 1.16, gekleurde delen). De thermokoppels die gebruikt zijn voor deze analyse hingen op 2,40 m, 2,20 m, 2,00 m, 1,80 m en 1,50 m.



Figuur 1.16 Verdeling van de warme zone over gelijk hoogtes (gekleurde delen)

Voor de koude zone is gekeken naar de temperaturen tussen de vloer en een hoogte van 1,2 m (Figuur 1.17, gekleurde delen). De thermokoppels die gebruikt zijn voor deze analyse hingen op 0,30 m en 0,90 m.



Figuur 1.17 Verdeling van de koude zone over gelijk hoogtes (gekleurde delen)

1.7.4 Energie-inhoud

Voor het bepalen van de energieverandering is 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 zijn alle thermokoppels van dat segment gemiddeld. Door te kijken naar de energie-inhoud op verschillende momenten tijdens het vorderen, kon zo de energieverandering worden bepaald die veroorzaakt werd door het vorderen. Ook maken de gelijke volumes het mogelijk om de energieveranderingen van de verschillende experimenten met elkaar te vergelijken. Hierbij is gebruikgemaakt van de relatie tussen energie en temperatuur:

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

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 $b = 665 \text{ J/kg/K}$ (NEN, 2011).

De massa wordt bepaald door de soortelijke massa en het volume. Het volume is 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 (NEN, 2011):

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

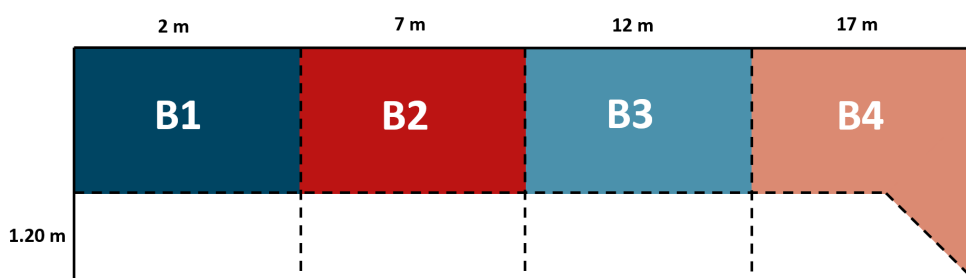
Samen wordt dit:

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

Met Q de energie in Joule, T de temperatuur in Kelvin en V het volume in m^3 .

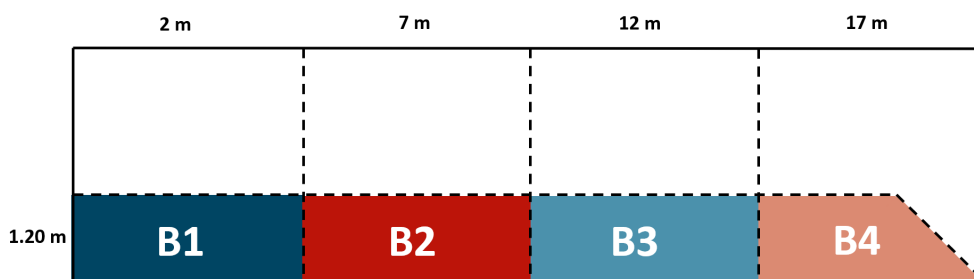
Om de energieverandering als gevolg van rookgaskoeling te bepalen, is gekeken naar de energie-inhoud per zone. Dit zijn de segmenten B1 tot en met B4 zoals aangegeven in Figuur 1.18. Net als bij de temperatuur is gekeken naar de energieverandering tussen de start van de inzet en het bereiken van de brandruimte. De energieverandering is gemiddeld over alle segmenten van de gang en over beide experimenten.

Voor de warme zone is per segment gekeken naar de energie-inhoud tussen het plafond en 1,2 m hoogte (Figuur 1.18).



Figuur 1.18 Verdeling van de warme zone per meetlocatie

Voor de koude zone is per segment gekeken naar de energie-inhoud tussen de grond en een hoogte van 1,2 m (Figuur 1.19).



Figuur 1.19 Verdeling van de koude zone per meetlocatie

1.7.5 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 werd bij de meetlocaties die zich op dat moment voor of achter de ploeg bevonden. Per experiment is kwalitatief geobserveerd of de temperatuur steeg of daalde, en hoelang 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 temperatuidaling waargenomen in de warme zone. De voorwaartse koeling is dan ongeveer 9 m (of drie 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 drie drempels. Met andere woorden: de temperatuur blijft laag tot ongeveer 9 m achter de ploeg.

1.7.6 Brandruimte

In de brandruimte zijn metingen uitgevoerd met vijf 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 het vorderen. Het afblussen van de vuurhaard is hierin niet meegenomen. De metingen van de vier thermokoppels in de brandruimte zijn gemiddeld. Per blussysteem zijn de gemiddelde temperatuur en standaarddeviatie over beide experimenten bepaald. Met deze data is ook het effect van de inzet op de vuurhaard meegenomen, bijvoorbeeld tot wanneer er nog gloed te zien is of aanzuiging richting de vuurhaard wordt waargenomen.

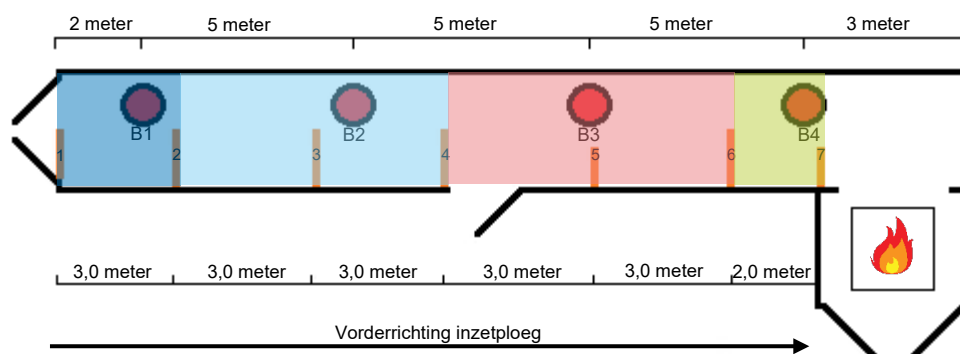
1.7.7 Veiligheid van brandweerpersoneel

Voor de invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van de inzetploeg is uitgegaan van de stralingsmetingen die zijn uitgevoerd op 1,5 m hoogte en de vragenlijsten die door de inzetploeg is ingevuld. Voor brandweerpersoneel zijn geen standaardiseerde methoden voor het berekenen van grenswaarden ontwikkeld zoals voor slachtoffers. Er is daarom gebruikgemaakt van het stralingsdeel uit de FED_{heat} methode (Fractional Effective Dose) uit het SPFE-handboek (Purser & McAllister, 2016), waarmee voor de bepaling van de blootstelling een formule is ontwikkeld. Deze formule is gebaseerd op de blootstelling aan warmtestraling volgens onderstaande toleranties (Landelijk Expertisecentrum BrandweerBRZO, 2016):

- > Maximale stralingsbelasting van 3,0 kW/m² gedurende 20 minuten
- > Maximale stralingsbelasting van 4,6 kW/m² gedurende 5 minuten.

Met de ontwikkelde formule wordt een FED van 1,0 bereikt als een of beide toleranties overschreden wordt. De ontwikkelde formule is opgenomen in Bijlage 8. Deze methode en ontwikkelde formule moeten niet gezien worden als een allesomvattende bepalingsmethode voor de veiligheid van brandweerpersoneel, maar dienen in dit onderzoek als methode om de verschillende technieken 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 1.20. Tussen drempel 1 en drempel 2 bevindt de ploeg zich in het donkerblauwe 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.



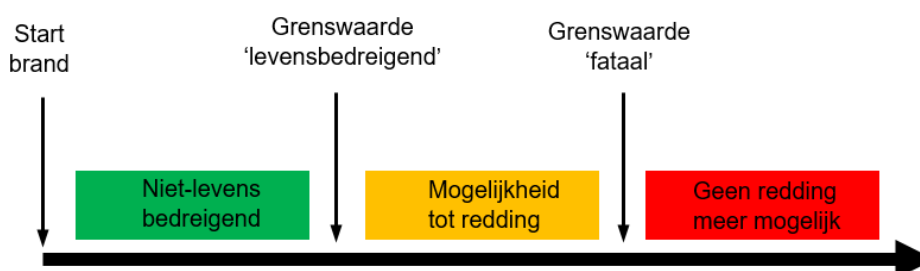
Figuur 1.20 Verdeling van de metingen voor het berekenen van de stralingsblootstelling van de inzetploeg

Subjectieve beleving van de inzetploeg

Om de subjectieve beleving van de inzetploeg te bepalen, is voorafgaand en na afloop van de experimenten een vragenlijst ingevuld door de straalpijpvoerder en de nummer 2. Zij moesten vijf onderwerpen scoren, namelijk warmtebeleving, (dis)comfort, pijnsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning tijdens de inzet. Per blussysteem en inzetmethode zijn twee experimenten uitgevoerd, waarbij de straalpijpvoerder en de nummer 2 per experiment omwisselden. Van deze twee experimenten is het gemiddelde bepaald van de straalpijpvoerder en de nummer 2 en waar nodig naar boven afgerond. Aan de hand van deze gegevens is de subjectieve beleving tijdens de verschillende inzetmethodes inzichtelijk gemaakt. Daarnaast is per onderwerp een toelichting opgenomen van het verschil in de beleving van de straalpijpvoerders en de nummers 2 voorafgaande aan en na afloop van de experimenten.

1.7.8 Veiligheid van slachtoffers

Voor de invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van slachtoffers is uitgegaan van de metingen op 0,3 m hoogte bij drie meetlocaties, namelijk B1 (2 m in de gang), B2 (7 m in de gang) en B3 (12 m in de gang). Hier zijn naast straling en temperatuur ook gassen gemeten. De overlevingsmogelijkheden voor slachtoffers zijn in drie fasen opgedeeld, zie Figuur 1.21.



Figuur 1.21 Schema van overlevingsmogelijkheden van slachtoffers bij brand

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, zijn voor verschillende condities grenswaarden vastgesteld. Deze grenswaarden zijn 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 1.3.

Op basis van deze grenswaarden is per experiment bepaald welke grenswaarde voor welke methode als eerste overschreden wordt. Daarnaast is het effect bepaald van elke inzet met de deur dicht op de overlevingscondities per populatiegroep en per meetlocatie.

Tabel 1.3 Overzicht van grenswaarden volgens het SFPE-handboek

Brandconditie	Methode	Levensbedreigend			Fataal		
		Ze er kw ets ba ar	K w ets ba ar	A l g e m e e n	Ze er kw ets ba ar	K w ets ba ar	A l g e m e e n
Irriterende gassen	FIC/FLD	0,5	1,5	5,0	0,1	0,3	1,0
Verstikkende gassen	FED _{IN}	0,1	0,3	1,0	0,2	0,6	2,0
Warmte	FED _{heat}	0,8	2,4	8,0	1,2	3,6	12,0

1.7.9 Inzettijd en waterverbruik

Voorafgaande aan de experimenten zijn debietmetingen uitgevoerd door met de straalsoep water in een IBC-container te sproeien gedurende 1 minuut. De IBC-container is voor en na het vullen gewogen. Het verschil in gewicht is het debiet in liters per minuut. Hierbij is uitgegaan van een ratio 1 kilogram = 1 liter.

Om het daadwerkelijke waterverbruik te benaderen, is per experiment aan de hand van beeldanalyse bepaald hoeveel seconden de straalsoep open heeft gestaan. Het aantal seconden is vervolgens vermenigvuldigd met het gemiddeld gemeten debiet per seconde. Het uiteindelijke waterverbruik van de verschillende methodes is gebaseerd op het gemiddelde van de twee experimenten die per inzetmethode zijn uitgevoerd.

1.7.10 Uitvoering

Met behulp van de twee warmtebeeldcamera's in de gang is gekeken naar het verloop van elk experiment. Daarbij is gelet op de uitvoering van de methode volgens protocol, de tijd om van drempel naar drempel te vorderen, de duur van de gegeven pulsen en eventuele bijzonderheden die tijdens de experimenten zijn opgevallen.

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:
 - alle experimenten uit te voeren in hetzelfde object. Dit was tevens hetzelfde object als in 2019.
 - de vuurlast tijdens elk experiment uit dezelfde soorten en hoeveelheden materialen te laten bestaan.
 - de vuurlast op exact dezelfde locatie in de brandruimte op te bouwen en te ontsteken volgens een vast protocol.
 - het ventilatieprofiel en deursluitingen gelijk te houden tijdens de experimenten.
 - het aantal experimenten dat op één dag uitgevoerd werd te beperken, zodat het gebouw vrijgemaakt kon worden van rook en/of bluswater en de temperatuur van het gebouw voorafgaand aan elk experiment weer voldoende was gedaald tot ongeveer de omgevingstemperatuur, zodat er sprake was van een gelijkwaardige startsituatie voor alle experimenten.
- > Het bevorderen van uniforme (start)condities waaronder de rookgaskoeling kon plaatsvinden door:
 - strak omschrijven, uitvoeren en controleren welke deuren bij de start van en tijdens de experimenten open dienden te zijn of gesloten dienden te worden en in welke volgorde.
 - voorafgaand aan elke inzet de temperatuur over de gehele gang op 2,20 m hoogte hoger dan 200 °C te laten zijn gedurende een periode 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 en/of water 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, zowel droog en nat buiten de gang, als droog in de gang, 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 hierin 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 de wisseling 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 2.1.

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. Daarnaast bestond het onderzoeksteam uit grotendeels dezelfde personen als in 2019, waardoor goed gebruikgemaakt kon worden van de ervaringen destijds.
 - 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 weken voorafgaand aan de experimenten een experiment (pre-test) uitgevoerd om de onderzoeksopzet en meetapparatuur te testen in de nieuwe setting met de deur dicht.
 - Alle varianten zijn dubbel uitgevoerd ten behoeve van de 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 ieder experiment gecontroleerd op de juiste werking en de juiste registratie van meetresultaten.
 - De meetresultaten zijn gekoppeld aan de camerabeelden op basis van de tijdstempels en visuele waarneming.

2 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het uitgevoerde praktijkexperiment besproken. Als eerste wordt ingegaan op de experimentcondities (paragraaf 2.1). Vervolgens komen in paragraaf 2.2 de resultaten van de experimenten met de deur dicht aan de orde. De invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard staat centraal in paragraaf 2.3 en in paragraaf 2.4 komen de resultaten van de continue en onderbroken boogmethode aan bod. In paragraaf 2.5 wordt ingegaan op de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers.

2.1 Experimentcondities

De experimenten van 2025 zijn op dezelfde wijze en op dezelfde testlocatie uitgevoerd als de experimentreeks van 2019. Een belangrijke reden hiervoor was de mogelijkheid om herhaalbare resultaten te produceren. Om te kijken in welke mate de condities van de experimenten in 2025 overeenkomen met die van in 2019, zijn de gemiddelde starttemperaturen van beide experimentreeksen met elkaar vergeleken. Daarnaast is in 2025 de variant van de LD 250 met de continue boogmethode en deur open uitgevoerd, gelijk aan de experimenten uit 2019, om de herhaalbaarheid hiervan te kunnen toetsen. Deze variant is, net als in 2019, twee keer uitgevoerd.

Gemiddelde starttemperaturen

Volgens protocol is het startsein voor elk experiment gegeven zodra de temperatuur in de gang op 2,20 meter hoogte één minuut lang boven de 200 °C was gebleven. Het gemiddelde van deze temperaturen op het moment dat gestart werd, is weergegeven in Tabel 2.1. De hoogste temperaturen bevonden zich logischerwijs dicht bij de vuurhaard (B4) en de laagste dicht bij de voordeuren (B1). Ter vergelijking zijn in de tabel ook de temperaturen van de experimentreeks van 2019 opgenomen. De gemiddelde temperaturen zijn goed vergelijkbaar, waarmee gesteld kan worden dat er vergelijkbare condities gecreëerd zijn. Alle starttemperaturen en de verdeling ervan zijn weergegeven in Bijlage 4.

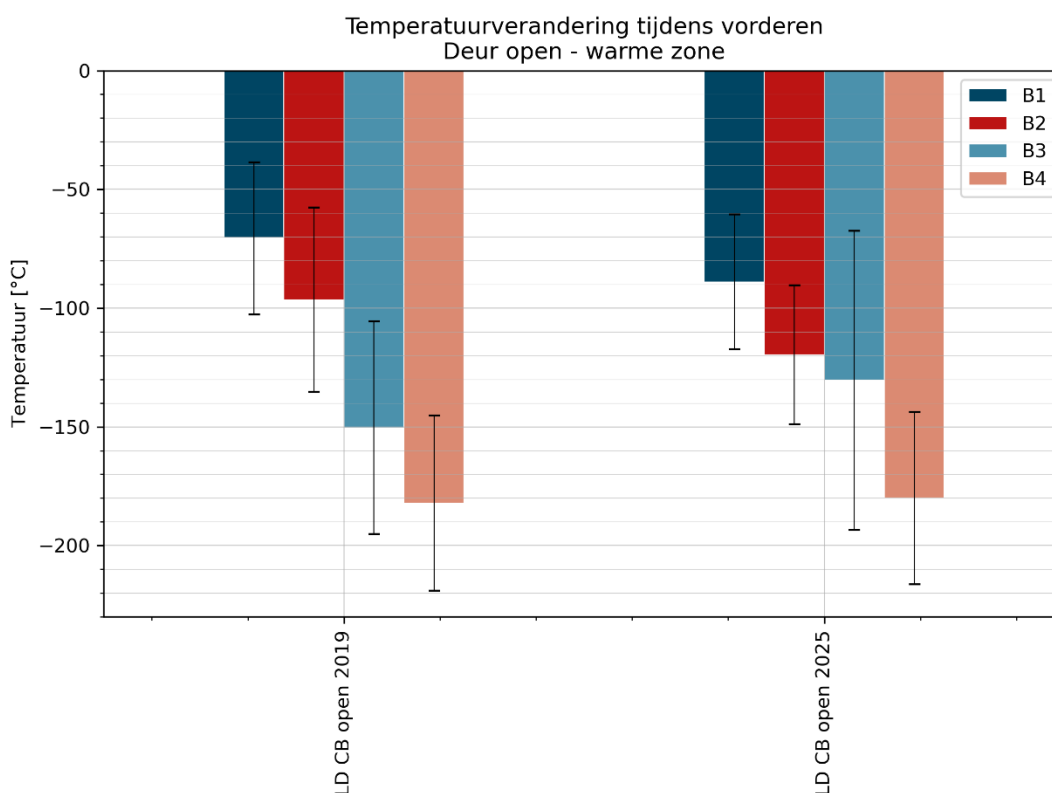
Tabel 2.1 Gemiddelde starttemperaturen op 2,20 m hoogte op verschillende locaties in de gang

Locatie	2025 experimenten [°C]	2019 experimenten [°C]
B1 (2 m)	215 ± 5	217 ± 13
B2 (7 m)	266 ± 10	265 ± 28
B3 (12 m)	314 ± 10	339 ± 16
B4 (17 m)	438 ± 22	478 ± 34

Herhaalttest

Hieronder is de temperatuurverandering over de hoogte in de warme zone weergegeven voor het gemiddelde van beide experimenten van de twee verschillende jaren. De temperatuurverandering die met de inzet wordt bereikt, is voor 2019 en 2025 redelijk vergelijkbaar. Het grootste verschil zit in de temperatuur boven in de gang (op 2,40 m, 2,20 m en 2,00 m) en dan met name achterin (B3/B4).

De temperatuurverandering per locatie tijdens het vorderen naar de vuurhaard is vergelijkbaar, zie hiervoor Figuur 2.1. Dit toont aan dat met de experimentopstelling reproduceerbare resultaten verkregen kunnen worden. Het volledige temperatuurverloop per locatie van alle experimenten staan in Bijlage 4.



Figuur 2.1 Temperatuurverandering tijdens vorderen per locatie met dezelfde methode tussen 2019 en 2025

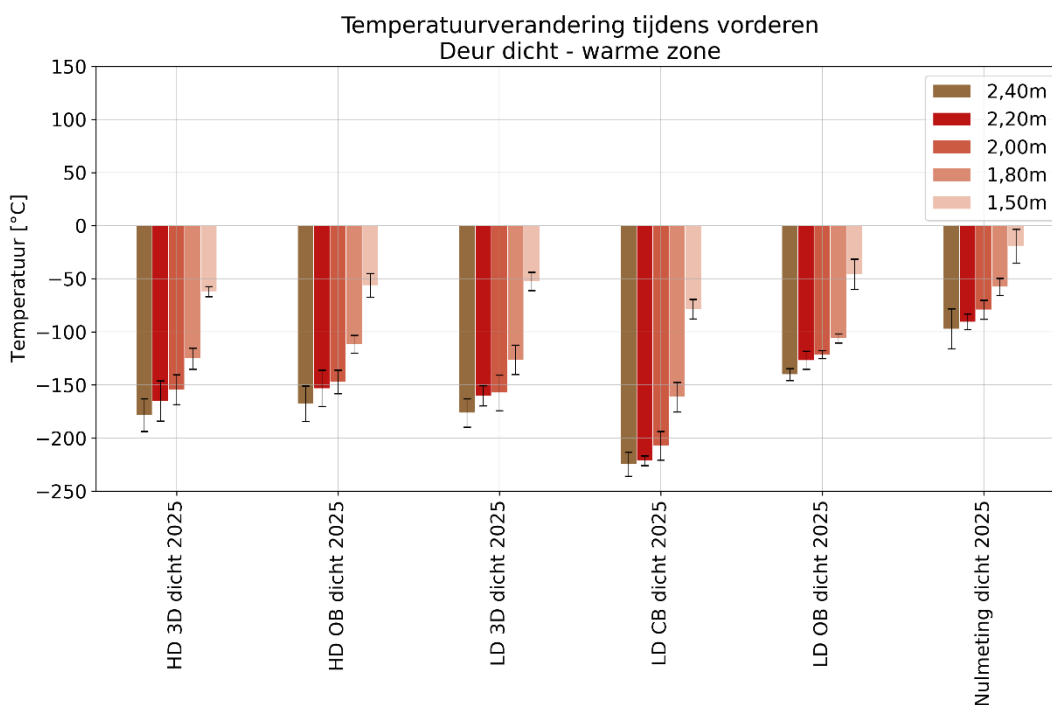
2.2 Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op temperatuur en energie

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. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de inzettijd en het waterverbruik.

2.2.1 Temperatuur

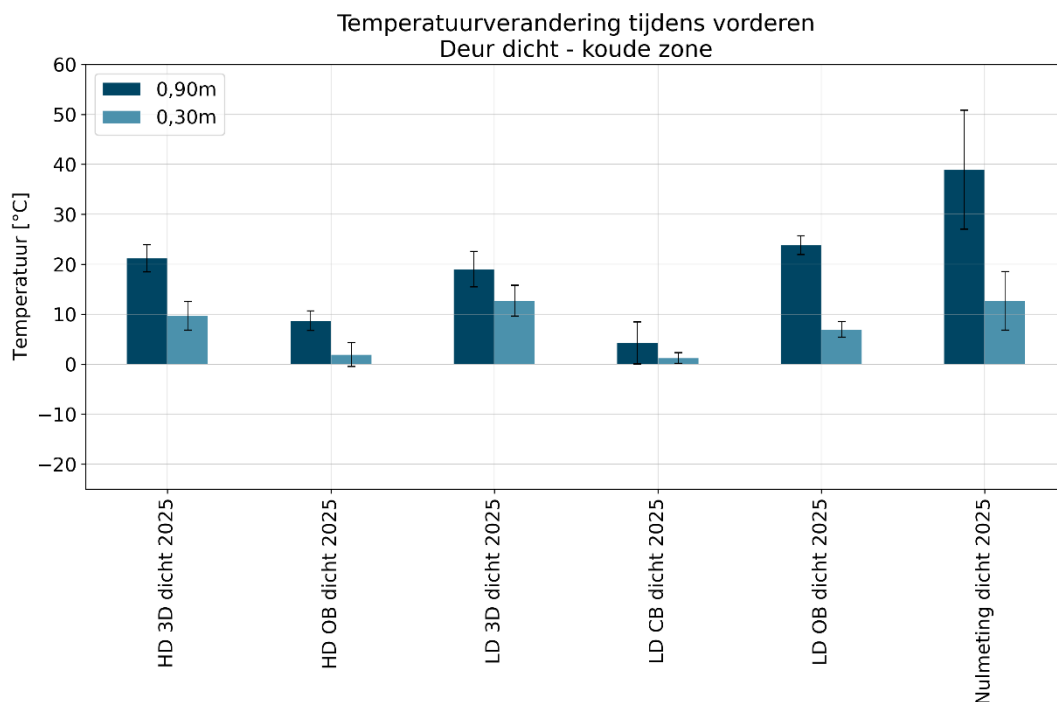
De resultaten van de temperatuurverandering in de warme zone zijn opgenomen in Figuur 2.2 en de resultaten van de koude zone in Figuur 2.3. In elke grafiek is per methode en per hoogte de temperatuurverandering te zien over de gehele inzet. Daarnaast is de spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis van de metingen van alle meetlocaties van de twee experimenten per methode. Ook zijn de nulmetingen in de grafiek opgenomen, waarbij de deur wel gesloten is, maar er geen inzet plaats heeft gevonden. In Bijlage 5 en 6 zijn de grafieken opgenomen van respectievelijk de nulmetingen en de experimenten.

In Figuur 2.2 is te zien dat alle inzetten inclusief de nulmeting resulteren in een temperatuurdaling in de warme zone. Hieruit blijkt dat de deur dichtdoen een positief effect heeft op de temperatuur. Bij de inzetten is de temperatuurdaling groter dan bij de nulmeting, wat betekent dat alle inzetten effect hebben gehad. De continue boogmethode met LD is het meest effectief. De daling in temperatuur is namelijk bij deze inzet voor de bovenste drie meetpunten het hoogst. De effecten op de temperatuur van de experimenten met de 3D-pulsmethode (LD en HD) en de onderbroken boogmethode met HD zijn vergelijkbaar met elkaar. De experimenten met de onderbroken boogmethode met LD laten de kleinste temperatuurdaling zien. De spreiding is relatief klein tijdens alle experimenten, wat aangeeft dat de invloed van de straalpijpvoerder op de effectiviteit van de inzet beperkt is.



Figuur 2.2 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de deur dicht – warme zone

De temperatuur neemt in de koude zone tijdens alle experimenten licht toe, zie Figuur 2.3. Tijdens de nulmeting neemt de temperatuur het meest toe. Bij de experimenten met de continue boogmethode met LD is de toename het kleinst. De temperatuurverandering van de experimenten met de 3D-pulsmethode met HD en LD is wederom vergelijkbaar. De onderbroken boogmethode met LD heeft de hoogste temperatuurstijging op 0,90 m tot gevolg, terwijl de experimenten met de 3D-pulsmethode met LD op 0,30 m de hoogste stijging laten zien.

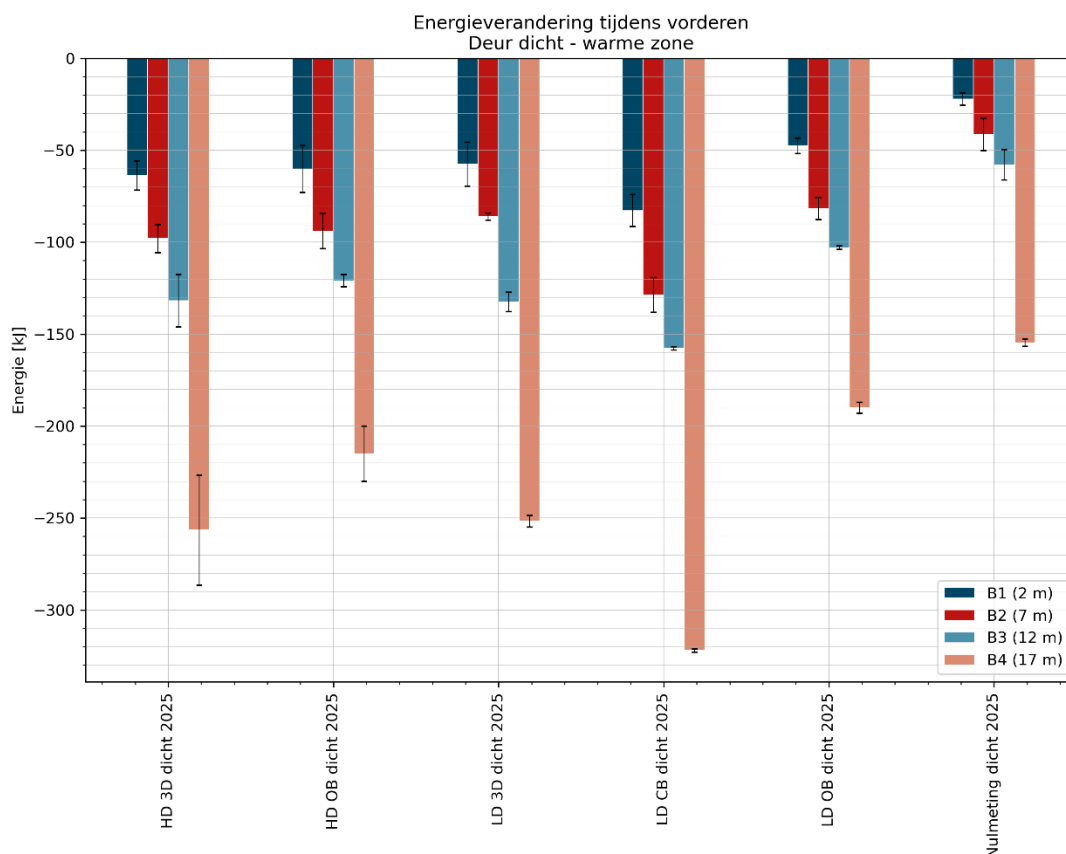


Figuur 2.3 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de deur dicht – koude zone

2.2.2 Energie-inhoud

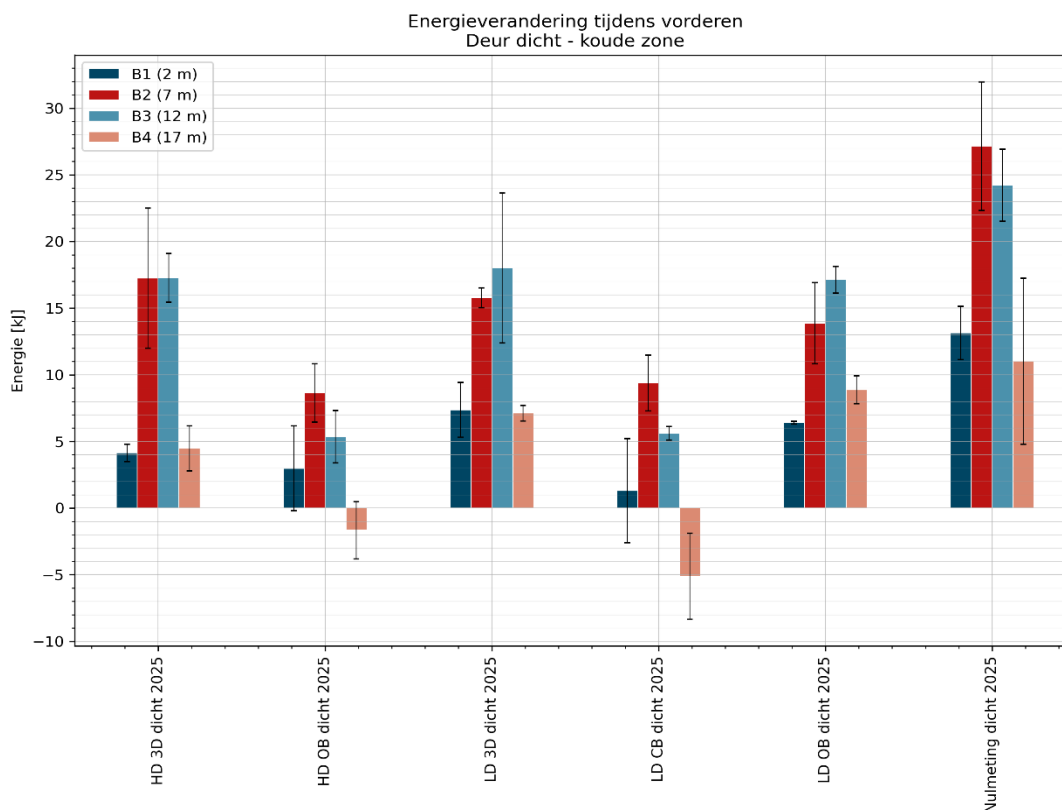
De energieverandering voor elk experiment is weergegeven in Figuur 2.4 voor de warme zone en in Figuur 2.5 voor de koude zone. Een negatieve energieverandering is een maat voor verkregen koeling in elk segment. In beide grafieken is een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis van de metingen van alle thermokoppels in een segment en van de twee experimenten per methode.

Bij alle experimenten is de energie in de warme zone afgenomen, ook bij de nulmeting (Figuur 2.4). De energieafnames zijn het grootst bij de vuurhaard (B4) en het kleinst bij de deur (B1). De energieverandering in de warme zone is tijdens de inzetten meer afgenomen dan tijdens de nulmeting. Dit betekent dat elke inzet effectiever is geweest dan het sluiten van de deur alleen. Het effectiefst is de continue boogmethode met LD, waar de energieafname bij iedere meetboom het hoogst is. De onderbroken boogmethode met LD is minder effectief dan de andere drie methoden die vergelijkbaar met elkaar zijn tot aan B4. Bij B4 leidt de onderbroken boogmethode met HD tot een kleinere energieafname dan de andere twee inzetten.



Figuur 2.4 Energieverandering tijdens vorderen met de deur dicht – warme zone

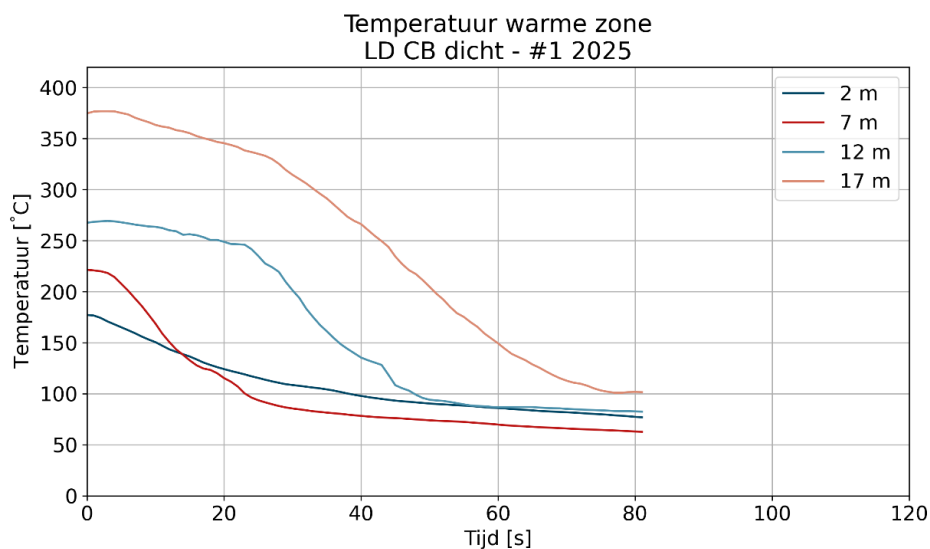
De energie in de koude zone tijdens het vorderen is op vrijwel alle locaties van alle experimenten gestegen, met de grootste stijging in het midden van de gang bij B2 en B3, zie Figuur 2.5. Bij B4 is de energie bij twee inzetten licht gedaald, namelijk bij de onderbroken boogmethode met HD en bij de continue boogmethode met LD. Bij de nulmeting is de energietoename het grootst.



Figuur 2.5 Energieverandering tijdens vorderen met de deur dicht – koude zone

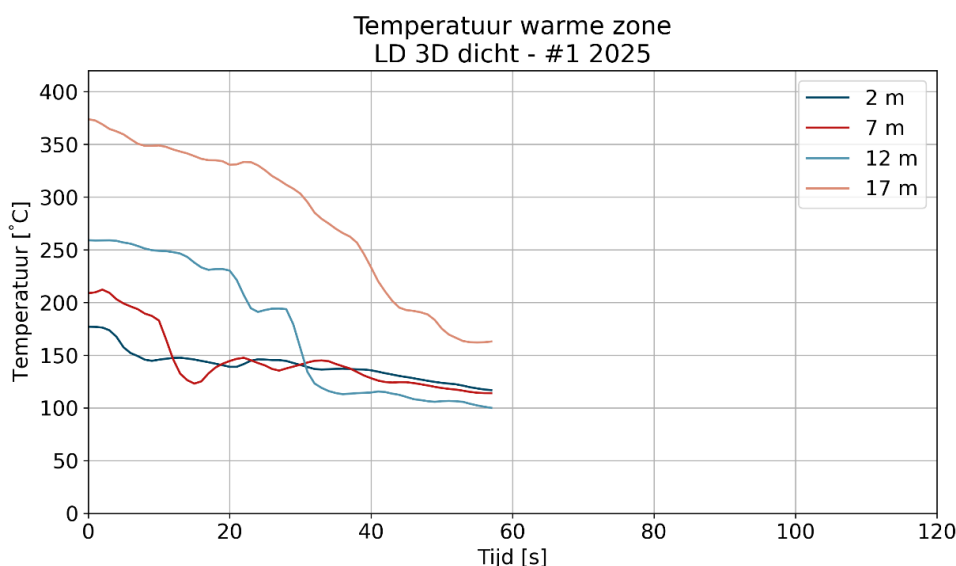
2.2.3 Voorwaartse en achterwaartse koeling

Net zoals in 2019, is per experiment gekeken hoe ver de rookgassen voor de inzetploeg uit worden gekoeld. Daarnaast is gekeken of de rookgassen achter de inzetploeg na de rookgaskoeling in temperatuur toe- of afnemen. De nadruk wordt hier gelegd op de reikwijdte, niet op de hoogte van de afname. Over het algemeen werd bij experimenten met de continue boogmethode een constante daling in temperatuur waargenomen, zoals bijvoorbeeld met LD in Figuur 2.6.



Figuur 2.6 Temperatuurverloop in de warme zone tijdens vorderen met LD continue boogmethode

Bij experimenten met de 3D-pulsmethode of onderbroken boogmethode werd vaak waargenomen dat de temperatuur na enige tijd weer licht toenam, maar ook daar was een dalende lijn te zien, zoals bijvoorbeeld met LD in zie Figuur 2.7. Het temperatuurverloop van alle experimenten is opgenomen in Bijlage 7.



Figuur 2.7 Temperatuurverloop in de warme zone tijdens vorderen met LD 3D-pulsmethode

Per methode is op basis van het temperatuurverloop tijdens de inzet een inschatting gemaakt van de reikwijdte van de voorwaartse en achterwaartse koeling. De afstanden zijn bepaald op basis van de meetlocaties en de momenten dat de ploeg een drempel bereikte, en zijn daarom slechts benaderingen. De voorwaartse koeling verschilt per methode, waarbij de continue boogmethode met LD de meeste voorwaartse koeling laat zien. Er is geen verschil gevonden in achterwaartse koeling; bij alle methodes is die > 17 m. In Bijlage 7 staat het temperatuurverloop per experiment.

2.2.4 Inzettijd en waterverbruik

Tijdens het onderzoek zijn de volgende blussystemen gebruikt:

- > Hogedruk 125 l/min (HD)
- > Lagedruk 250 l/min (LD).

Een overzicht van de blussystemen en hun eigenschappen is te vinden in Tabel 2.2. Hieruit blijkt dat de gemeten debietmetingen minimaal afwijken van de hierboven genoemde waarden. Voor de verdere analyse worden de gemeten debieten gebruikt.

Tabel 2.2 Onderzochte blussystemen

Blussysteem	Gemiddeld debiet, gemeten voorafgaand aan de experimenten	Pompdruk	Type straalpijp
HD	120 l/min	13,2 bar LD 33 bar HD	Akron Style 1711
LD 250	264 l/min	8,9 bar LD	TFT Ultimatic

De inzetijd en het waterverbruik per methode zijn weergegeven in Tabel 2.3. Het meeste water wordt verbruikt tijdens de continue boogmethode met LD (409 liter). Dit is ongeveer 8 keer zoveel als bij de 3D-pulsmethode met HD (54 liter).

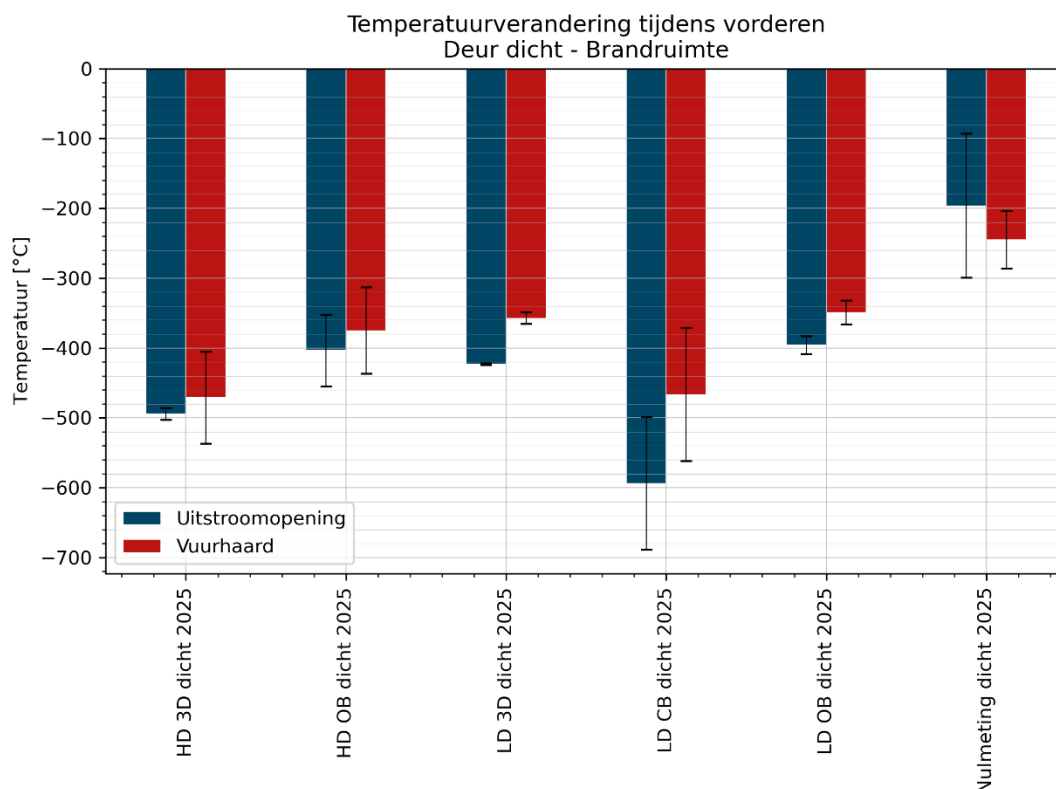
Tabel 2.3 Inzettijd tot het bereiken van de vuurhaard en het waterverbruik

Blusmethode	Inzettijd (s)	Waterverbruik (L)
HD 3D-pulsmethode	86	46
HD Onderbroken boogmethode	85	62
LD 3D-pulsmethode	67	99
LD Continue boogmethode	94	409
LD Onderbroken boogmethode	74	95

2.3 Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op de vuurhaard

Om de invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard te bepalen, zijn met behulp van de beeldanalyse de temperatuurverandering in de brandruimte, de rookverplaatsing en of er water als gevolg van de inzet water rechtstreeks op de vuurhaard kwam beoordeeld.

Figuur 2.8 toont de temperatuurverandering in de brandruimte tussen de start van de inzet en het bereiken van het einde van de gang. Voor de vuurhaard is het gemiddelde genomen van de vier thermokoppels die aan de wand hingen in de brandruimte. Tijdens alle experimenten blijkt er tijdens het vorderen sprake te zijn van een daling in temperatuur bij de vuurhaard en bij de uitstroomopening. De verschillen tussen de verschillende methoden zijn niet erg groot. De grootste temperatuurdaling is waargenomen bij de continue boogmethode met de LD. Bij alle experimenten is op de camerabeelden te zien dat de rook daalt wanneer de deur wordt dichtgedaan. Op de beelden is ook te zien dat er tijdens de inzet vaak rook en/of vocht naar de vuurhaard wordt gezogen. De verstikkende werking hiervan heeft mogelijk een extra effect op de daling van de temperatuur in de brandruimte. Enkele seconden nadat de deur wordt gesloten, is bij alle inzetten de vuurhaard niet meer zichtbaar op beeld. Bij de nulmeting duurt dit langer.



Figuur 2.8 Temperatuurverandering tijdens vorderen – Brandruimte

2.4 Invloed van rookgaskoeling met de deur dicht op de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers

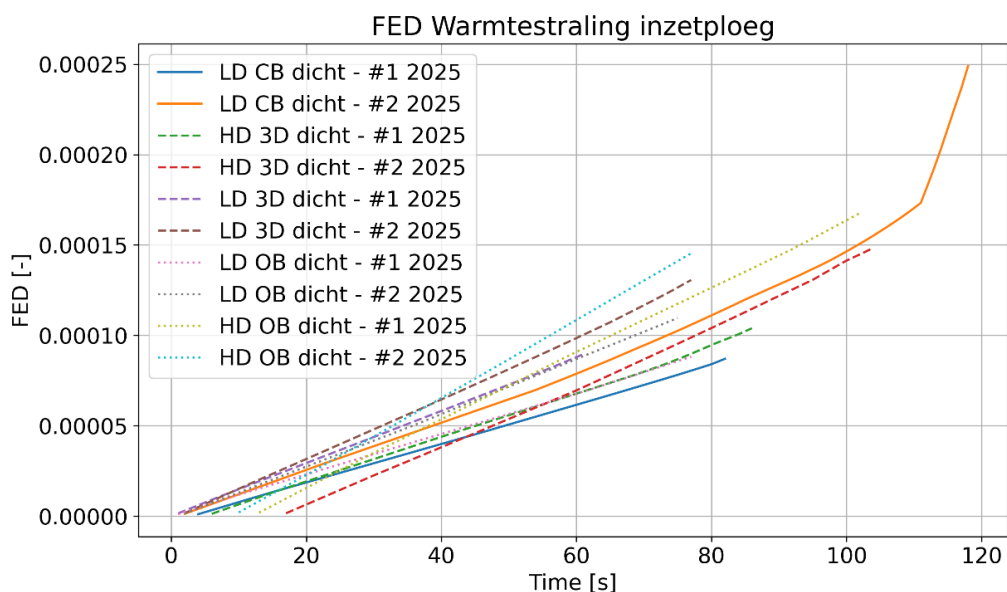
Deze paragraaf gaat in op de invloed van rookgaskoeling op de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers die zich in het gebouw bevinden. Naast temperatuur zijn ook straling en gasconcentraties gemeten om een beeld te krijgen van de omstandigheden in de gang.

2.4.1 De veiligheid van brandweermensen

Hieronder wordt ingegaan op de veiligheid van brandweermensen die zich in de gang bevinden. Hierbij zijn de temperatuur- en stralingsmetingen op 1,5 m hoogte gebruikt om een beeld te krijgen van de omstandigheden tijdens de experimenten. Daarnaast is de subjectieve beleving uitgevraagd bij de straalpijpvoerder en de nummer 2 voor en na een inzet.

Veiligheid op basis van de metingen

In Figuur 2.9 is de blootstelling aan warmtestraling (dosis) tijdens het vorderen te zien. De dosis neemt toe naarmate de ploeg in de gang vordert en langer wordt blootgesteld aan warmtestraling. Voor alle experimenten blijft het resultaat echter ver onder de gestelde grenswaarde van FED 1,0. Op basis hiervan kan gesteld worden dat de veiligheid wat betreft warmtestraling voor brandweermensen niet in het gedrang komt.



Figuur 2.9 FED-warmtestralingsdosis van de inzetploeg met de deur dicht

Subjectieve beleving van de inzetploeg

Voor de subjectieve beleving hebben de straalpijpvoerder en de nummer 2 voor en na elke inzet een korte vragenlijst ingevuld. In Tabel 2.4 zijn de resultaten weergegeven van de vragenlijsten die gesteld zijn na de experimenten. Er is een gemiddelde genomen van de antwoorden van de straalpijpvoerder en de nummer 2; dit is vervolgens naar boven afgerond. Gemiddeld genomen zijn de inzetten als warm ervaren, maar hebben zich geen oncomfortabele situaties voorgedaan. Daarnaast is er gemiddeld genomen geen pijn ervaren en zijn de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat de straalpijpvoerder en de nummer 2 reeds ervaring hadden met dergelijke omstandigheden.

Tabel 2.4 Subjectieve beleving van de inzetploeg na de experimenten met de deur dicht

Methode	Debiet	Thermische sensatie	Thermische comfort	Huid-vochtigheid	Pijn-sensatie	Ervaren inspanning
3D-pulsmethode	HD	Warm	Licht oncomfortabel	Vochtig	Geen pijn	Een beetje zwaar
3D-pulsmethode	LD 250	Warm	Licht oncomfortabel	Vochtig	Geen pijn	Tussen Licht en Een beetje zwaar
Continue boogmethode	LD 250	Warm	Neutraal	Nat	Geen pijn	Tussen Licht en Een beetje zwaar
Onderbroken boogmethode	HD	Warm	Licht oncomfortabel	Nat	Enigszins pijnlijk	Tussen Licht en Een beetje zwaar

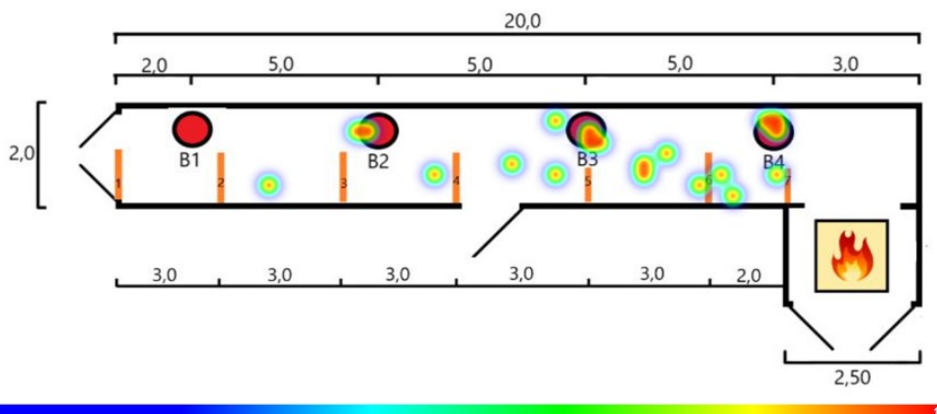
Onderbroken boogmethode	LD 250	Enigszins warm	Licht oncomfortabel	Tussen Vochtig en Nat	Geen pijn	Licht
----------------------------	--------	-------------------	------------------------	-----------------------------	-----------	-------

Hieronder is per onderwerp toegelicht welke verandering het brandweerpersoneel heeft ervaren ten opzichte van hun gevoel voor en na de experimenten.

Thermische sensatie

De warmtescore is door de inzet bij de straalpijpvoerder en bij de nummer 2 over het algemeen gestegen, bij de straalpijpvoerder gemiddeld over alle experimenten meer dan bij de nummer 2. De twee hoogste categorieën, zeer heet en ondraaglijk heet, zijn niet ervaren door de inzetploeg.

De meeste warmte is ervaren tussen de veiligheidsdeur en de vuurhaard, zie Figuur 2.10. Daarnaast ervoeren de straalpijpvoerder en de nummer 2 de meeste warmte vooral tijdens het vorderen, wanneer de straalpijp gesloten was. Tijdens het eerste experiment met de 3D-pulsmethode met LD werd er geen temperatuurverhoging gevoeld tijdens de inzet. Bovendien werd in de opmerkingen aangegeven dat de temperatuur mee viel. De persoon die aan experimenten met HD en LD heeft meegedaan, gaf aan dat de temperatuur met de HD-experimenten waarneembaar hoger was.



Figuur 2.10 De locatie waar de meeste warmte werd ervaren tijdens de experimenten met de deur dicht

Thermisch comfort

Er is een minimale verandering in het comfort waargenomen tijdens de uitvoering van de experimenten. Tijdens één experiment is het comfort voor de straalpijpvoerder gelijk gebleven. Bij acht andere experimenten is dit gedaald van 'Neutraal' naar 'Licht oncomfortabel' en bij één experiment van 'Licht oncomfortabel' naar 'Oncomfortabel'. Bij de nummer 2 is het comfort in één geval gestegen van 'Licht oncomfortabel' naar 'Neutraal', drie keer gelijk gebleven op 'Neutraal' en zes keer gedaald van 'Neutraal' naar 'Licht oncomfortabel'. Daarnaast werd aangegeven dat er discomfort werd ervaren door het laag voortbewegen, de toename van de temperatuur door de straling en stroming en het ontbreken van zicht. Ook was er eenmaal sprake van discomfort, omdat het slangmanagement niet op orde was.

Huidvochtigheid

De huidvochtigheid is meestal toegenomen tijdens de experimenten. Bij één persoon is de huidvochtigheid tijdens de experimenten met de deur dicht gelijk gebleven.

Pijnsensatie

Eén persoon heeft aangegeven pijn te hebben ervaren tijdens het uitvoeren van de experimenten met de onderbroken boogmethode met HD, zowel als straalpijpvoerder als nummer 2. De mate van pijn werd weergegeven als 'enigszins pijnlijk'. Tijdens alle andere experimenten is er door het brandweerpersoneel geen pijn ervaren.

Ervaren inspanning

De inspanning is bij twee personen tijdens een experiment niet gestegen. Dit was eenmaal de nummer 2 en eenmaal de straalpijpvoerder. Bij de andere experimenten met de deur dicht is de inspanning toegenomen. Als straalpijpvoerder werd er meer inspanning ervaren dan als nummer 2. De hoogste inspanning die is ervaren door de straalpijpvoerder en de nummer 2 is 'Een beetje zwaar'.

2.4.2 De veiligheid van slachtoffers

Naast de temperatuur en warmtestraling zijn de gasconcentraties van zuurstof (O_2), koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO_2) en stikstofoxiden (NO_x) gemeten om de veiligheid van slachtoffers in kaart te kunnen brengen.

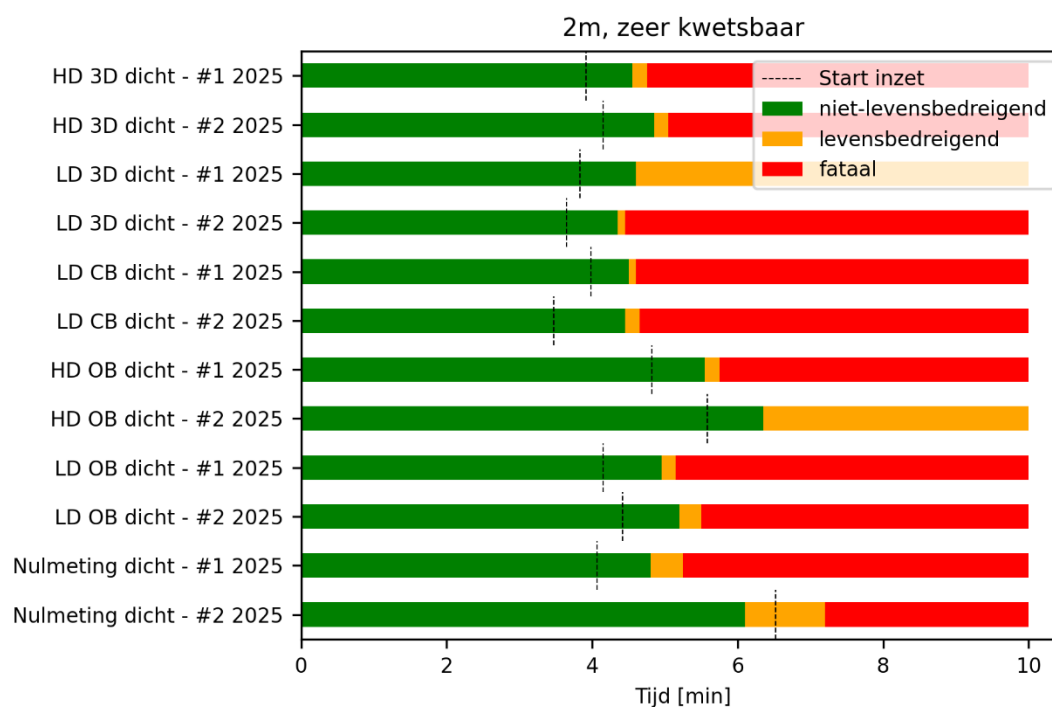
Uit berekeningen blijkt dat voor alle experimenten geldt dat waar er een grenswaarde overschreden wordt, dit de grenswaarde van FED_{IN} betreft. Dit betekent dat het de verstikkende gassen zijn die zorgen voor levensbedreigende condities. Uit de metingen blijkt dat van de gassen die zijn gemeten, dit in alle gevallen de CO betreft. Grafieken van alle berekeningen voor de verschillende experimenten en posities in de gang zijn opgenomen in Bijlage 9.

Alle grafieken van de overlevingscondities per populatiegroep (zeer kwetsbaar, kwetsbaar en algemeen) zijn eveneens terug te vinden in Bijlage 9. Twee typerende grafieken (zie Figuur 2.11 en Figuur 2.12) worden in deze paragraaf besproken, namelijk een van de zeer kwetsbare groep dicht bij ingang (2 meter) en een van de groep algemeen op 12 meter vanaf de ingang. Deze keuze is gemaakt, omdat voor de zeer kwetsbare groep de positie dicht bij de ingang de meest gunstige is en voor de groep algemeen de positie op 12 meter van de ingang de minst gunstige is. De grafieken beginnen bij het ontsteken van de vuurhaard en zijn begrensd op 10 minuten. Alleen de nulmetingen hebben daadwerkelijk tot deze tijd doorgelopen. De tijd tussen het ontstaan van de brand en de inzet is bij deze experimenten gemiddeld iets meer dan 4 minuten. Deze tijd is natuurlijk van belang voor eventuele slachtoffers. Daarom wordt hier een relatieve vergelijking gemaakt tussen de experimenten en de nulmeting.

Er zitten soms grote verschillen tussen test 1 en test 2, wat duidt op een invloed van de straalpijpvoerder, weersomstandigheden of andere externe factoren. Hierdoor kunnen lokaal verschillen ontstaan in concentraties van (met name) CO die de overleefbaarheid beïnvloeden.

Zeer kwetsbare groep

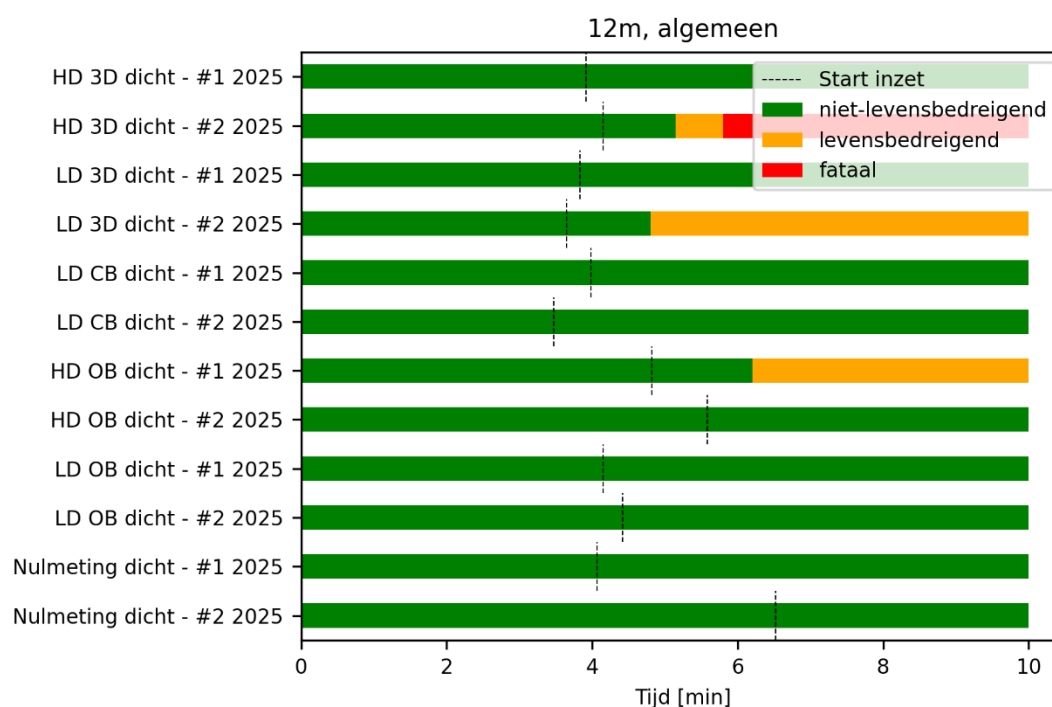
Voor de zeer kwetsbare groep verslechteren de overlevingscondities op 2 m in de gang bij elke inzet en de nulmetingen. Op den duur ontstaat bij elk experiment een fatale situatie, behalve bij één experiment met de 3D-pulsmethode met LD en één experiment met de onderbroken boogmethode met HD. Daar verslechteren de overlevingscondities van niet-levensbedreigend naar levensbedreigend.



Figuur 2.11 Tijden van overlevingsmogelijkheden van de zeer kwetsbare groep op 2 meter in de gang

Algemene groep

Zowel bij de nulmetingen als bij zeven experimenten blijft de situatie voor slachtoffers op 12 m in de gang overleefbaar. Alleen bij één experiment met de 3D-pulsmethode HD wordt de fatale grenswaarde overschreden. Bij twee experimenten wordt de grenswaarde voor levensbedreigend bereikt.



Figuur 2.12 Tijden van overlevingsmogelijkheden van de algemene groep op 12 meter in de gang

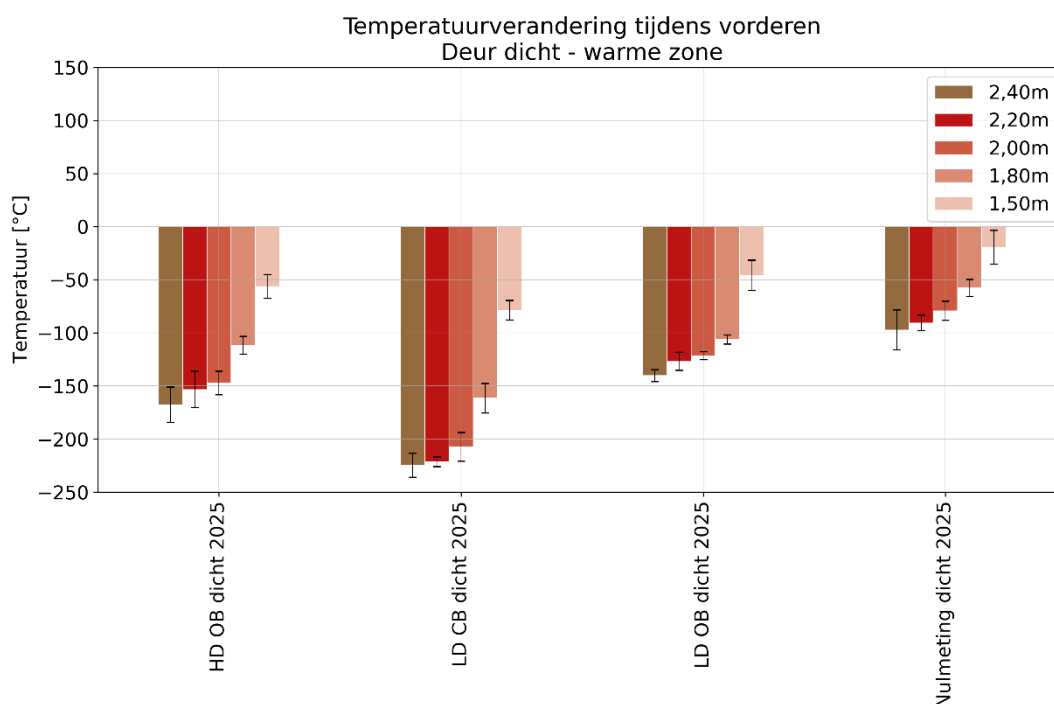
2.5 Rookgaskoeling met de continue en onderbroken boogmethode

In deze paragraaf staat beschreven wat het effect is van de rookgaskoeling met de onderbroken boogmethode ten opzichte van de continue boogmethode bij zowel een open als gesloten deur. Hierbij wordt gekeken naar 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. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard en de inzettijd en waterverbruik.

2.5.1 Temperatuur

De resultaten van de temperatuurmetingen bij de experimenten met de continue en onderbroken boogmethode zijn voor de warme zone opgenomen in Figuur 2.13 en Figuur 2.14. De resultaten voor de koude zone zijn opgenomen in Figuur 2.15 en Figuur 2.16. Metingen met deur open en deur dicht zijn per zone apart gepresenteerd met de corresponderende nulmetingen. De figuren laten dus absolute koeling zien in vergelijking met nulmeting. In iedere figuur is de spreidingsmaat weergegeven. In Bijlage 5 en 6 zijn de grafieken opgenomen per nulmeting en methode.

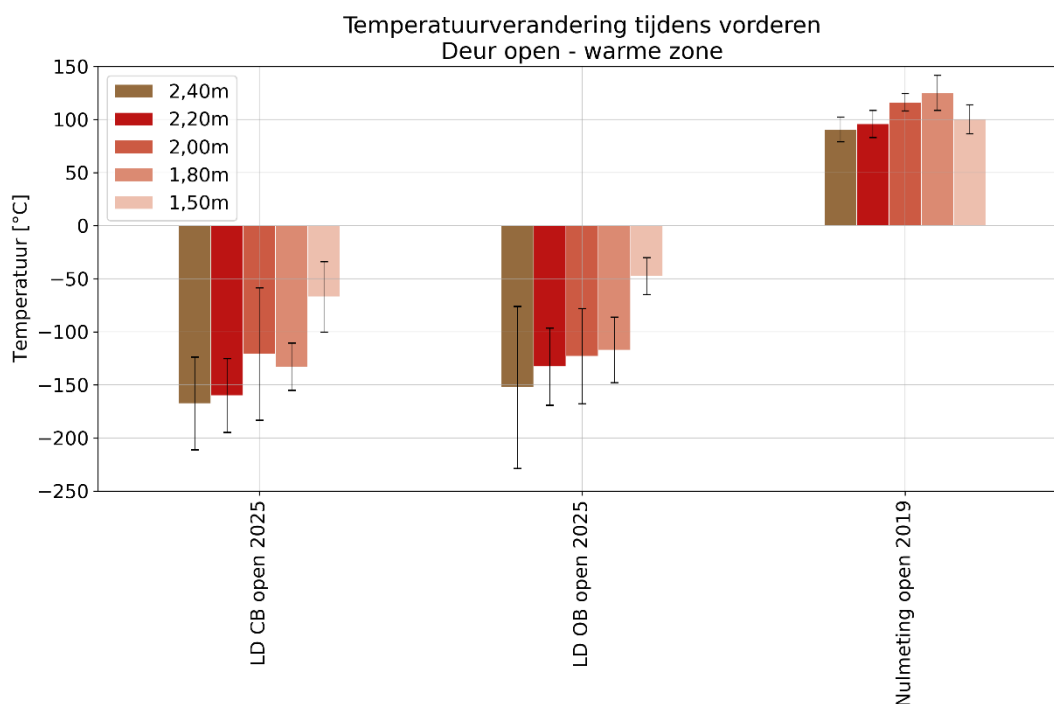
In Figuur 2.13 zijn de resultaten van de temperatuurverandering tijdens het vorderen met de deur dicht in de warme zone weergegeven. Hierbij is te zien dat enkel de deur dichtdoen tijdens de nulmeting al een daling van de temperatuur laat zien. Alle inzetmethodes zijn effectiever dan de nulmeting. De onderlinge verschillen tussen de methoden zijn klein, maar de inzet met continue boogmethode met LD laat de meeste koeling zien.



Figuur 2.13 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur dicht – Warme zone

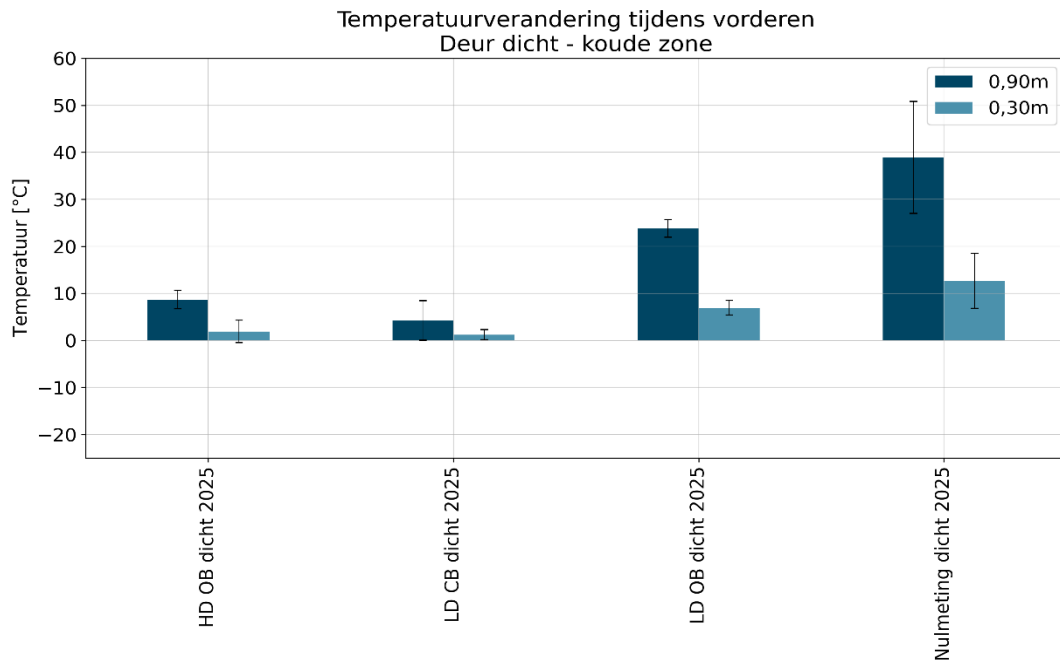
In Figuur 2.14 zijn de resultaten van de warme zone met de deur open weergegeven. Tijdens de nulmeting loopt de temperatuur op. Dit is in vergelijking met de deur dicht een verschil, want tijdens de nulmeting met de deur dicht daalde de temperatuur. De veranderingen in temperatuur bij beide methodes met de deur open zijn vergelijkbaar met elkaar en hebben een positiever effect dan enkel de nulmeting.

De spreiding tussen de experimenten met de deur dicht is kleiner dan bij de experimenten met de deur open.



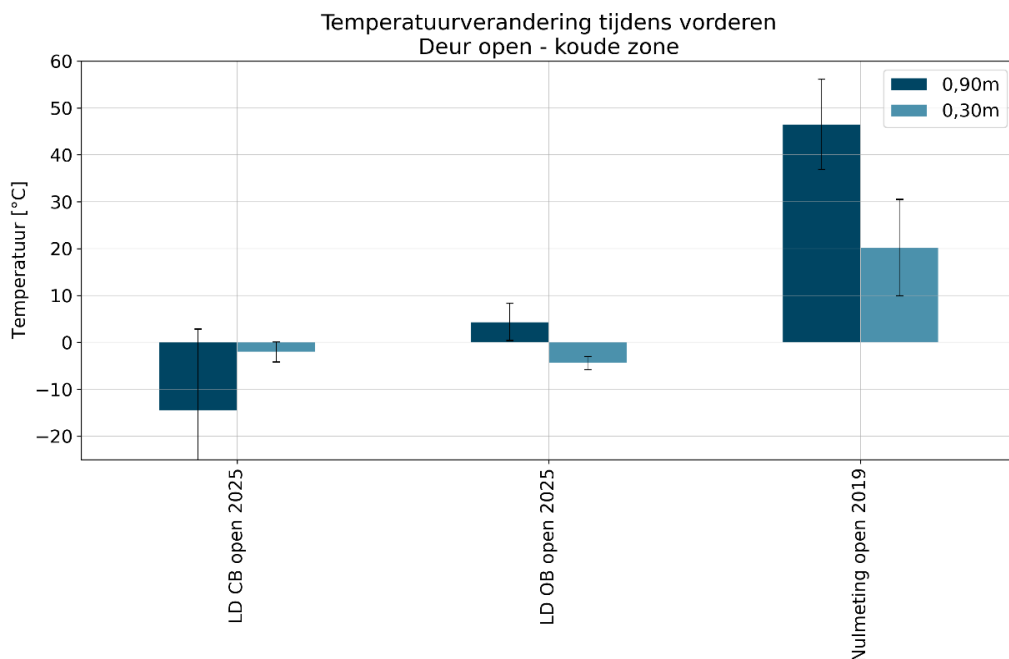
Figuur 2.14 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur open – Warme zone

In Figuur 2.15 zijn de resultaten van koude zone tijdens het vorderen met de deur dicht weergegeven. Hieruit blijkt dat de temperatuur in alle gevallen toeneemt, het meest tijdens de nulmeting. In alle gevallen is de toename echter klein.



Figuur 2.15 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur dicht – Koude zone

In Figuur 2.16 zijn de resultaten van de koude zone met de deur open weergegeven. Bij de nulmeting stijgt de temperatuur op beide hoogtes. Bij de inzet met de onderbroken boogmethode met LD is er enkel bij de temperatuur op 0,90 m een lichte stijging. De temperatuur op 0,30 m daalt, maar slechts minimaal. Bij de continue boogmethode met LD is er een daling te zien op beide hoogtes; op 0,30 m is deze minimaal. Van alle inzetmethodes is dit de enige methode waarbij de temperatuur daalt in plaats van stijgt. Wel blijkt uit de resultaten dat een inzet altijd effectiever is dan geen inzet. De temperatuur stijgt namelijk het meest bij de nulmeting.

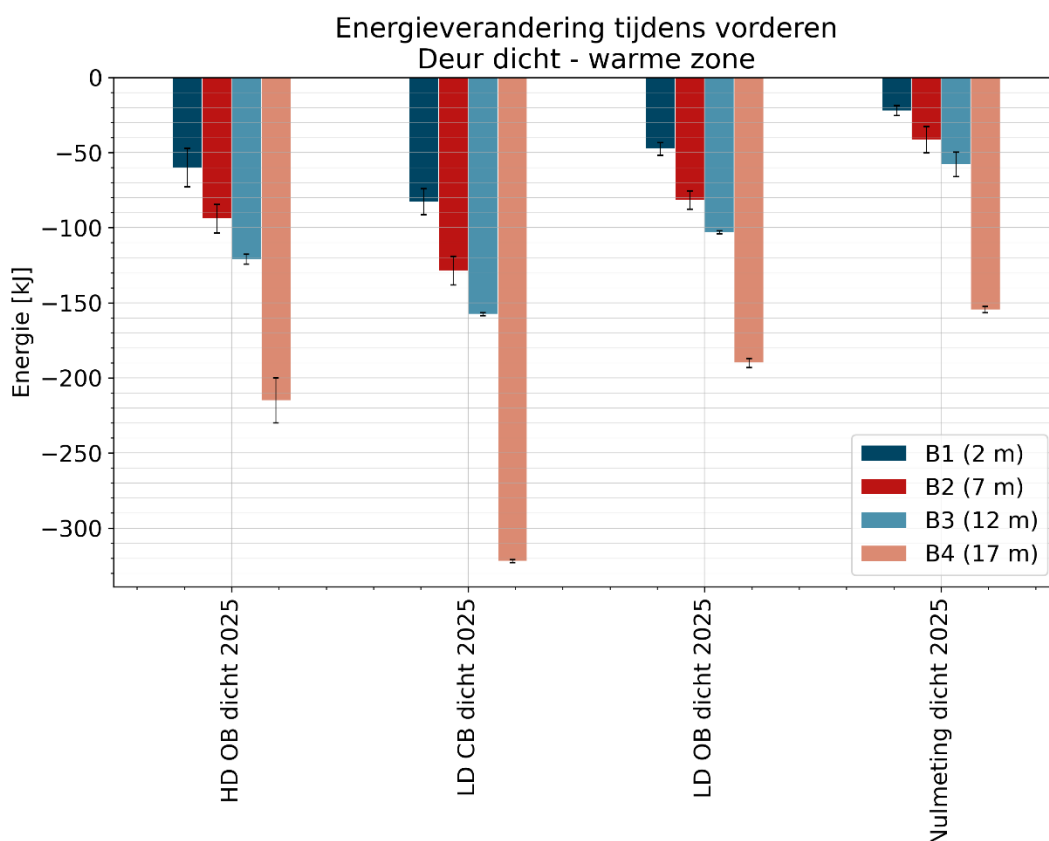


Figuur 2.16 Temperatuurverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur open – Koude zone

2.5.2 Energie-inhoud

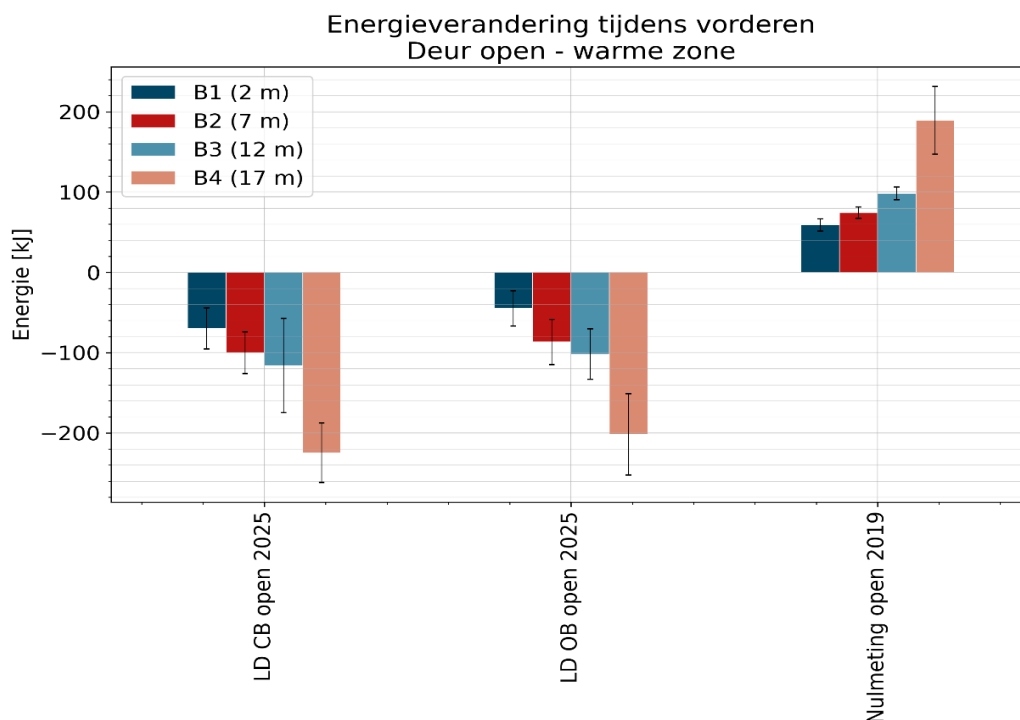
De energieveranderingen tijdens de experimenten met de continue en onderbroken boogmethode zijn weergegeven in Figuur 2.17 en Figuur 2.18 voor de warme zone en in Figuur 2.19 en Figuur 2.20 voor de koude zone. De lengte van de staven geeft de energieafname en dus de effectiviteit weer. De resultaten voor de deur open en deur dicht zijn in aparte figuren gepresenteerd. Daarbij is in alle figuren een spreidingsmaat weergegeven. Dit betreft de standaarddeviatie op basis van de metingen van alle thermokoppels in een segment, en van de twee experimenten per methode.

Bij alle experimenten met de continue en onderbroken boogmethode met de deur dicht is de energie in de warme zone afgenomen (Figuur 2.17). Hoe verder in de gang, hoe groter de energieafname is. Bij B4 zijn de energieafnames daardoor het grootst. De inzet met de continue boogmethode met LD en de deur dicht is het effectiefst.



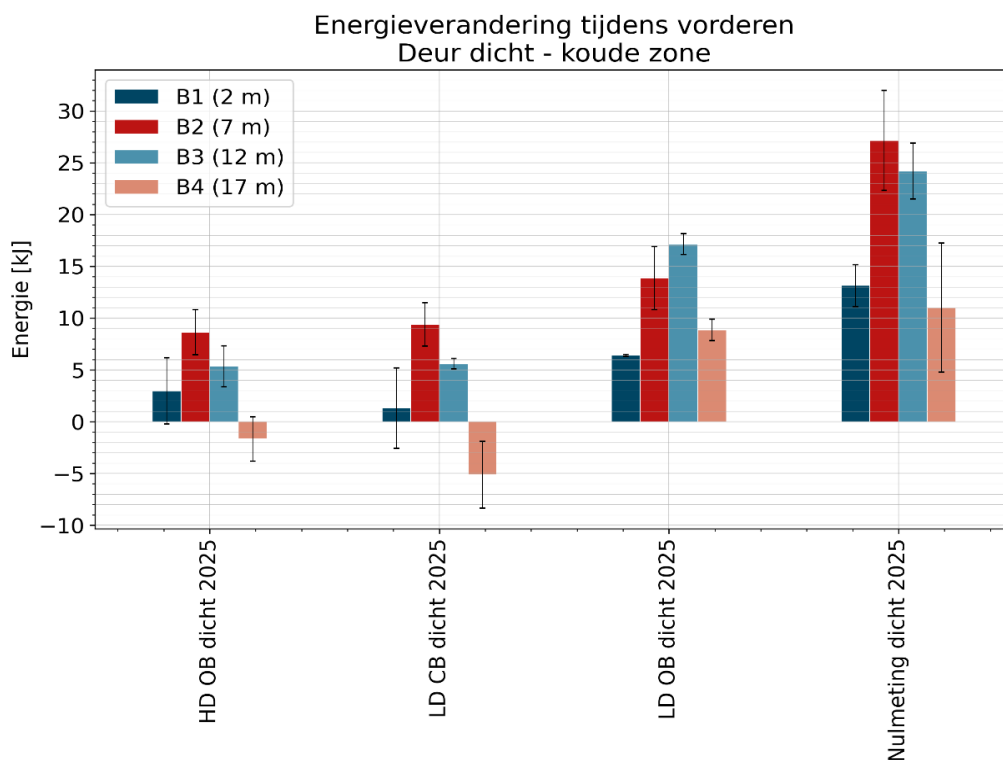
Figuur 2.17 Energieverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur dicht – Warme zone

Bij de experimenten met de continue en onderbroken boogmethode met de deur open (Figuur 2.18) is de energie eveneens afgenomen. Bij de nulmeting met de deur open is de energie toegenomen. Dit is een verschil met de nulmeting met de deur dicht: de energie neemt af, terwijl er geen inzet is gedaan. Bij de continue boogmethode daalt de energie net iets meer dan bij de onderbroken boogmethode. De spreiding is groter bij de experimenten met de deur open dan met de deur dicht, wat duidt op meer variatie tussen beide experimenten met de deur open.



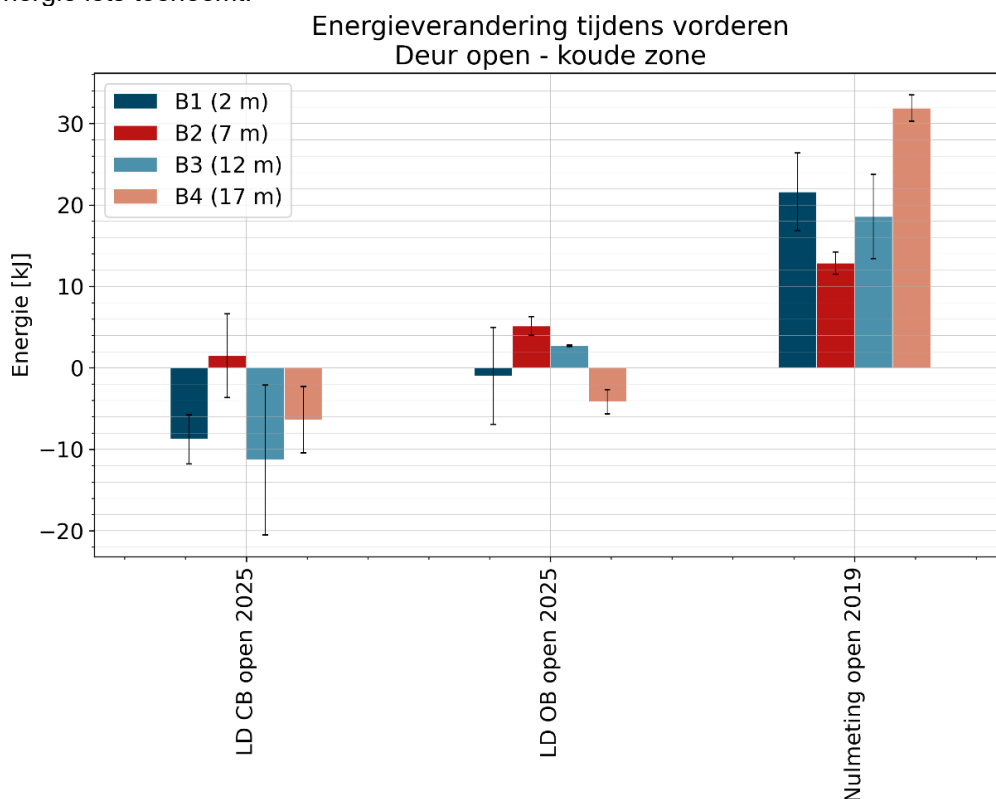
Figuur 2.18 Energieverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur open – Warme zone

De energieverandering in de koude zone tijdens het vorderen met de deur dicht is te zien in Figuur 2.19. Bij vrijwel alle experimenten neemt de energie in de koude zone toe, met name in het midden van de gang (B2/B3). Bij de nulmeting is de stijging in energie overal in de gang het grootst, dus elke inzet is beter dan niets doen.



Figuur 2.19 Energieverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur dicht – Koude zone

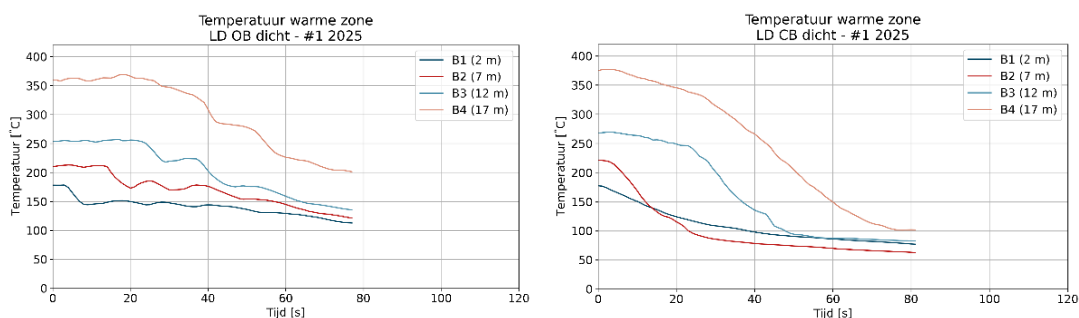
De energie is bij de nulmeting met de deur open in bij alle meetbomen gestegen, zie Figuur 2.20. De continue boogmethode met LD is het effectiefst; deze laat overall (behalve bij B2) een energie-afname zien. Bij de inzet met onderbroken boogmethode met LD is een energie-afname te zien bij B1 en B4, terwijl bij B2 en B3 (in het midden van de gang) de energie iets toeneemt.



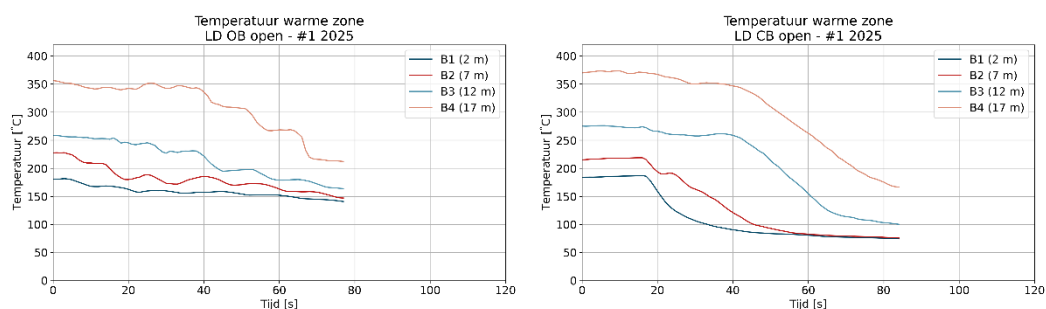
Figuur 2.20 Energieverandering tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode met de deur open – Koude zone

2.5.3 Voorwaartse en achterwaartse koeling

Door de onderbroken boogmethode toe te passen, daalt de temperatuur lokaal. Na het geven van de puls neemt de temperatuur weer (licht) toe, maar over het algemeen neemt de temperatuur af, zowel met de deur dicht (Figuur 2.21) als met de deur open (Figuur 2.22).



Figuur 2.21 Temperatuurverloop in de warme zone met de LD onderbroken boogmethode (links) en de LD continue boogmethode (rechts) met de deur dicht



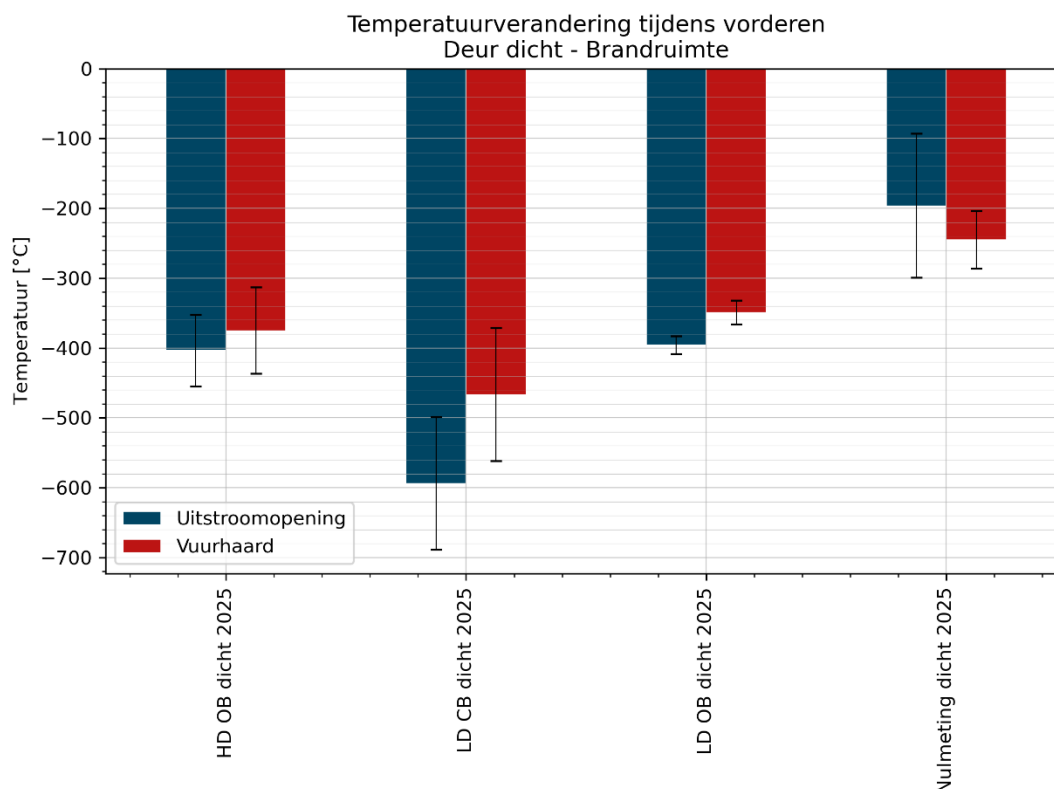
Figuur 2.22 Temperatuurverloop in de warme zone met de LD onderbroken boogmethode (links) en de LD continue boogmethode (rechts) met de deur open

Het verloop is voor alle experimenten vergelijkbaar, wat resulteert in vergelijkbare resultaten voor de voorwaartse en achterwaartse koeling. Zowel bij de continue en onderbroken boogmethode met de deur open als met de deur dicht, is de achterwaartse koeling > 17 m. Dit betekent dat nergens achter de inzetploeg de temperatuur toeneemt. De voorwaartse koeling verschilt wel per inzetmethode. De inzetten met onderbroken boogmethode HD en LD met de deur dicht en de inzet met de continue boogmethode LD met de deur open hebben een vergelijkbare voorwaartse koeling van 9 m. De reikwijdte van de voorwaartse koeling van de onderbroken boogmethode LD met de deur open is 12 m. De continue boogmethode met LD met de deur dicht laat de meeste voorwaartse koeling zien, namelijk 17 m.

2.5.4 Invloed rookgaskoeling op vuurhaard

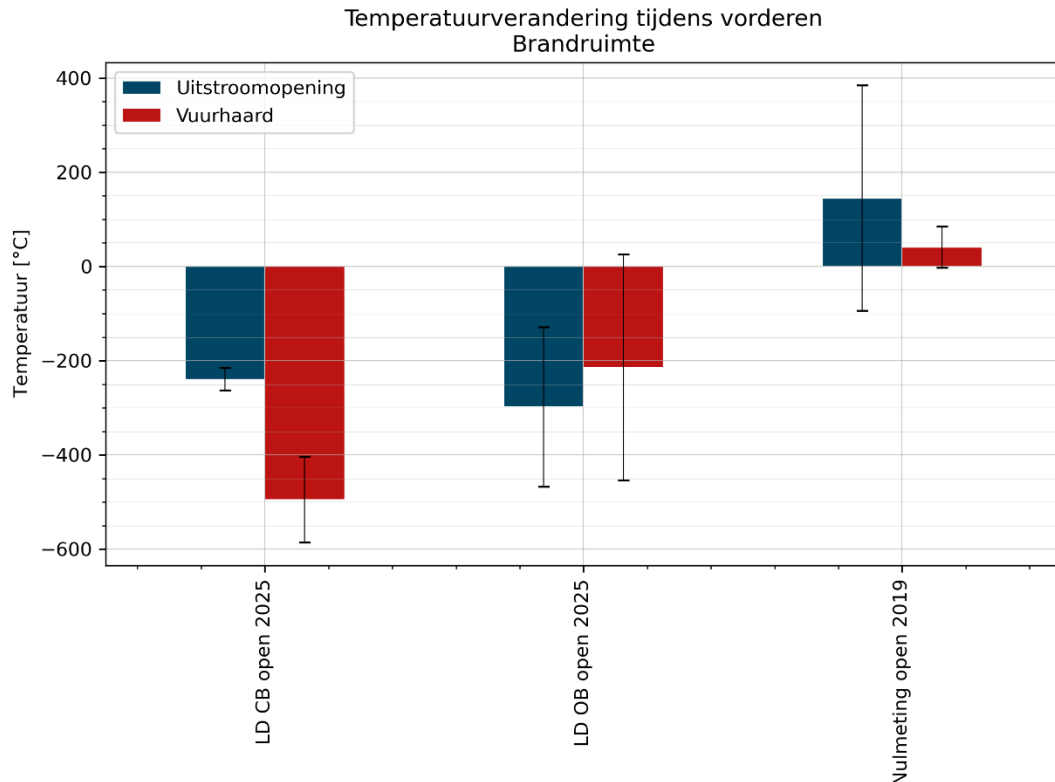
Om de invloed van rookgaskoeling op de vuurhaard te bepalen, is gekeken naar de temperatuurverandering in de brandruimte en de rookverplaatsing. Daarnaast is aan de hand van de camerabeelden stroming richting de vuurhaard geanalyseerd.

De temperatuurverandering in de brandruimte tussen de start van de inzet en het bereiken van het einde van de gang met de deur dicht is weergegeven in Figuur 2.23 en met de deur open in Figuur 2.24. Voor de vuurhaard is het gemiddelde genomen van de vier thermokoppels die aan de wand hingen in de brandruimte. Het effect van de onderbroken boogmethode op de temperatuur in de brandruimte is voor HD en LD met de deur dicht vrijwel hetzelfde. Het effect van de continue boogmethode is daarentegen groter, aangezien de temperatuur verder daalt, zie Figuur 2.23. Alle technieken hebben een beduidend beter effect dan de nulmeting. Op camerabeelden van deze experimenten met de deur dicht is te zien dat de rooklaag daalt en dat de rook en/of het vocht zich naar de vuurhaard verplaatst.



Figuur 2.23 Temperatuurverandering in de brandruimte tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode en de deur dicht

Tijdens de experimenten met de continue en onderbroken boogmethode met LD en de deur open dalen de temperaturen, zie Figuur 2.24. Bij de nulmeting met de deur open stijgt de temperatuur in de brandruimte. De temperatuur bij de vuurhaard is bij de continue boogmethode meer gedaald dan bij de uitstroomopening; bij de onderbroken boogmethode is dit precies andersom. De spreiding van beide experimenten is hier wel groter dan met de deur dicht, wat duidt op grotere verschillen in de uitvoering van de experimenten. Bij de deur open blijft de rooklaag niet stabiel. Dit is het tegenovergestelde van de situatie met de deur dicht, waar de rooklaag wel stabiel blijft. Wel is hetzelfde effect te zien bij de deur open en deur dicht met betrekking tot de rook die en/of het vocht dat naar de vuurhaard toe beweegt en de rook die via de bovenkant wegstroomt.



Figuur 2.24 Temperatuurverandering in de brandruimte tijdens vorderen met de continue en onderbroken boogmethode en de deur open

2.5.5 Inzettijd en waterverbruik

De inzettijd en het waterverbruik voor de onderbroken boogmethode zijn weergegeven in Tabel 2.5. Uit deze resultaten blijkt dat er tijdens een inzet met HD zoals verwacht minder water wordt verbruikt dan bij de inzetten met LD. Bij de experimenten met LD met de deur open is meer water verbruikt dan bij de experimenten met de deur dicht. Ook is de inzettijd met de deur open langer dan met de deur dicht.

Tabel 2.5 Inzettijd tot het bereiken van de vuurhaard en het waterverbruik

Blusmethode	Stand deur	Inzettijd (s)	Waterverbruik (L)
HD Onderbroken boogmethode	Dicht	85	73
LD Onderbroken boogmethode	Dicht	74	110
LD Onderbroken boogmethode	Open	91	158
LD Continue boogmethode	Dicht	94	409
LD Continue boogmethode	Open	84	370

3 Conclusie

3.1 Beantwoording van de deelvragen

3.1.1 In hoeverre komen de condities van de experimenten in 2025 overeen met de condities van de experimenten in 2019?

De gemiddelde starttemperaturen van de experimenten in 2019 en 2025 zijn goed vergelijkbaar, waarmee gesteld kan worden dat er vergelijkbare condities gecreëerd zijn. Als de experimenten met LD 250 met de continue boogmethode en deur open uit 2025 vergeleken wordt met de overeenkomstige experimenten die zijn uitgevoerd in 2019, kan geconcludeerd worden dat de resultaten goed overeenkomen. Hierom is het mogelijk de resultaten van de experimenten uit 2019 en 2025 met elkaar te vergelijken.

3.1.2 In welke mate is het bij gebruik van de continue boogmethode, onderbroken boogmethode en 3D-pulsmethode mogelijk om rookgassen te koelen bij het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht), in termen van:

- a. temperatuurverandering
- b. energieverandering
- c. voorwaartse en achterwaartse koeling?

Temperatuur en energie

Alle methoden, inclusief het sluiten van de deur (de nulmeting), resulteren in een temperatuurdaling in de warme zone. Hieruit blijkt dat alleen al de deur dicht doen een positief effect heeft op de temperatuur. Bij de verschillende methoden is de temperatuurdaling groter dan bij de nulmeting, wat betekent dat alle methoden effect hebben gehad. De continue boogmethode met LD koelt het meest. De experimenten met de 3D-pulsmethode (LD en HD) en de onderbroken boogmethode met HD zijn vergelijkbaar met elkaar. De experimenten met de onderbroken boogmethode met LD hebben de kleinste temperatuurdaling tot gevolg. Als wordt gekeken naar de koude zone, is te zien dat bij alle methoden inclusief het sluiten van de deur (de nulmeting) de temperatuur licht toeneemt.

De spreiding is relatief klein tijdens alle experimenten, wat aangeeft de invloed van de straalpijpvoeder op de effectiviteit van de inzet verwaarloosbaar is. Een vergelijkbare conclusie kan getrokken worden als gekeken wordt naar de energieverandering.

Voorwaartse en achterwaartse koeling

Wanneer gekeken wordt naar de voorwaartse en achterwaartse koeling door de inzetploeg, blijkt dat de continue boogmethode een voortdurende temperatuurdaling te zien geeft. Bij experimenten met de 3D-pulsmethode of onderbroken boogmethode is vaak waargenomen dat de temperatuur na enige tijd weer licht toenam. Over het algemeen bleef echter ook daar de temperatuur dalen tijdens de inzet.

3.1.3 In welke mate is het bij gebruik van de continue boogmethode, onderbroken boogmethode en 3D-pulsmethode mogelijk om tijdens het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht) de vuurhaard te beïnvloeden?

Uit alle experimenten blijkt dat er een daling is in temperatuur bij de vuurhaard en bij de uitstroomopening tijdens het vorderen. De verschillen tussen de verschillende methoden zijn niet erg groot. De grootste temperatuurdaling is waargenomen bij de continue boogmethode met de LD. Bij alle experimenten is op camerabeelden te zien dat de rook daalt wanneer de deur wordt gesloten. Op de beelden is ook te zien dat er tijdens de inzet vaak rook en/of vocht richting de vuurhaard stroomt. De verstikkende werking hiervan heeft mogelijk een extra effect op de daling van de temperatuur in de brandruimte.

3.1.4 In welke mate wordt de veiligheid van brandweermensen en slachtoffers beïnvloed tijdens het koelen van rookgassen bij het vorderen naar een vuurhaard in een statische rooklaag (deur dicht)?

Veiligheid van brandweermensen

Op basis van de gehanteerde methode voor blootstelling is de gestelde grenswaarde van FED 1,0 bij geen van de onderzochte rookgaskoelingsmethoden overschreden. Er heeft zich tijdens deze experimenten geen onveilige situatie voorgedaan.

Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van warmtebeleving, (dis)comfort, pijnsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de straalpijpvoerder en de nummer 2.

Veiligheid van slachtoffers

Er is onderscheid gemaakt in drie groepen slachtoffers, namelijk 'zeer kwetsbaar', 'kwetsbaar' en 'algemeen', conform het SFPE-handboek. De inzet van de brandweerploeg heeft, ongeacht het blussysteem of de methode, negatieve gevolgen voor de veiligheid van zeer kwetsbare en kwetsbare slachtoffers. Voor alle zeer kwetsbare slachtoffers ontstaan bij vrijwel alle experimenten levensbedreigende en zelfs fatale situaties. Voor de kwetsbare groep zijn er bij twee experimenten overleefbare condities op 2 m in de gang en bij één experiment op 12 m in de gang. Bij de overige experimenten ontstaan er levensbedreigende of fatale situaties. Voor slachtoffers die in de algemene groep vallen, ontstaan er op basis van de meetresultaten geen levensbedreigende situaties, op vier experimenten en beide nulmetingen na. Daarnaast ontstaat bij beide nulmetingen een fatale situatie voor slachtoffers op 2 m in de gang en bij één experiment op 12 m.

3.1.5 Wat is het effect van de rookgaskoeling met de onderbroken boogmethode ten opzichte van de continue boogmethode met de straal voortdurend open in zowel een dynamische rooklaag (deur open) als een statische rooklaag (deur dicht)?

Temperatuur en energie

Zowel de continue als de onderbroken boogmethode koelen de rook meer dan alleen het sluiten van de deur. De onderlinge verschillen tussen de inzetmethodes zijn minimaal, maar de inzet met continue boogmethode met LD laat de meeste koeling zien. In de koude zone neemt de temperatuur bij alle experimenten in geringe mate toe.

Tijdens de nulmeting met de deur open, loopt de temperatuur op in de warme zone. Dit is in vergelijking met de deur dicht een verschil. De veranderingen in temperatuur bij beide inzetmethodes met de deur open zijn vergelijkbaar met elkaar en hebben een positief effect op de temperatuur in vergelijking met de nulmeting. Ook in de koude zone neemt de temperatuur tijdens de nulmeting toe.

De spreiding tussen de experimenten met de deur dicht is kleiner dan bij de experimenten met de deur open. Dit kan betekenen dat het verschil in straalpijpvoerder bij de deur dicht minder van invloed is. Een vergelijkbare conclusie kan getrokken worden als gekeken wordt naar de energieverandering.

Voorwaartse en achterwaartse koeling

De experimenten met de onderbroken en continue boogmethode laten vergelijkbare resultaten zien voor wat betreft de voorwaartse en achterwaartse koeling. Zowel bij de continue en onderbroken boogmethode met de deur open als met de deur dicht, is de achterwaartse koeling > 17 m. De voorwaartse koeling verschilt wel per inzetmethode. De inzetten met onderbroken boogmethode HD en LD met de deur dicht en de inzet met de continue boogmethode LD met de deur open hebben een vergelijkbare voorwaartse koeling van 9 m. De reikwijdte van de voorwaartse koeling van de onderbroken boogmethode LD met de deur open is 12 m. De continue boogmethode met LD met de deur dicht laat de meeste voorwaartse koeling zien, namelijk 17 m.

Invloed op de vuurhaard

Het effect van de onderbroken boogmethode op de temperatuur in de brandruimte is voor HD en LD met de deur dicht vrijwel hetzelfde. Het effect van de continue boogmethode is groter. Bij de nulmeting met de deur open stijgt de temperatuur in de brandruimte, terwijl beide inzetmethodes een afname van de temperatuur laten zien. Alle experimenten hebben een aanmerkelijk beter effect dan de nulmeting.

3.2 Beantwoording van de hoofdvraag

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

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

Alle methoden inclusief de nulmeting resulteren in een temperatuurdaling in de warme zone. Hieruit blijkt dat alleen al de deur dicht doen een positief effect heeft op de temperatuur. Bij de verschillende methoden is de temperatuurdaling echter groter dan bij de nulmeting, wat betekent dat alle methoden effect hebben gehad. De continue boogmethode met LD is het meest effectief. De experimenten met de 3D-pulsmethode (LD en HD) en de onderbroken boogmethode met HD zijn vergelijkbaar met elkaar. De experimenten met de onderbroken boogmethode met LD laten de kleinste temperatuurdaling zien. Als wordt gekeken naar de koude zone, valt op dat bij alle methoden inclusief de nulmeting de temperatuur licht toeneemt.

De spreiding is relatief klein tijdens alle experimenten. Dit kan betekenen dat het verschil in straalpijpvoerder bij de deur dicht minder van invloed is. Een vergelijkbare conclusie kan getrokken worden als gekeken wordt naar de energieverandering.

Bij de voorwaartse en achterwaartse koeling door de inzetploeg blijkt dat de continue boogmethode zowel voorwaarts als achterwaarts een voortdurende temperatuurdaling te zien geeft. Bij experimenten met de 3D-pulsmethode of onderbroken boogmethode is vaak waargenomen dat de temperatuur na enige tijd weer licht toenam, maar over het algemeen bleef de temperatuur daar ook dalen tijdens de inzet.

Op basis van de gehanteerde methode voor blootstelling wordt de gestelde grenswaarde van FED 1,0 bij geen van de onderzochte rookgaskoelingsmethoden overschreden. Op grond daarvan kan gesteld worden dat de veiligheid qua warmtestraling voor brandweermensen niet in het gedrang komt. Uit de gemiddelde scores van subjectieve beleving van warmtebeleving, (dis)comfort, pijnsensatie, huidvochtigheid en ervaren inspanning blijkt daarnaast dat de experimenten niet bovenmatig zwaar zijn geweest voor de straalpijpvoerder en de nummer 2.

Voor slachtoffers neemt de overleefbaarheid ook bij rookgaskoeling af, afhankelijk van de locatie waar ze zich bevinden in de gang en wat hun basisconditie is.

4 Discussie

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste discussiepunten besproken die uit het onderzoek naar voren zijn gekomen.

Hoewel de inzetploeg uitgebreid heeft geoefend voor aanvang van de experimenten, is de uitvoering van de inzet was niet overal exact gelijk geweest. Op de camerabeelden is bij alle inzetten met de 3D-pulsmethode te zien dat de straalsoep bij verschillende drempels iets naar links is gericht; er is geen afwijking naar rechts te zien. Daarnaast is één inzet halverwege uitgevoerd met een gebonden soep in plaats van een sproei-soep. De invloed van de stand en/of richting van straalsoep is echter geen onderdeel van dit onderzoek geweest en de verwachting is dat vanwege de beperkte afmetingen van de gang in dit onderzoek het debiet bepalender is voor de resultaten dan de exacte stand en/of richting van de straalsoep. De boogmethodes zijn over het algemeen op de juiste manier uitgevoerd. In een aantal gevallen kwam de gebonden soep niet tegen de rechtermuur aan en werd er van rechts naar links geen goede boog gemaakt. De verwachting is dat dit geen invloed heeft op de conclusies omdat de soep evengoed in de rooklaag gericht was. Dit wordt ondersteund door het feit dat de spreiding relatief klein is, wat wil zeggen dat er een vergelijkbare rookgaskoeling behaald wordt wanneer de boog van rechts naar links wel goed werd gemaakt of de rechtermuur raakte. Bij alle experimenten is bij drempel 7 een puls gegeven of het boogpatroon gemaakt door de inzetploeg, hoewel dit geen onderdeel was van het inzetprotocol. De conclusies in dit onderzoek maken gebruik van de metingen tot aan drempel 7 en eventuele invloed van deze extra inbreng van water valt daarom buiten deze resultaten.

In de praktijk spelen ook allerlei oncontroleerbare factoren een rol; deze experimenten zijn daarom een goede weerspiegeling van realistische rookgaskoeling. De beperkte spreiding in de startcondities en de vergelijkbare resultaten van de herhaalmeting ten opzichte van 2019 laten zien dat de resultaten reproduceerbaar zijn. Bij dit type praktijkexperimenten wordt er daarom van uitgegaan dat een verschil 20 graden in temperatuur bij dezelfde condities binnen de foutmarges van de uitvoering valt.

Ondanks voorbereiding en controles zijn bij een aantal experimenten de temperatuurmetingen niet goed doorgekomen en deze zijn daarom niet meegenomen in de analyse. Dit waren:

- > Nulmeting 1, 17 m in de gang op 0,9 m hoogte (TK4-5)
- > Onderbroken boogmethode HD deur dicht 1, 2 m in de gang op 0,9 m hoogte (TK1-5)
- > Continue boogmethode LD deur dicht 1, 17 m in de gang op 0,3 m hoogte (TK4-6)
- > Continue boogmethode LD deur open 1, 2 m in de gang op 0,3 m hoogte (TK1-6)

De uitgevallen thermokoppels bevonden zich allemaal in de koude zone en hadden dus geen invloed op de metingen van rookgaskoeling. Per experiment is hoogstens één thermokoppel uitgevallen en daarom is de overleefbaarheid van slachtoffers bij de betreffende experimenten bepaald met een thermokoppel minder. Dit had geen invloed op de conclusies omdat de temperatuur nergens de doorslaggevende factor was.

Door de L-vorm van het gebouw was het niet mogelijk om direct water op de vuurhaard te brengen, maar uit beelden en de metingen bij de vuurhaard bleek dat het wel mogelijk was om de brandruimte indirect te koelen. Dit betekent dat er indirecte rookgaskoeling is toegepast, omdat er minder hete rook vanaf de vuurhaard werd aangevoerd. Er is niet verder onderzocht op welke manieren de vuurhaard tijdens de inzet indirect gekoeld werd of welke manier de grootste invloed had. De totale invloed van de inzet op de vuurhaard is beschreven in hoofdstuk 2.3 en hoofdstuk 2.5.4.

De gemeten debieten van zowel HD als LD wijken iets af van de bedachte opzet. Dit heeft geen invloed op de conclusies, omdat het waterverbruik is berekend met de daadwerkelijke debieten en er alleen een vergelijking is gedaan tussen de daadwerkelijke debieten.

De hoeveelheid rook in de gang zorgde voor verbindingsproblemen met de inzetploeg. Hierdoor is het niet altijd mogelijk geweest om inzetploeg in de gang te volgen en de drempels te noteren. De tijden voor de drempels zijn met name bepaald aan de hand van de beelden van de warmtebeeldcamera. Bij de continue boogmethode was het vanwege de hoeveelheid rook en/of water in gang ook met de warmtebeeldcamera niet na te gaan wanneer de inzetploeg welke drempel bereikte. Daarom zijn hier de tijden berekend op basis van de totale inzettijd gedeeld door het aantal drempels. Deze tijden zijn gebruikt bij de berekening van de FED voor de inzetploeg (Hoofdstuk 2.4.1).

Tijdens de testweek was het bijzonder warm en zijn er aanvullende maatregelen genomen met betrekking tot rust en extra drinken. Dit heeft geen invloed op de gemiddelde scores voor de subjectieve beleving per inzetmethode, aangezien beide experimenten met dezelfde inzetmethode en blussysteem op hetzelfde dagdeel zijn uitgevoerd.

De weeromstandigheden hadden waarschijnlijk wel enige invloed op de temperaturen in de gang. Voor de conclusies in dit onderzoek heeft dat geen invloed, omdat alle testen onderling vergeleken zijn. In de herhaalttest is wel een verschil te zien tussen 2019 en 2025, met name achter in de gang. Een verklaring kan zijn dat de omgevingstemperatuur in 2019 ongeveer 10 graden lager lag dan in 2025, waardoor de vuurhaard langer heeft gebrand om voorin de gang de vereiste starttemperatuur te bereiken. Hierdoor heeft de temperatuur achter in de gang ook langer kunnen oplopen.

In twee gevallen is tijdens het experiment een andere deur gesloten dan het protocol voorschreef. In beide gevallen is dit direct opgemerkt en gecorrigeerd. De twee experimenten verder volgens protocol afgemaakt en de verwachting is dat de kortstondige afwijking geen invloed heeft gehad op de conclusies.

5 Vergelijking 2019 en 2025

Zoals in paragraaf 2.1 is vastgesteld, komen de condities van de experimenten in 2025 overeen met die in 2019, waardoor de conclusies uit 2019 vergeleken kunnen worden met die van 2025.

De conclusies uit 2019 waren:

- > Beide methoden (3D-puls en continue boogmethode) zorgen voor een rookgaskoeling.
- > De continue boogmethode geeft bij de voorwaartse als achterwaartse koeling een gunstiger resultaat dan de 3D methode.
- > Uit de gemiddelde scores van de subjectieve beleving van thermoregulatie, discomfort en inspanning blijkt dat de experimenten niet bovenmatig zwaar geweest zijn.
- > Door het toepassen van de onderzochte methoden voor rookgaskoeling verslechteren wel de condities voor potentiële slachtoffers. Voor kwetsbare personen en zeer kwetsbare personen kan dit leiden tot een levensbedreigende of fatale situatie.
- > Hoewel beide methoden effectief rookgassen kunnen koelen, is de continue boogmethode makkelijker uitvoerbaar en geeft meer koeling.

De conclusies uit de experimenten van 2025 komen overeen met die van 2019. Het verschil tussen de experimenten uit 2019 en die van 2025 is de stand van de toegangsdeur. In 2019 was de toegangsdeur tijdens de inzetten open, waardoor er een dynamische rookgaslaag ontstond. In 2025 was de deur bijna helemaal gesloten, waardoor er een statische rookgaslaag ontstond. Het sluiten van de deur heeft een positieve invloed gehad op de temperatuur. Er is dan al sprake van een behoorlijke temperatuurdaling.

6 Literatuurlijst

- Brandweeracademie. (2021). *Wanneer water in rook opgaat, Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen.*
- Guillaume, E., Didieux, F., Thiry, A., & Bellivier, A. (2014). Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment. *Fire Safety Journal*. (Volume 70, November 2014, Pages 81-97). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.014>
- ISO 13571. (2012). *Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.*
- Landelijk Expertisecentrum BrandweerBRZO. (2016). *Handreiking inzake maximaal toelaatbare niveaus van warmtestraling voor korte inzet (maximaal 5 minuten) van (bedrijfs) brandweerpersoneel en operators bij industriële bedrijven.* <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/10/20161220-LECBBrandweerBRZO-Handreiking-Warmtestraling-korte-inzet-bedrijfs-brandweerpersoneel-en-operators-industriele-bedrijven.pdf>
- NEN. (2011). *NEN 6055: Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept - Bepalingsmethode.*
- Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. J. Hurley (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5de ed., pp. 2308–2428). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- Reotemp. (2018). *Type K Thermocouple.*
- 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.* UL Firefighter Safety Research Institute

Bijlage 1 Inzetprotocol

In het protocol wordt een aantal afkortingen gebruikt:

OL Onderzoeksleider

ME Meting en data-acquisitie-team

ST Stokers

VP Veiligheidsploeg

NR1 Inzetploeg positie 1: straalpijpvoerder

NR2 Inzetploeg positie 2: aanvoer slang & controle uitvoering

NR3 Inzetploeg positie 3: aanvoer slang eerst buiten, indien nodig halverwege gang

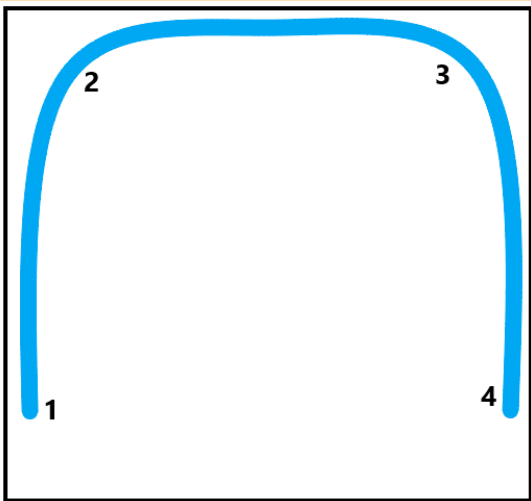
NR4 Inzetploeg positie 4: aanvoer slang buiten het pand.

3D-pulsmethode (deur dicht)

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 waarop 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 spuithoek 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 opentrekt, telt hij hardop 'eenentwintig, tweeëntwintig, drieëntwintig, DICHT! Bij 'dicht' sluit NR1 de straalpijp. <i>Instelling: kegelhoek 10°-30°, spuithoek 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 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 instroom-opening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Vorderen
6	NR3	Als NR1 en 2 binnen zijn, sluit NR 3 de deur zodra dat dit mogelijk is en zorgt voor slangaanvoer én deurcontrole. De deur wordt zoveel mogelijk gesloten gehouden. De breedte van de opening is de breedte van de gekleurde steen die tussen de deur en het kozijn ligt. NR3 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	

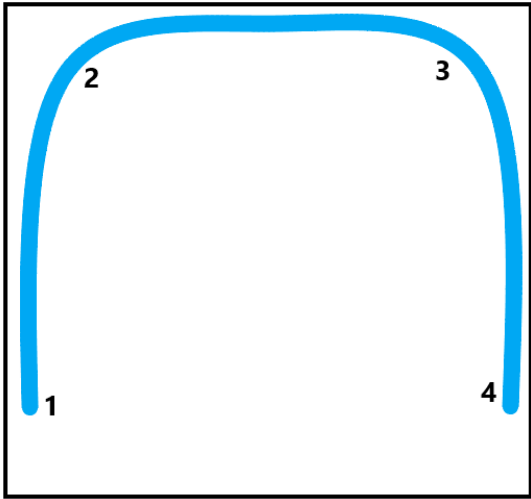
Stap	Wie	Wat	Commando
7	NR1 en 2	NR1 en 2 herhalen stap 3. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel'. De ME noteert het tijdstip dat de volgende drempel wordt bereikt.	Drempel
8	NR1	NR1 en 2 herhalen stap 4 door het geven van een lange puls.	Eenentwintig, tweeëntwintig, drieëntwintig, DICT
9	NR1, 2 en 3	NR1, 2 en 3 herhalen stap 5 door te vorderen.	Vorderen
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. <i>NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met rookgaskoeling</i> en trekt de straalpijp dicht.	Vuurhaard
11	NR1 en 2	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang na het commando 'terugtrekken' van de onderzoeksleider.	Terugtrekken
12	OL en VP	De OL geeft het commando 'start blussing' als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten. De veiligheidsploeg zet de veiligheidsdeur en de toegangsdeuren open.	
13	ST	De stokers starten de blussing als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten en de onderzoeksleider het commando 'start blussen' heeft gegeven.	Blussing
14	OL	'Einde experiment' wordt gegeven als met de blussing wordt gestart.	
15	NR1, 2	De NR1 en 2 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

Continue boogmethode (deur dicht)

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 bij de ingang. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel' . De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 zet de straalpijp open. Hij begint het halve-maan-patroon te maken, terwijl de straalpijp openstaat. Het halve-maan-patroon maakt men door met een gebonden straal continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen.	Open
 Tijdens het maken van het patroon blijven NR 1 en 2 laag en vorderen richting de vuurhaard. Ze houden hierbij rechts van de gang aan. NR1 begint vrij kort voor zich (1m) met koelen en doet dit gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit. <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, maximaal debiet.</i>			
5	NR 3	Als NR1 en 2 binnen zijn, sluit NR 3 de deur zodra dat dit mogelijk is en zorgt voor slangaanvoer én deurcontrole. De deur wordt zoveel mogelijk gesloten gehouden. De breedte van de opening is de breedte van de gekleurde steen die tussen de deur en het kozijn ligt. NR3 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Deurcontrole
6	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 halve-maan-patroon en blijft vorderen richting de vuurhaard.	Drempel
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

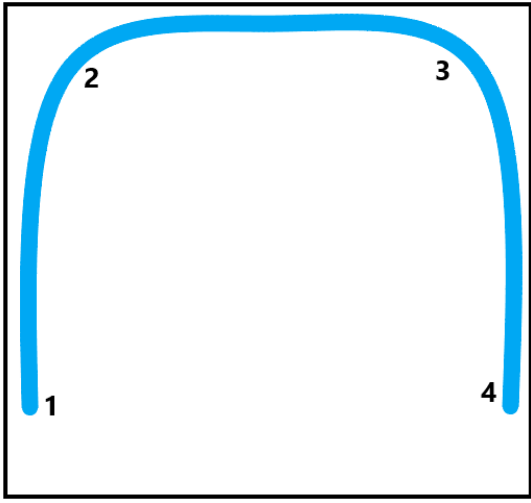
Stap	Wie	Wat	Commando
		<i>'vuurhaard' hardop te geven. NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met rookgaskoeling en trekt de straalpijp dicht.</i>	
8	NR1 en 2	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang na het commando 'terugtrekken' van onderzoeksleider.	Terugtrekken
9	OL en VP	De OL geeft het commando 'start blussing' als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten. De veiligheidsploeg zet de veiligheidsdeur en de toegangsdeuren open.	
10	ST	De stokers starten de blussing als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten en de onderzoeksleider het commando 'start blussen' heeft gegeven.	Blussing
11	OL	'Einde experiment' wordt gegeven als met de blussing wordt gestart.	
12	NR1, 2	De NR1 en 2 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

Onderbroken boogmethode (deur dicht)

Stap	Wie	Wat	Commando
1	OL	Attentiesein voor de inzetploeg dat de conditie ($>200^{\circ}\text{C}$ 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 waarop de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 zet de straalpijp open en roept daarbij 'open'. NR 1 begint vanaf de drempel het halve-maan-patroon te maken terwijl de straalpijp open staat. Het halve-maan-patroon maakt men door met een gebonden straal continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen. Hierna wordt de straalpijp gesloten en NR 1 roept daarbij 'dicht'.	Open
 NR1 begint vrij kort voor zich (1m) met koelen en koelt gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit. <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, maximaal debiet.</i>			
5	NR1 en 2	NR 1 en 2 blijven laag en vorderen naar de volgende drempel. Ze houden hierbij rechts van de gang aan	
6	NR 3	Als NR1 en 2 binnen zijn, sluit NR 3 de deur zodra dat dit mogelijk is en zorgt voor slangaanvoer én deurcontrole. De deur wordt zoveel mogelijk gesloten gehouden. De breedte van de opening is de breedte van de gekleurde steen die tussen de deur en het kozijn ligt. NR3 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Deurcontrole
7	NR1 ME	Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel' . De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt. NR1 zet de straalpijp open en roept daarbij 'open'. NR 1 begint vanaf de drempel het halve-maan-patroon te maken terwijl de straalpijp openstaat. Het halve-maan-patroon maakt men door met een gebonden straal	Drempel

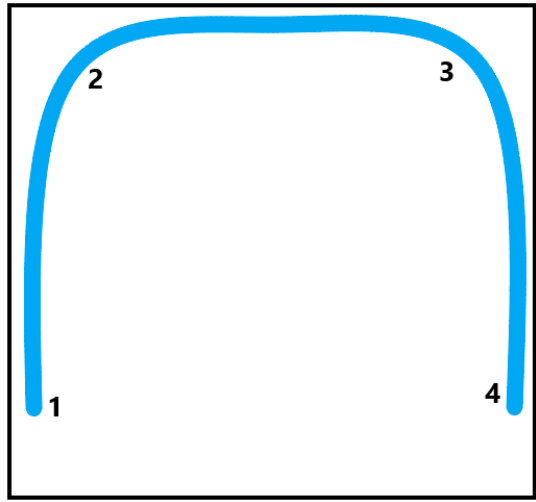
Stap	Wie	Wat	Commando
		continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen. Hierna wordt de straalpijp gesloten en NR 1 roept daarbij 'dicht'.	
8	NR1 en 2	Zodra NR1 en 2 de laatste drempel hebben bereikt (drempel 7, met zicht op de vuurhaard), geeft NR1 dit aan door het commando 'vuurhaard' hardop te geven. <i>NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met rookgaskoeling</i> en trekt de straalpijp dicht.	Vuurhaard
9	NR1 en 2	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang na het commando 'terugtrekken' van onderzoeksleider.	Terugtrekken
10	OL en VP	De OL geeft het commando 'start blussing' als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten. De veiligheidsploeg zet de veiligheidsdeur en de toegangsdeuren open.	
11	ST	De stokers starten de blussing als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten en de onderzoeksleider het commando 'start blussen' heeft gegeven.	Blussing
12	OL	'Einde experiment' wordt gegeven als met de blussing wordt gestart.	
13	NR1, 2	De NR1 en 2 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

Continue boogmethode (deur open)

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 bij de ingang. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel' . De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 zet de straalpijp open. Hij begint om continu het halve-maanpatroon te maken terwijl de straalpijp openstaat. Het halve-maanpatroon maakt men door met een gebonden straal continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen.	Open
 Tijdens het maken van het patroon blijven NR 1 en 2 laag en vorderen richting de vuurhaard. Ze houden hierbij rechts van de gang aan. NR1 begint vrij kort voor zich (1m) met koelen en koelt gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit. <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, maximaal debiet.</i>			
5	NR 3	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 halve-maanpatroon en blijft vorderen richting de vuurhaard. NR3 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Drempel
6	NR3 en 4	Zodra NR1 de vierde keer het commando vorderen geeft, gaat NR3 indien nodig 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. NR4 blijft 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. <i>NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met rookgaskoeling</i> en trekt de straalpijp dicht.	Vuurhaard
8	NR1 en 2	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang na het commando 'terugtrekken' van onderzoeksleider.	Terugtrekken
9	OL en VP	De OL geeft het commando 'start blussing' als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten. De veiligheidsploeg zet de veiligheidsdeur en de toegangsdeuren open.	
10	ST	De stokers starten de blussing als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten en de onderzoeksleider het commando 'start blussen' heeft gegeven.	Blussing
11	OL	'Einde experiment' wordt gegeven als met de blussing wordt gestart.	
12	NR1, 2	De NR1 en 2 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

Onderbroken boogmethode (deur open)

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 bij de ingang. Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel' . De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt.	Drempel
4	NR1	NR1 zet de straalpijp open en roept daarbij 'open'. NR 1 begint vanaf de drempel het halve-maan-patroon te maken, terwijl de straalpijp openstaat. Het halve-maan-patroon maakt men door met een gebonden straal continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen. Hierna wordt de straalpijp gesloten en NR 1 roept daarbij 'dicht'.	Open
 NR1 begint vrij kort voor zich (1m) met koelen en koelt gedurende het vorderen steeds verder voor zich uit. <i>Instelling: kegelhoek 0°-10°, maximaal debiet.</i>			
5	NR1 en 2	NR 1 en 2 blijven laag en vorderen naar de volgende drempel. Ze houden hierbij rechts van de gang aan	
6	NR1	Zodra NR1 de drempel voelt, zegt hij hardop 'drempel' . De ME noteert het tijdstip waarop de drempel wordt bereikt. NR1 zet de straalpijp open en roept daarbij 'open'. NR 1 begint vanaf de drempel het halve-maan-patroon te maken, terwijl de straalpijp openstaat. Het halve-maan-patroon maakt men door met een gebonden straal continu het patroon 1-2-3-4-3-2-1 te volgen. Hierna wordt de straalpijp gesloten en NR 1 roept daarbij 'dicht'. NR3 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	Drempel

Stap	Wie	Wat	Commando
7	NR3 en 4	Zodra NR1 de vierde keer het commando vorderen geeft, gaat NR3 indien nodig 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. NR4 blijft weg bij de instroomopening, zodat de instroom/uitstroom van lucht niet wordt gehinderd.	
8	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. <i>NR1 stopt bij het bereiken van de laatste drempel direct met rookgaskoeling</i> en trekt de straalpijp dicht.	Vuurhaard
9	NR1 en 2	De NR1 en 2 trekken zich terug via de gang na het commando 'terugtrekken' van onderzoeksleider.	Terugtrekken
10	OL en VP	De OL geeft het commando 'start blussing' als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten. De veiligheidsploeg zet de veiligheidsdeur en de toegangsdeuren open.	
11	ST	De stokers starten de blussing als NR 1 en 2 de gang hebben verlaten en de onderzoeksleider het commando 'start blussen' heeft gegeven.	Blussing
12	OL	'Einde experiment' wordt gegeven als met de blussing wordt gestart.	
13	NR1, 2	De NR1 en 2 melden zich direct bij de onderzoekers voor een korte serie vragen over het ervaren (dis)comfort.	

Bijlage 2 Meetapparatuur

Temperatuur

Voor de praktijkexperimenten zijn type K thermokoppels (een nikkel – chroom en nikkel – aluminium legering (Reotemp, 2018)) met een dikte van 1,0 mm gebruikt. De redenen hiervoor zijn het brede temperatuurbereik (-270°C tot 1260°), snelle responstijd (0,06-1,8 s)² en de lage kostprijs. Type K thermokoppels worden ook veel gebruikt bij brandexperimenten (Zevotek et al., 2018) (Guillaume et al., 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	1,0 mm
405-280	K RVS 1.4841	1500 mm	1,0 mm
405-282	K RVS 1.4841	2000 mm	1,0 mm
405-283	K RVS 1.4841	3000 mm	1,0 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 temperatuurverandering, en omdat de relatie tussen de spanning en de temperatuur bekend is, kan de gemeten spanning omgezet worden naar een temperatuur.

² <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouples-response-time>.

Straling

Voor de praktijkexperimenten zijn twee typen warmtestralingsmeters gebruikt. Op hoogtes waar een lage stralingsbelasting ($< 5 \text{ kW/m}^2$) werd verwacht, zijn watergekoelde Schmidt-Boelter fluxmeters gebruikt en op hoogtes 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 geen Schmidt-Boelter fluxmeter is gebruikt vanwege de 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	$4067^3 \mu\text{V}$
19230803	PTHFM	$4067^3 \mu\text{V}$
19230804	PTHFM	$4062^3 \mu\text{V}$
19230806	PTHFM	$4063^3 \mu\text{V}$
12530	Schmidt-Boelter	$0,455 \pm 0,030 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12535	Schmidt-Boelter	$0,411 \pm 0,027 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
12420	Schmidt-Boelter	$0,529 \pm 0,035 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$

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

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

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

³ Criterium $4096 \pm 62 \mu\text{V}$ (bij $100 \text{ }^\circ\text{C}$).

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 ₂	0-25 %Vol	0,01 %Vol	± 0,2 %Vol	< 20 s
CO	0-10000 ppm	1 ppm	± 10 ppm (< 199 ppm) ± 5 % ⁴ (200 - 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 40 s
CO _{low}	0-500 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % ⁴ (> 40 ppm)	< 40 s
NO	0-4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (100 - 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 30 s
NO _{low}	0-300 ppm	0,1 ppm	± 2 ppm (< 40 ppm) ± 5 % ⁴ (> 40 ppm)	< 30 s
NO ₂	0-500 ppm	0,1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (> 100 ppm)	< 40 s
SO ₂	0-5000 ppm	1 ppm	± 5 ppm (< 100 ppm) ± 5 % ⁴ (100 – 2000 ppm) ± 10 % ⁴ (> 2000 ppm)	< 30 s
CO ₂	0-50 %Vol	0,01 %Vol (< 25 %Vol) 0,1 %Vol (> 25 %Vol)	± 0,3 %Vol ± 1 % ⁴ ± 0,5 %Vol ± 1,5 % ⁴	< 10 s

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

⁴ Van de meetwaarde.

Tabel B2.7 Overzicht van de gebruikte gasmeters

Sensor	Meetlocatie	Hoogte (m)
(7)	B1 (2m)	0,30
(5)	B2 (7m)	0,30
(3)	B3 (12m)	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 experimenten 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 kunnen 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 locaties buiten.
- > FLIR: Dit type warmtebeeldcamera is op twee locaties in de gang gebruikt.

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 zijn de gebruikte accu's opgeladen. Alle camera's hebben beelden opgeslagen op micro-SD-kaartjes.

Tabel B2.8 Overzicht van de gebruikte camera types

Camera's	FireCam	Actioncam	Warmtebeeldcamera
Merk	FireCam	Nikkei	FLIR
Type	4k wifi	Extreme X8S	K55
Leverancier	SpectraCam	Coolblue	Hobrand
Accuduur	Niet bekend	1,5 uur	4 uur bij 25 °C
Opslagmedium	Micro-SD-kaart	Micro SD-kaart	Onbekend
Capaciteit	16Gb	32Gb	Max. 200 foto's of video's van 5 minuten.
Beeldkwaliteit	4K/Full HD/HD	4K/Full HD/HD	320 x 240
Beeldhoek	150°	170°	51° x 38°
Camera	5 megapixels	16 megapixels	76,800 pixels

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. Dit systeem maakt gebruik van de meegeleverde software.
- > DAQ-systeem voor de temperatuur en straling. Dit systeem maakt gebruik van LabVIEW software van NI, waarmee eigen scripts zijn ontwikkeld.

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 rookgassonde⁵

⁵ <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-bussignaal en kunnen elkaars signaal doorgeven ('daisy-chaining').

Er is door de toenmalige Brandweeracademie eerder gebruikgemaakt van een DAQ (data acquisition)-systeem van NI 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 en straling kunnen aangesloten worden op het Compact DAQ systeem van National Instruments. Het DAQ-systeem van NI is opgebouwd uit modules in een chassis (zie figuur B2.2), dat gekoppeld wordt aan een computer met de registratiesoftware LabVIEW.



Figuur B2.2 Links: Een aantal DAQ-modules.⁶ 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 ethernetsignaal. Het chassis maakt gebruik van een ethernetsignaal, dat langere afstanden voor signaaloverdracht dan USB mogelijk maakt.

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 μ V	0,01 $^{\circ}$ C
Werkbereik	-40 – 70 $^{\circ}$ C 10 - 90% RH	-40 – 70 $^{\circ}$ C 10 - 90% RH

⁶ 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

Er kunnen meerdere chassis aan elkaar gekoppeld worden binnen een systeem. Ze kunnen direct aan elkaar gekoppeld worden, waarbij ze 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 apart te verbinden met een ethernet switch en vervolgens met de registratiecomputer (stertopologie). Voor de experimenten, synchroniseren en registreren van alle sensoren van het DAQ-systeem zijn eigen scripts ontwikkeld.

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
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

Meetboom	Locatie	Parameter	Hoogte (m)
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
B4	17 meter in gang	Temperatuur	0,30 - 0,90 - 1,50 - 1,80 - 2,00 - 2,20 - 2,40
		Straling	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 temperatuurverandering 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 tijdvakken 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 600 °C. De meetfout bij deze temperaturen was dus ongeveer 4,5 °C. De thermokoppels hebben temperaturen gemeten in het bereik van 20 °C tot 600 °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 is 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 $<< 1 \text{ W/m}^2$. De straling is met de plaatfluxmeters gemeten in een bereik van 0,45 tot 10 kW/m². 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 conclusies, 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/m². De resolutie wordt bij deze meters hoofdzakelijk bepaald door het meetsysteem en bedroeg ongeveer 1 W/m². De straling is met de Schmidt-Boelter fluxmeter gemeten in een bereik van 0 tot > 1000 W/m². 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 gehad 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

De ruwe data zijn eerst gecontroleerd door vast te stellen dat alle sensoren op de juiste kanalen zijn aangesloten geweest en door te bepalen of de kanalen de juiste benaming hebben gekregen voor de verdere analyse. Vervolgens zijn de data ingelezen met behulp van eigen ontwikkelde scripts in Python 3.12.7. 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 temperatuurdatabestanden zijn al in de juiste eenheid gemeten, maar de straling en voltages zijn omgerekend naar straling (kW/m²). 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 ϕ in W/m² op een bepaald tijdstip is voor de plaatfluxmeters weergegeven in vergelijking 1 (Wickström et al., 2019):

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

Vergelijking 1 Omrekening plaattemperatuur naar straling

Hierin zijn T_{pt} en T_{air} de temperatuur van de plaat respectievelijk de omgeving in Kelvin. ε 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 ϕ 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.

Bijlage 3 Vragenlijst subjectieve beleving brandweerpersoneel

Vragenlijst nulmeting

Beste,

Je staat op het punt om een experiment uit te voeren voor het NIPV, dank voor de medewerking!

Dit is een korte vragenlijst om meer informatie over jouw warmte, (dis)comfort, vochtigheid, pijn en inspanning te weten te komen. Let op, heb je een antwoord ingevuld dan gaat de vragenlijst vanzelf verder, je kunt altijd op terug drukken.

Het is van belang dat je de vragen invult over hoe jij je op dit moment voelt.

1. Welke functie heb jij in het komende experiment?

- > Straalpijpvoerder, eerste man / vrouw
- > Tweede man / vrouw

2. Hoe warm voel je je nu?

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

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

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

4. Hoe vochtig voelt je huid nu?

- > 0,0 - Neutraal (niet droog niet nat)
- > 0,5
- > 1,0 - Vochtig
- > 1,5
- > 2,0 - Nat
- > 2,5
- > 3,0 - Zeer nat

5. Hoeveel pijn voel je nu?

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

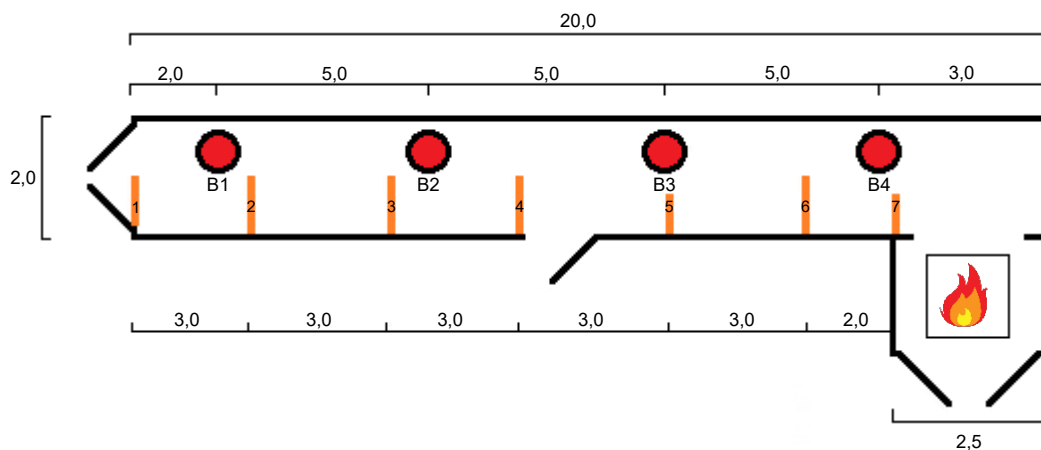
6. Hoeveel inspanning ervaar je nu?

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

Naast de vragen die je hierboven hebt gehad, krijg je na de experimenten ook de onderstaande vragen, lees deze goed door.

Op welke locatie ervaarde je de meeste warmte?

Klik op de plattegrond om aan te geven waar je de meeste warmte ervaarde



Op welk moment ervaarde je de meeste warmte?

- > Tijdens het naar binnen gaan
- > Direct na het openen van de straalpijp
- > Tijdens het openstaan van de straalpijp
- > Direct na het sluiten van de straalpijp
- > Tijdens het vorderen
- > Anders, namelijk ...

Wat veroorzaakt volgens jou het meeste discomfort?

Wil je nog wat anders met ons delen over warmte, (dis)comfort, vochtigheid, pijn of inspanning tijdens de experimenten?

Na de experimenten krijg je nogmaals deze vragenlijst, het is van belang dat je dan de vragenlijst invult hoe jij je voelt op het moment dat je net de gang uitliep.

Succes met de inzet!

Vragenlijst na de experimenten

Beste,

Zojuist heb jij de experimenten uitgevoerd!

Zoals je weet is dit een korte vragenlijst om meer informatie over jouw warmte, (dis)comfort, vochtigheid, pijn en inspanning te weten te komen. Let op: heb je een antwoord ingevuld dan gaat de vragenlijst vanzelf verder, je kunt altijd op terug drukken.

Het is van belang dat je de vragen invult over hoe jij je op het moment voelde toen je net de gang uitliep.

1. Welke functie had je in de experimenten?

- > Straalpijp voerder, eerste man / vrouw
- > Tweede man / vrouw

2. Hoe warm voel je je nu?

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

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

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

4. Hoe vochtig voelt je huid nu?

- > 0,0 - Neutraal (niet droog niet nat)
- > 0,5
- > 1,0 - Vochtig
- > 1,5
- > 2,0 - Nat
- > 2,5
- > 3,0 - Zeer nat

5. Hoeveel pijn voel je nu?

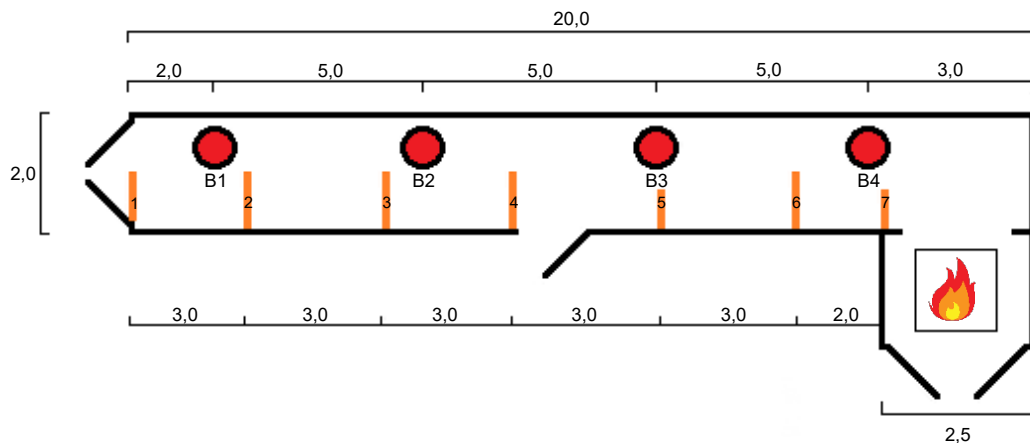
- > 0 - Geen pijn
- > 1 - Enigszins pijnlijk
- > 2 - Pijnlijk
- > 3 - Zeer pijnlijk
- > 4 - Zeer, zeer pijnlijk

6. Hoeveel inspanning ervaar je nu?

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

7. Op welke locatie ervaarde je de meeste warmte?

Klik op de plattegrond om aan te geven waar je de meeste warmte ervaarde



8. Op welk moment ervaarde je de meeste warmte?

- > Tijdens het naar binnen gaan
- > Direct na het openen van de straalpijp
- > Tijdens het openstaan van de straalpijp
- > Direct na het sluiten van de straalpijp
- > Tijdens het vorderen
- > Anders, namelijk

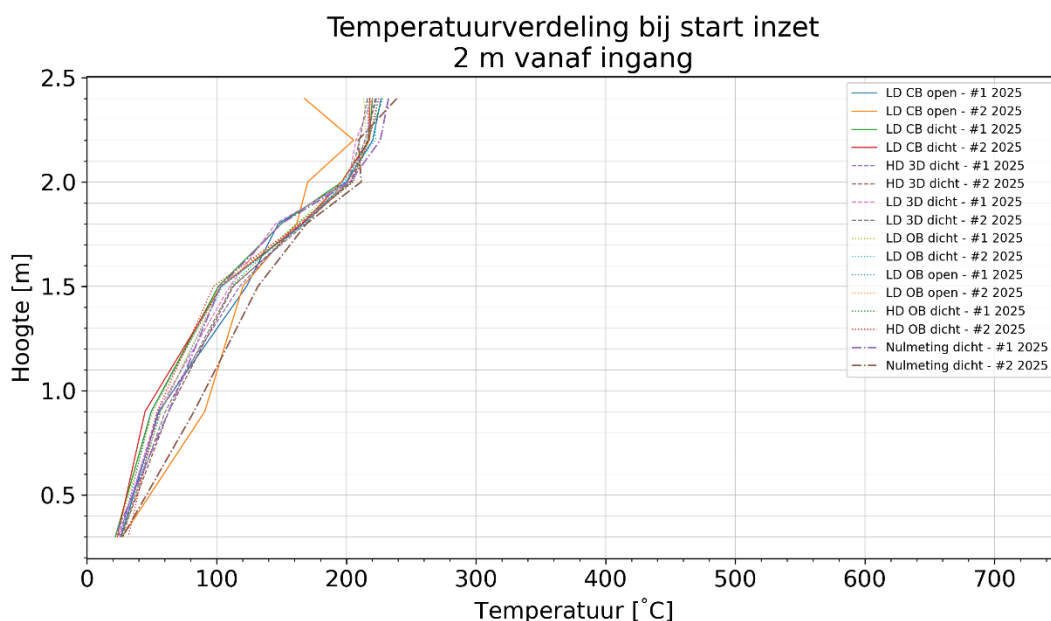
9. Wat veroorzaakt volgens jou het meeste discomfort?

10. Geef eventueel aanvullende opmerkingen over warmte, (dis)comfort, vochtigheid, pijn of inspanning tijdens de experimenten?

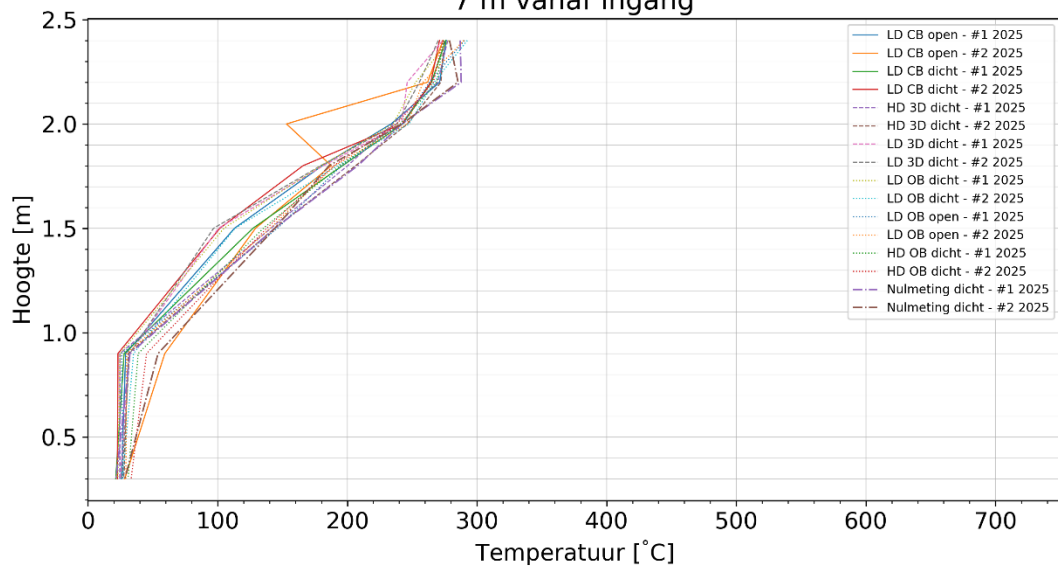
Bijlage 4 Herhaalbaarheid

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 van de rooklaag vergelijkbaar zijn. Er zijn wel duidelijke verschillen te zien tussen de meetlocaties in de gang. Zo zijn de temperaturen dicht bij de vuurhaard hoger, waardoor er ook meer variatie is in de temperatuurverdeling. In de tabel zijn de starttemperaturen ten opzichte van 2019 weergegeven.

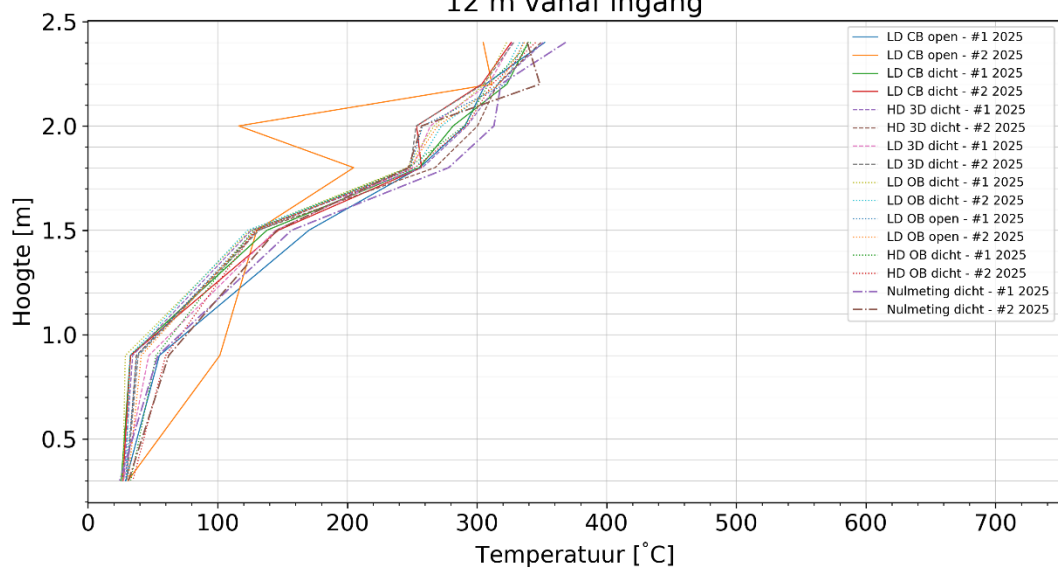
Hoogte / locatie	B1 (2m) [°C]		B2 (7m) [°C]		B3 (12m) [°C]		B4 (17m) [°C]	
Jaar	2025	2019	2025	2019	2025	2019	2025	2019
2.40 m	220 ± 14	221 ± 15	278 ± 7	265 ± 24	338 ± 14	352 ± 26	470 ± 22	462 ± 30
2.20 m	215 ± 5	217 ± 13	266 ± 10	265 ± 28	314 ± 10	339 ± 16	438 ± 22	478 ± 34
2.00 m	199 ± 8	206 ± 14	236 ± 21	219 ± 25	269 ± 42	317 ± 34	418 ± 22	449 ± 37
1.80 m	161 ± 8	160 ± 19	191 ± 11	202 ± 23	250 ± 14	267 ± 23	330 ± 26	393 ± 40
1.50 m	108 ± 11	105 ± 19	126 ± 17	122 ± 14	135 ± 13	145 ± 18	196 ± 26	259 ± 32
0.90 m	56 ± 13	42 ± 10	34 ± 10	29 ± 7	47 ± 17	39 ± 13	62 ± 12	53 ± 13
0.30 m	26 ± 3	23 ± 2	26 ± 3	23 ± 3	29 ± 3	28 ± 8	43 ± 3	46 ± 4



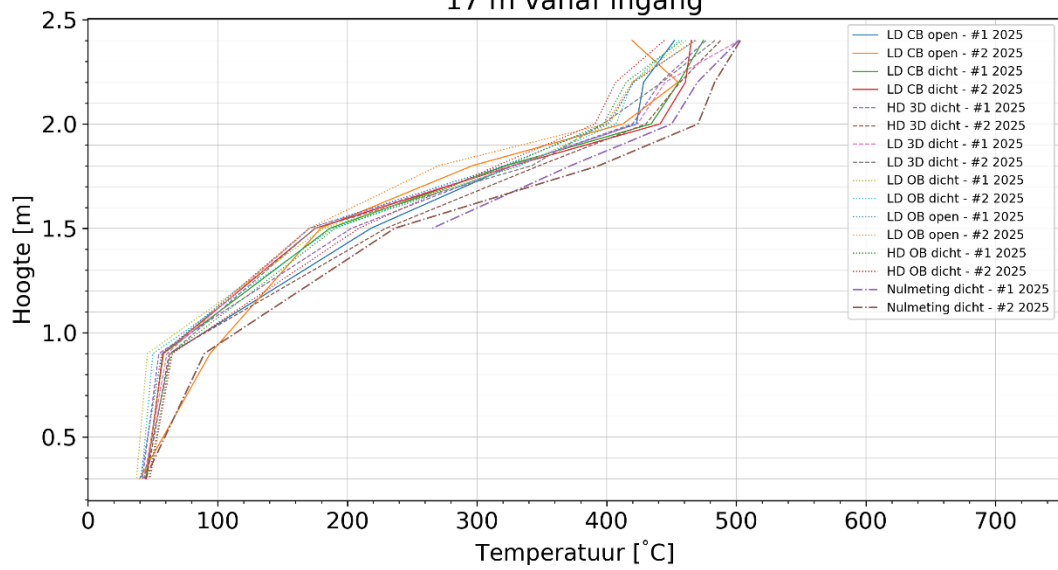
Temperatuurverdeling bij start inzet
7 m vanaf ingang



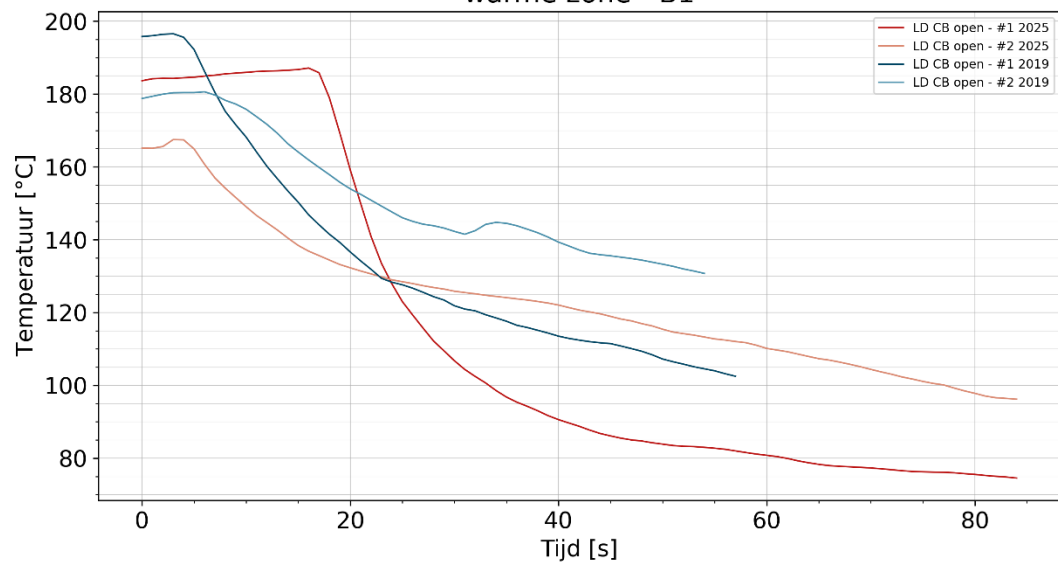
Temperatuurverdeling bij start inzet
12 m vanaf ingang



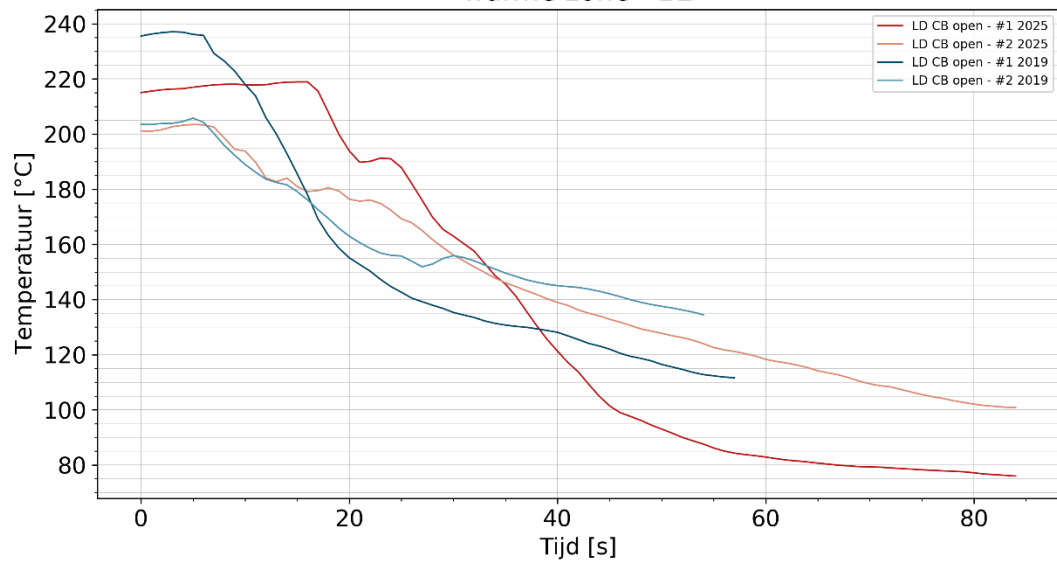
Temperatuurverdeling bij start inzet
17 m vanaf ingang



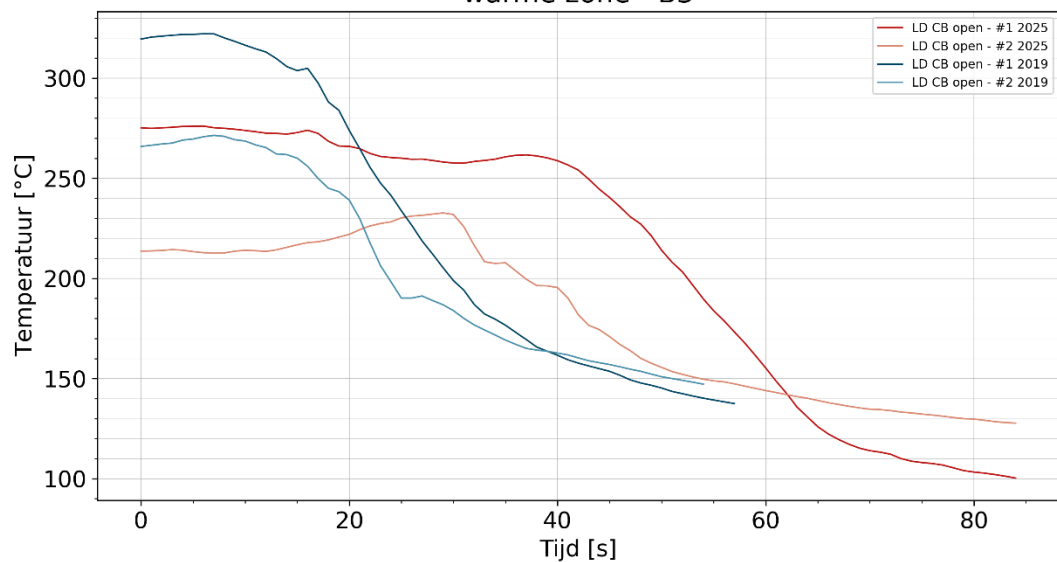
Temperatuurverloop tijdens vorderen
warme zone - B1



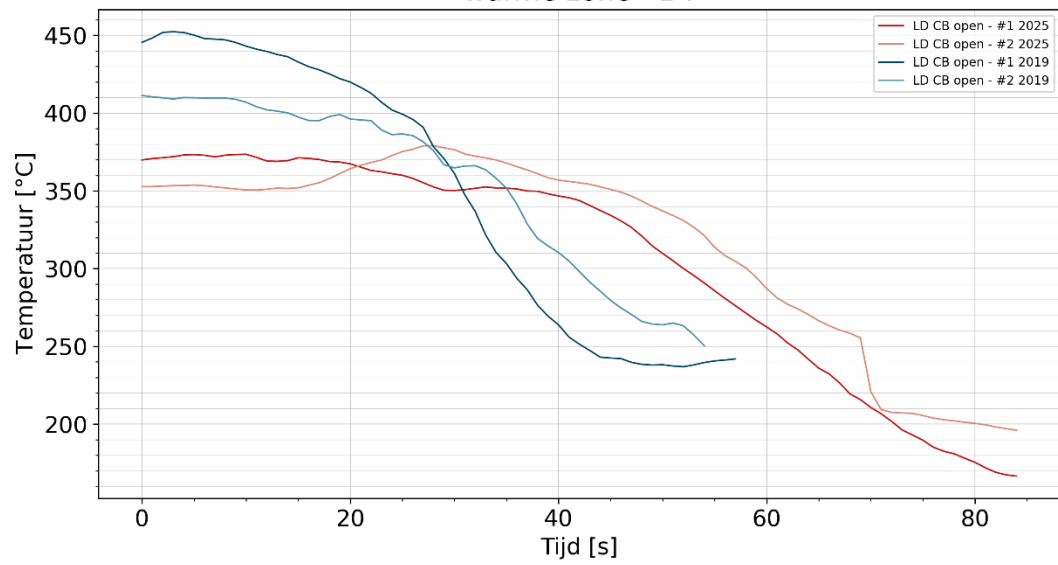
Temperatuurverloop tijdens vorderen
warme zone - B2



Temperatuurverloop tijdens vorderen
warme zone - B3

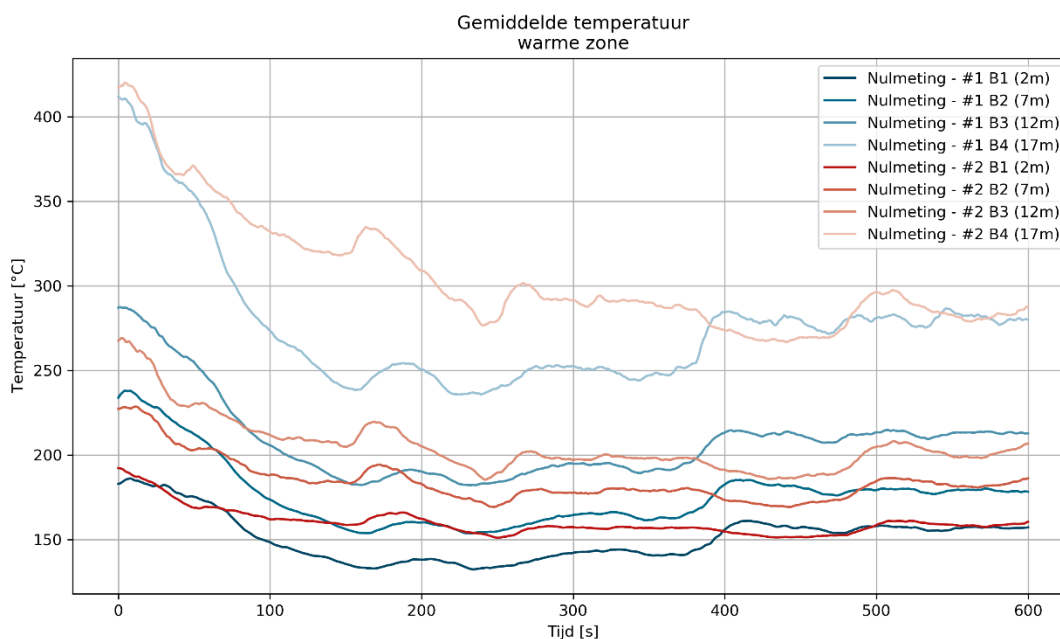


Temperatuurverloop tijdens vorderen warme zone - B4



Bijlage 5 Nulmeting

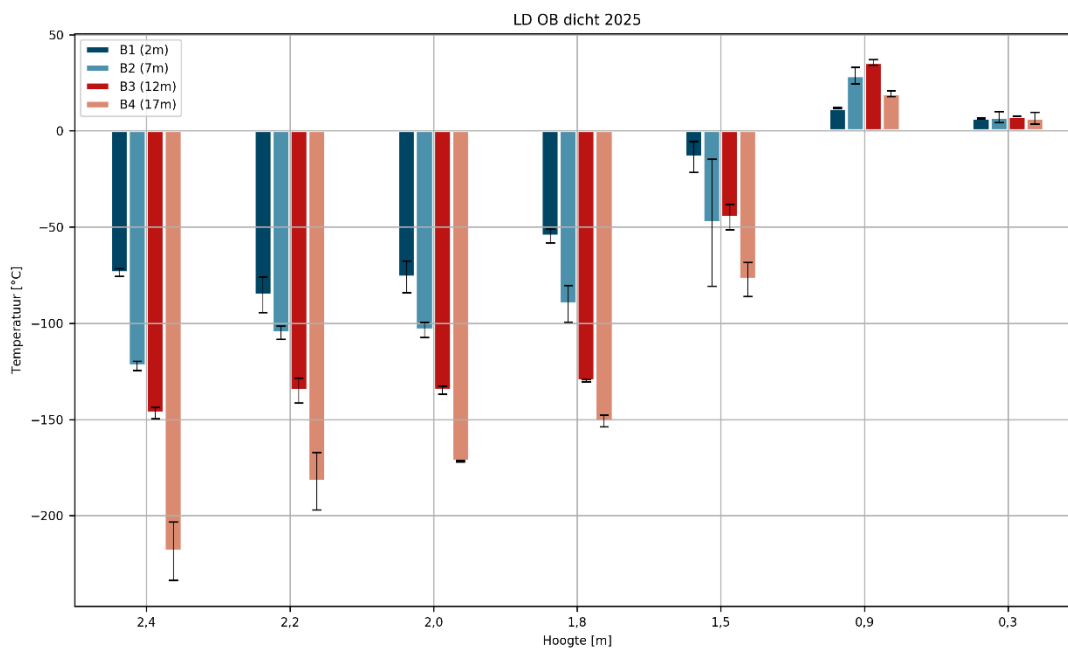
Om te bepalen of de gemeten effecten veroorzaakt zijn door de verschillende inzet-technieken, zijn twee nulmetingen uitgevoerd. Het doel van de nulmetingen was om vast te stellen wat het resultaat is wanneer er geen rookgaskoeling plaatsvindt, maar enkel de deur wordt gesloten. In lijn met de verwachting daalt de temperatuur en neemt daarmee de energie tijdens de nulmeting overal af, waarna een stabiele situatie ontstaat en de temperatuur nagenoeg constant blijft.

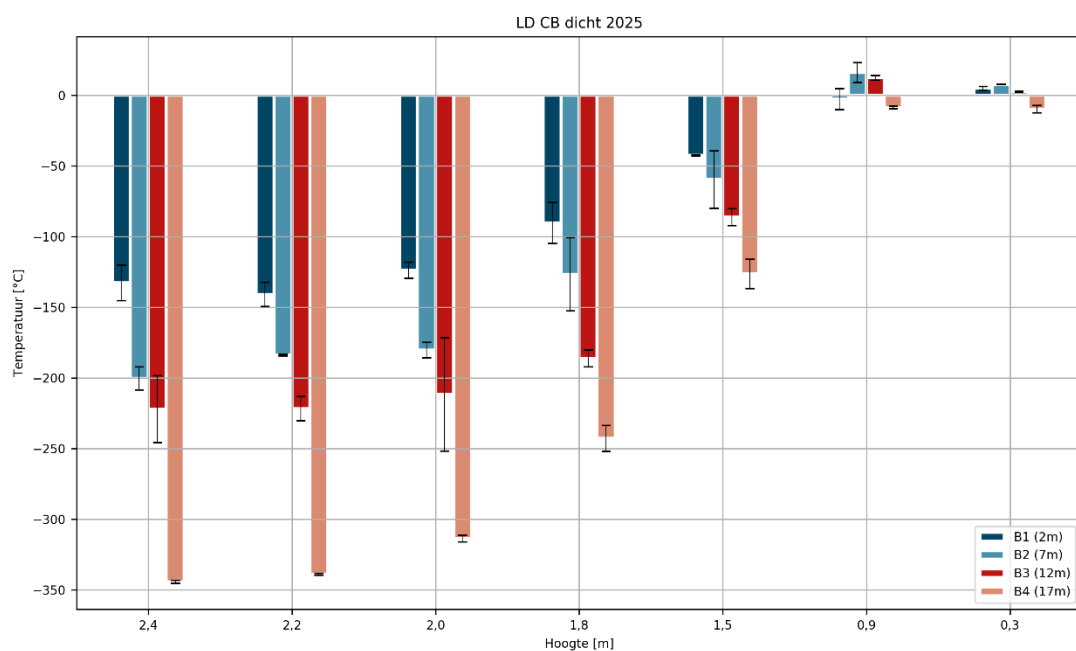
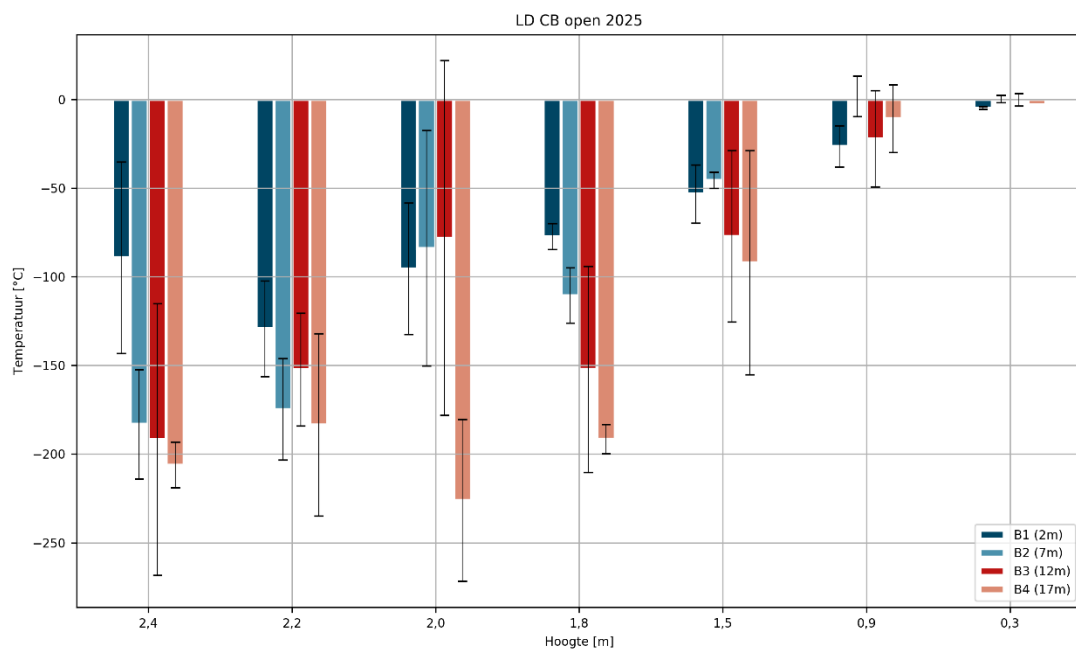


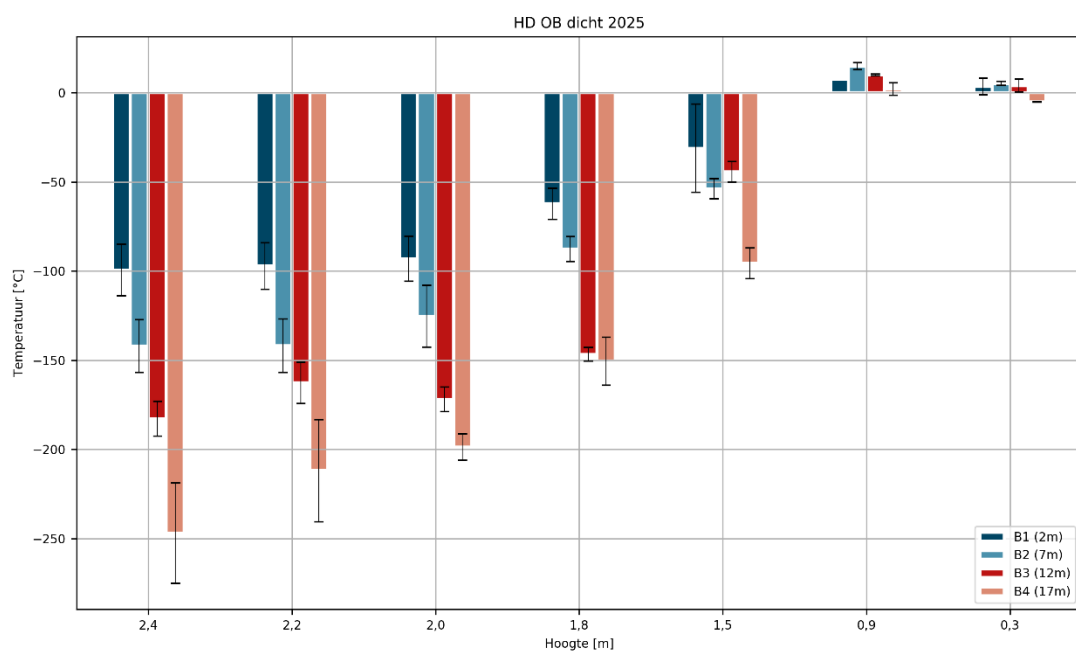
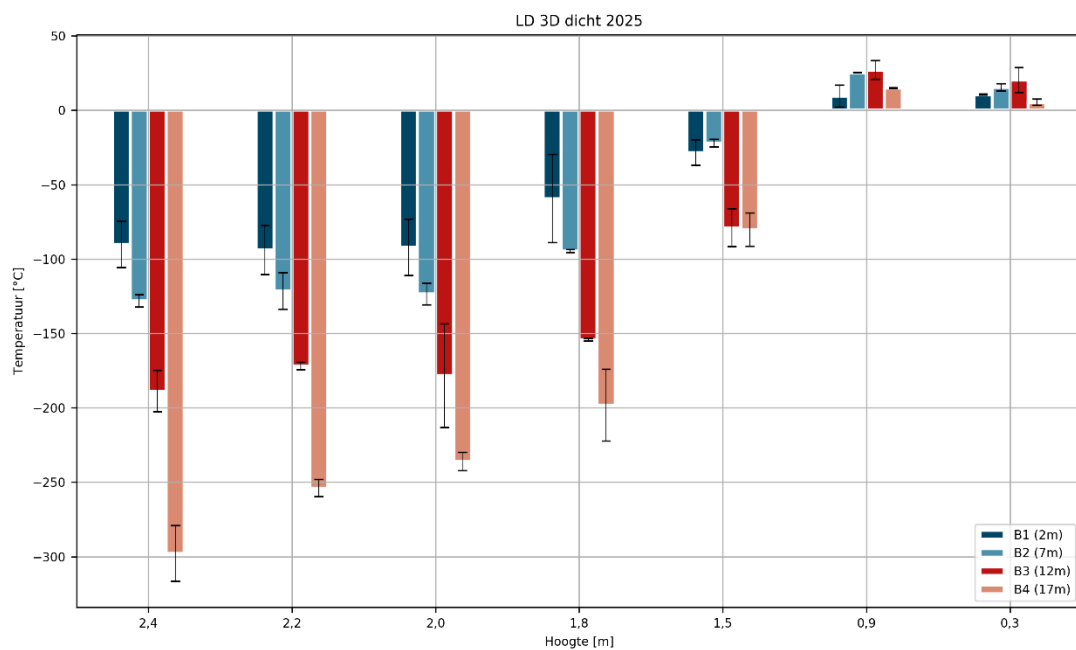
Bijlage 6 Temperatuur

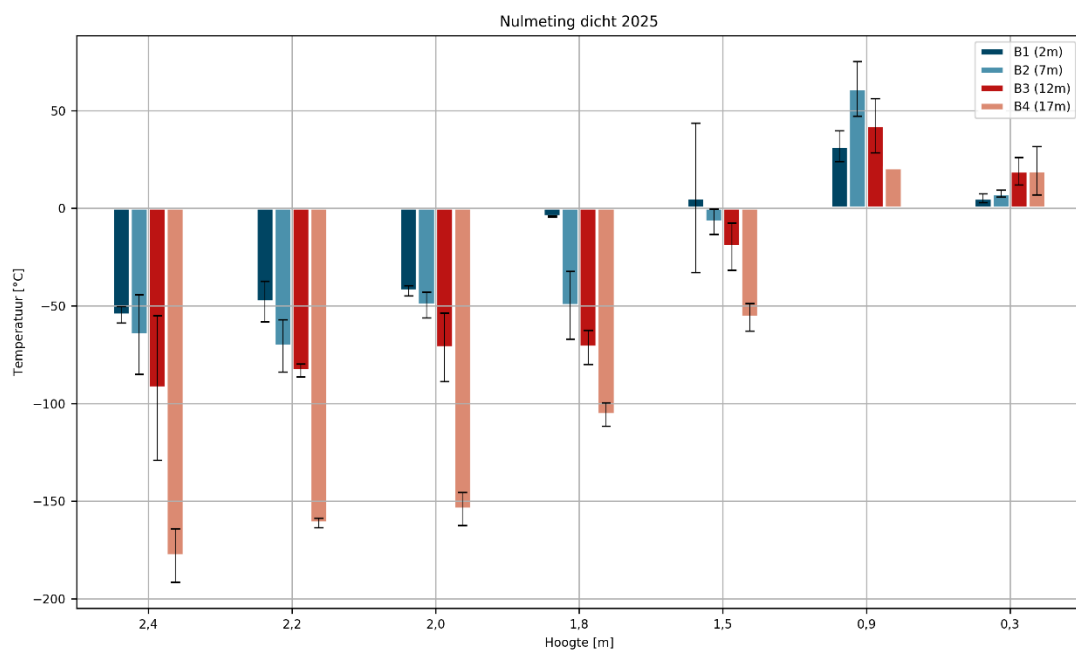
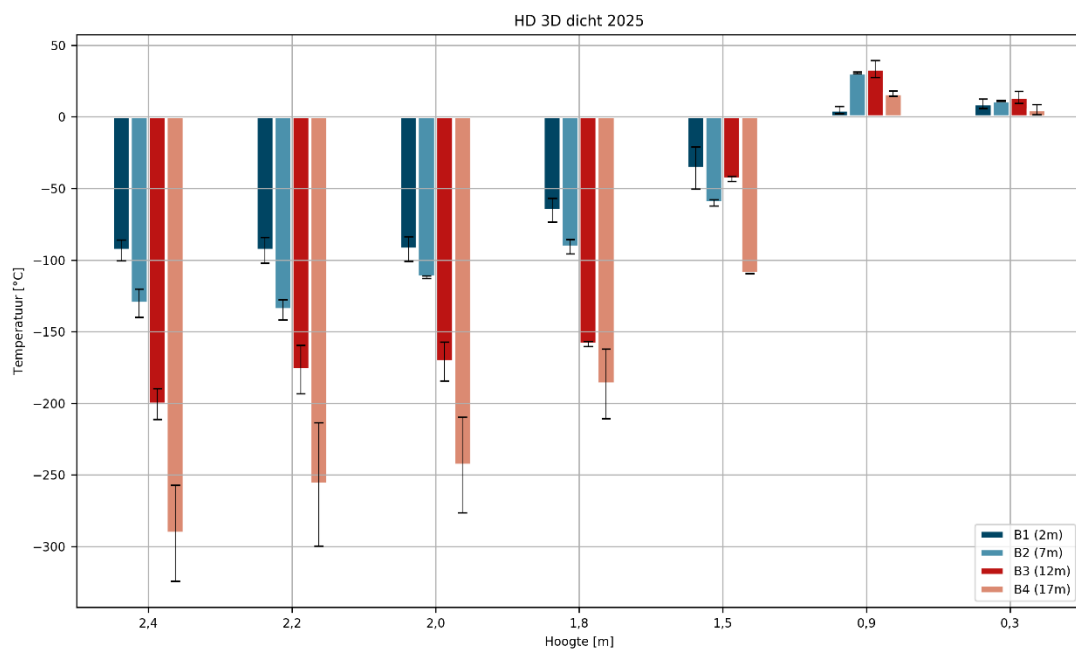
Tabel 6.1. Gemiddelde temperatuurverandering deur dicht

	2,40m	2,20m	2,00m	1,80m	1,50m	0,90m	0,30m
HD 3D dicht 2025	-179 ± 15	-165 ± 19	-155 ± 14	-125 ± 10	-62 ± 5	21 ± 3	10 ± 3
HD OB dicht 2025	-168 ± 17	-153 ± 17	-147 ± 11	-112 ± 8	-56 ± 11	9 ± 2	2 ± 2
LD 3D dicht 2025	-176 ± 13	-160 ± 10	-158 ± 17	-126 ± 14	-53 ± 9	19 ± 4	13 ± 3
LD CB dicht 2025	-225 ± 11	-221 ± 5	-207 ± 13	-162 ± 14	-79 ± 9	4 ± 4	1 ± 1
LD OB dicht 2025	-140 ± 6	-127 ± 9	-122 ± 4	-106 ± 4	-46 ± 14	24 ± 2	7 ± 2
Nulmeting 2025	-97 ± 19	-91 ± 7	-79 ± 9	-58 ± 8	-19 ± 16	39 ± 12	13 ± 6









Tabel 6.2. Energieverandering warme zone deur dicht

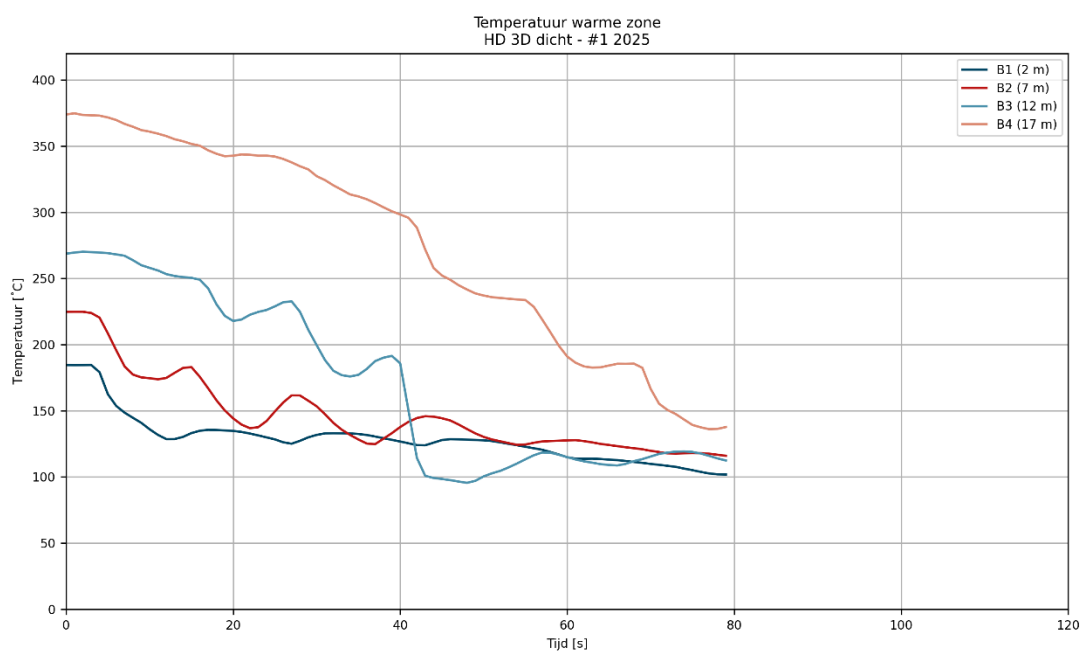
Warme zone	B1 [kJ]	B2 [kJ]	B3 [kJ]	B4 [kJ]
HD 3D dicht 2025	-64 ± 8	-98 ± 8	-132 ± 14	-257 ± 30
HD OB dicht 2025	-60 ± 13	-94 ± 10	-121 ± 3	-215 ± 15
LD 3D dicht 2025	-58 ± 12	-86 ± 2	-133 ± 5	-252 ± 3
LD CB dicht 2025	-83 ± 9	-129 ± 9	-158 ± 1	-322 ± 1
LD OB dicht 2025	-48 ± 4	-82 ± 6	-103 ± 1	-190 ± 3
Nulmeting dicht 2025	-22 ± 3	-41 ± 9	-58 ± 8	-155 ± 2

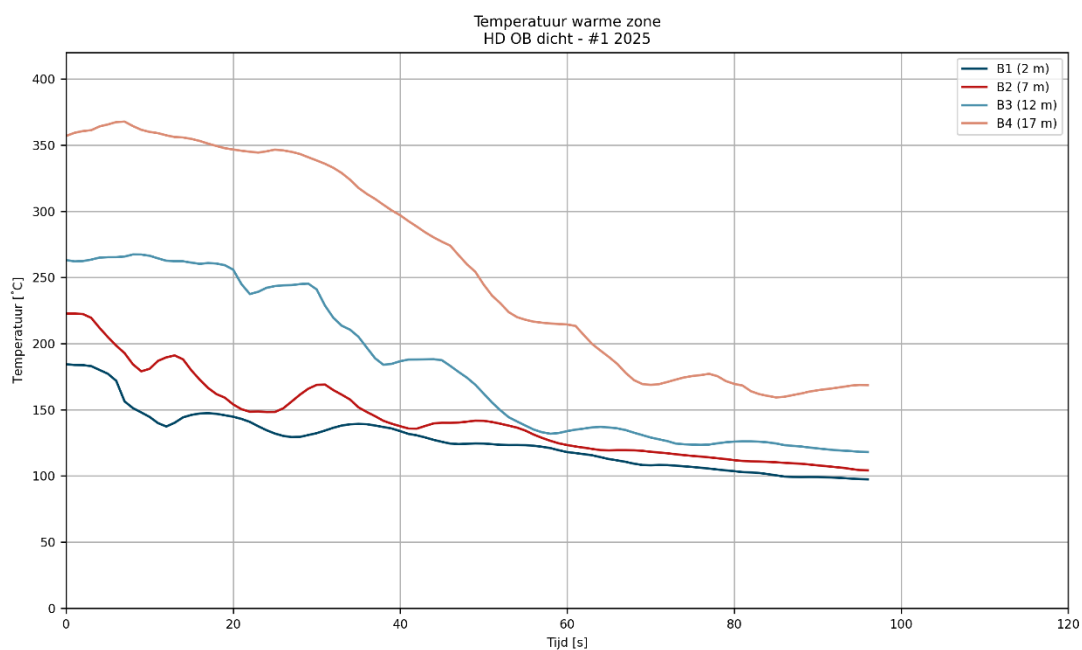
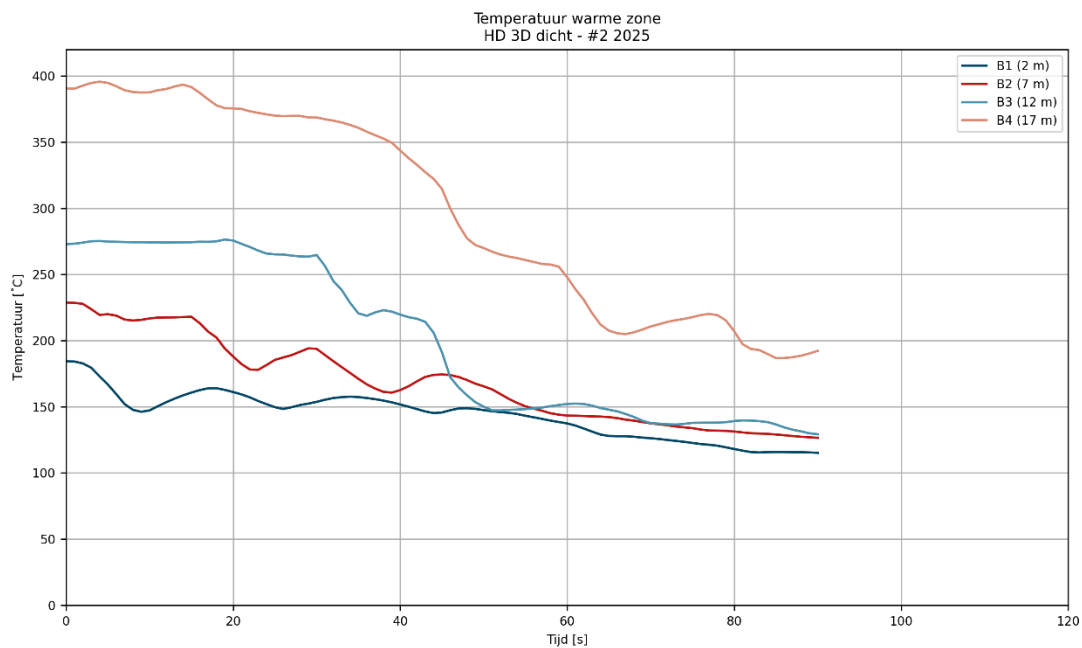
Tabel 6.3 Energieverandering koude zone deur dicht

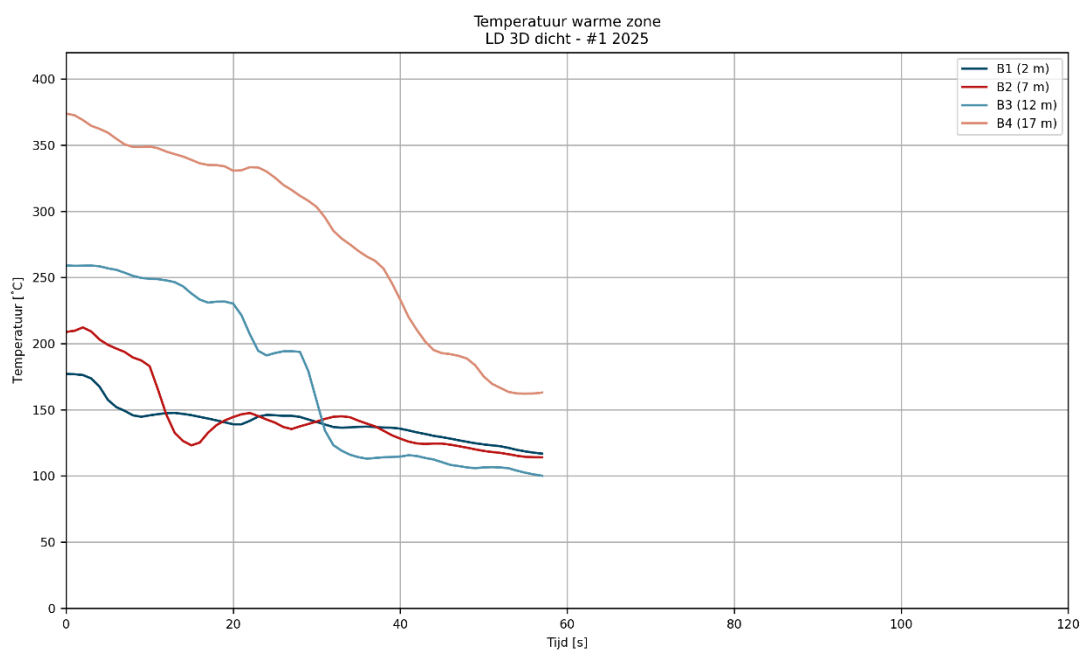
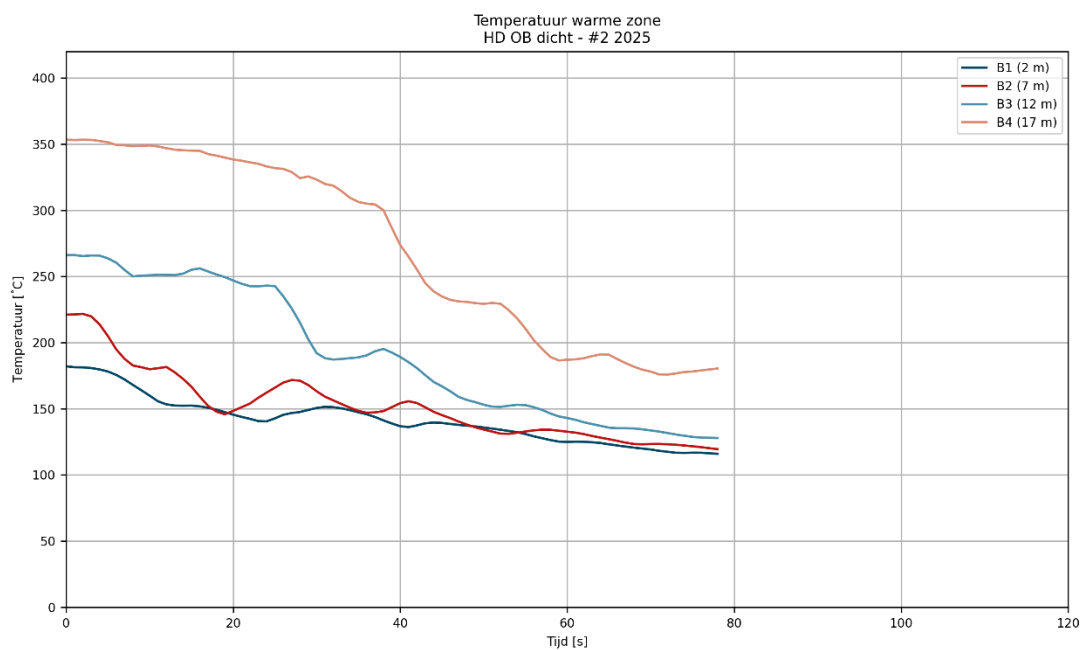
Koude zone	B1 [kJ]	B2 [kJ]	B3 [kJ]	B4 [kJ]
HD 3D dicht 2025	4 ± 1	17 ± 5	17 ± 2	4 ± 2
HD OB dicht 2025	3 ± 3	9 ± 2	5 ± 2	-2 ± 2
LD 3D dicht 2025	7 ± 2	16 ± 1	18 ± 6	7 ± 1
LD CB dicht 2025	1 ± 4	9 ± 2	6 ± 1	-5 ± 3
LD OB dicht 2025	6 ± 0	14 ± 3	17 ± 1	9 ± 1
Nulmeting dicht 2025	13 ± 2	27 ± 5	24 ± 3	11 ± 6

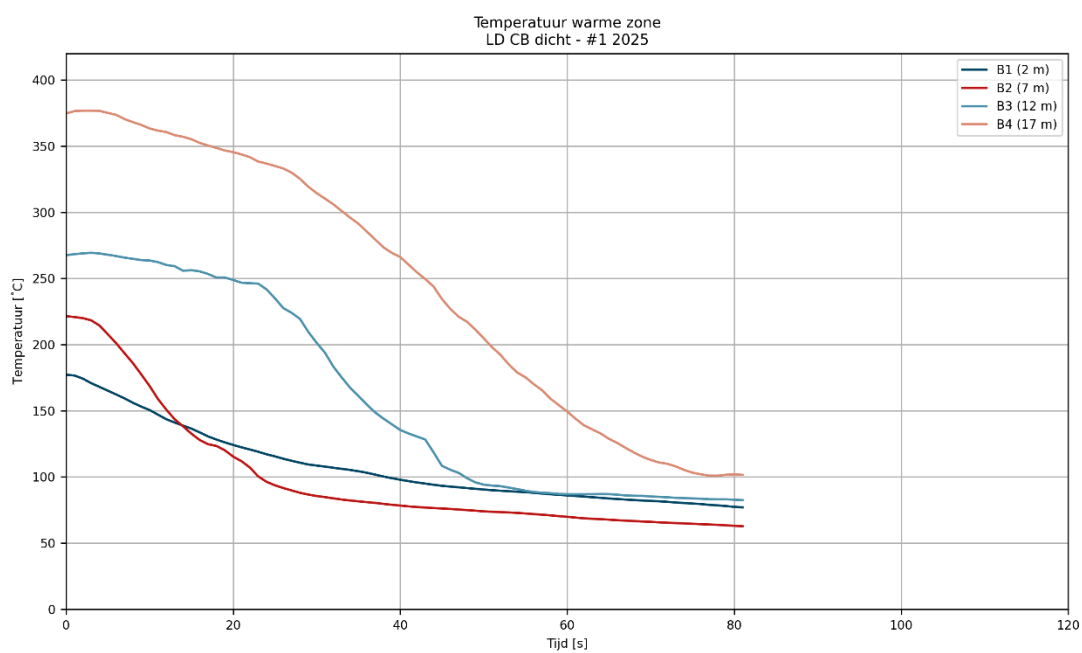
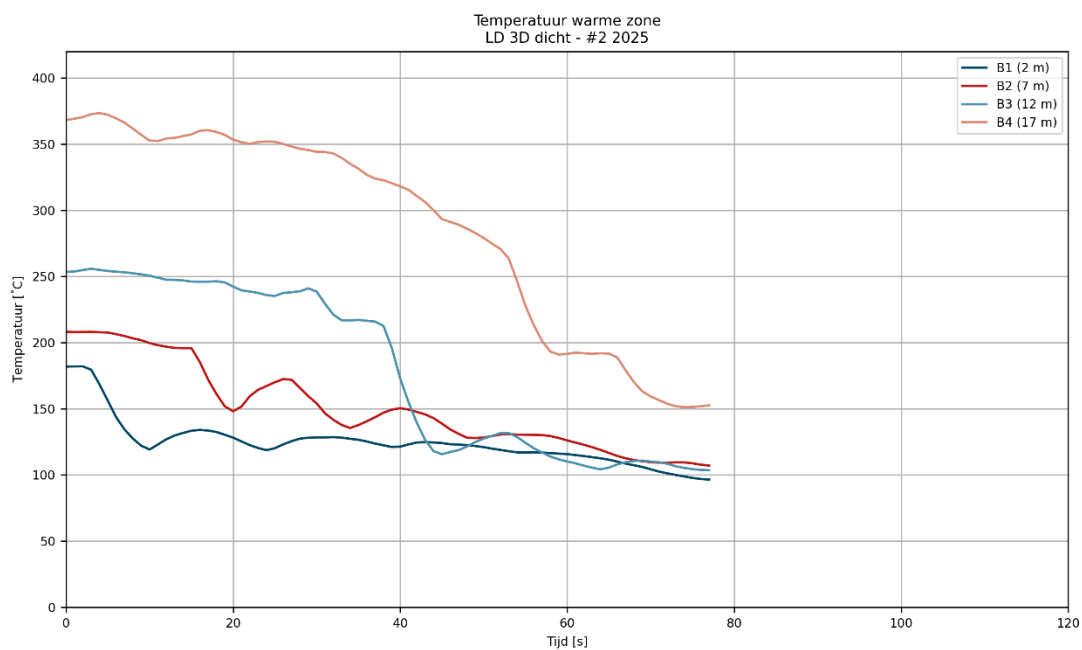
Bijlage 7 Voorwaartse en achterwaartse koeling

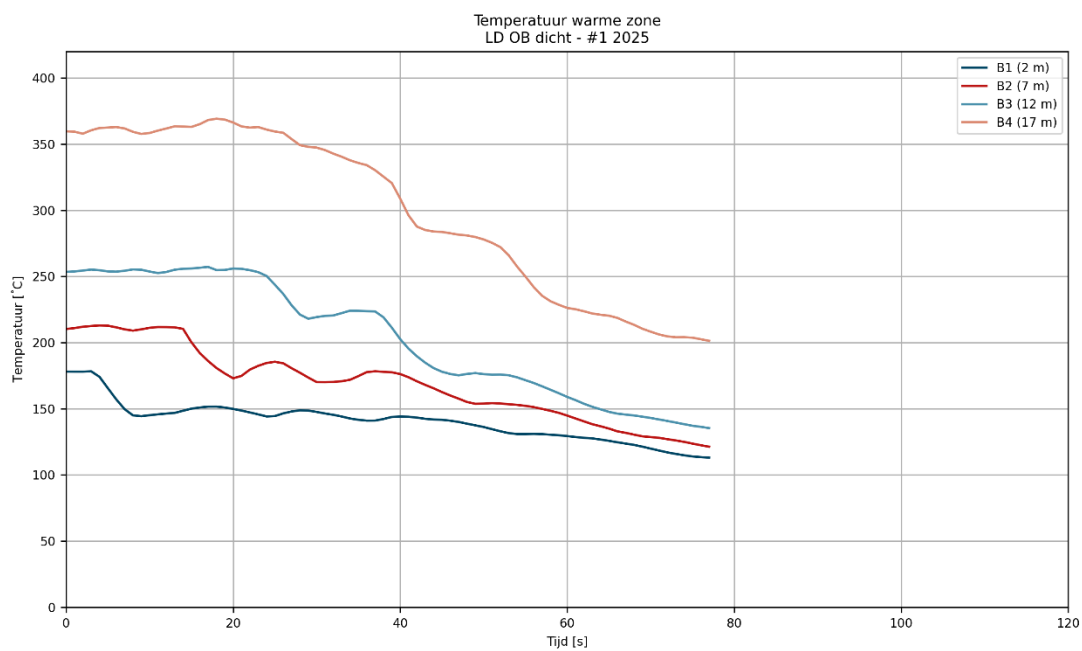
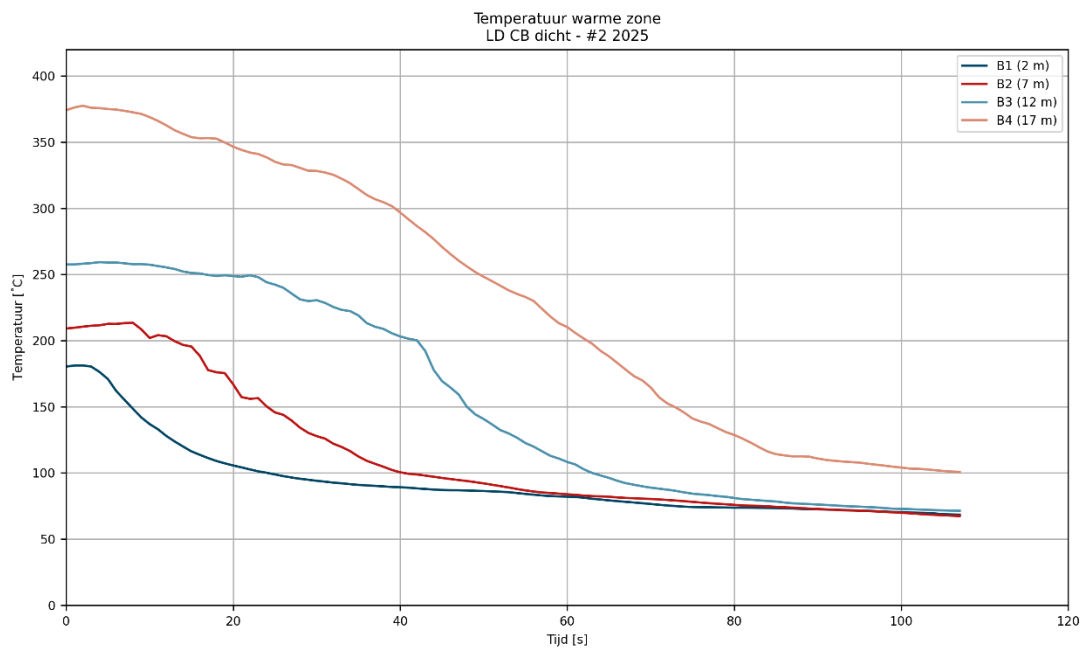
Deur dicht	Voorwaartse koeling	Achterwaartse koeling
HD 3D-pulsmethode	9 m	> 17 m
HD onderbroken boogmethode	9 m	> 17 m
LD 3D-pulsmethode	6 m	> 17 m
LD continue boogmethode	17 m	> 17 m
LD onderbroken boogmethode	9 m	> 17 m

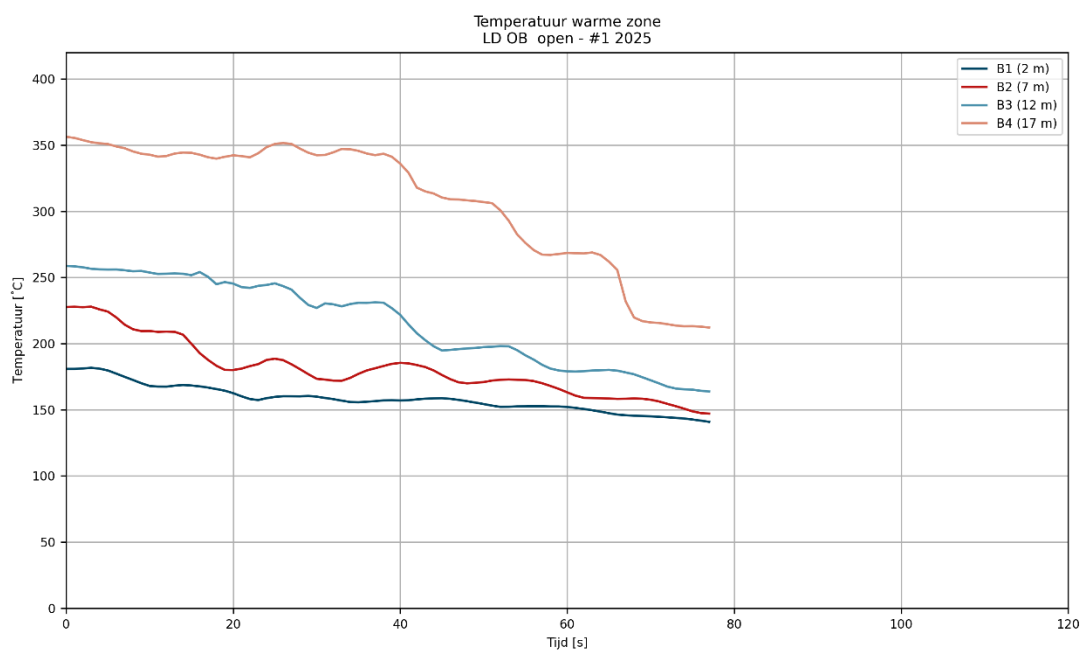
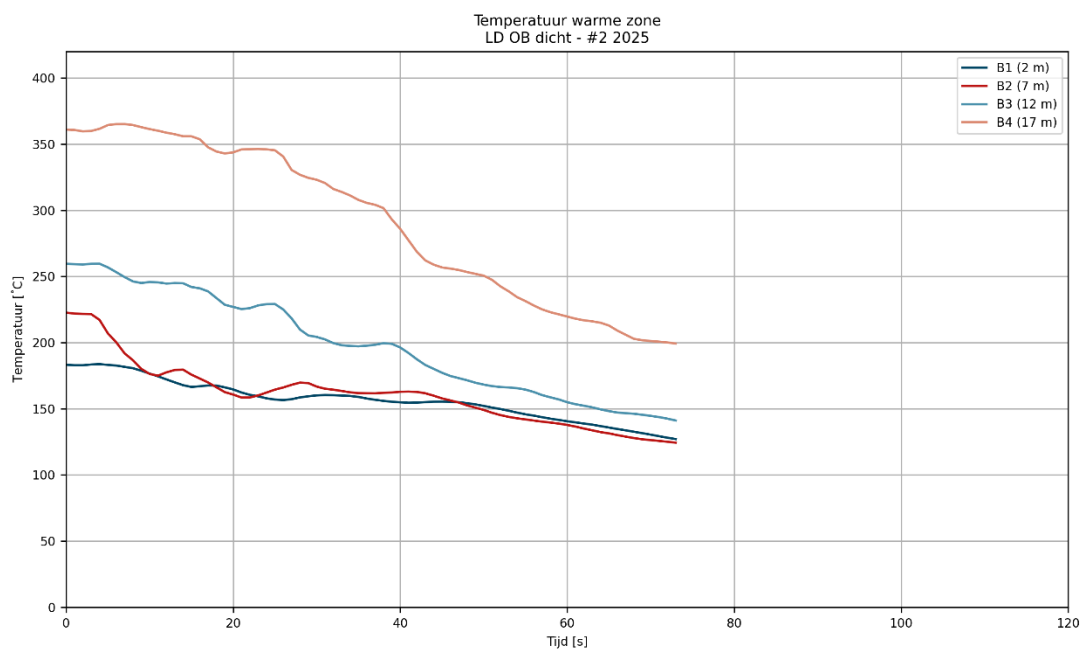


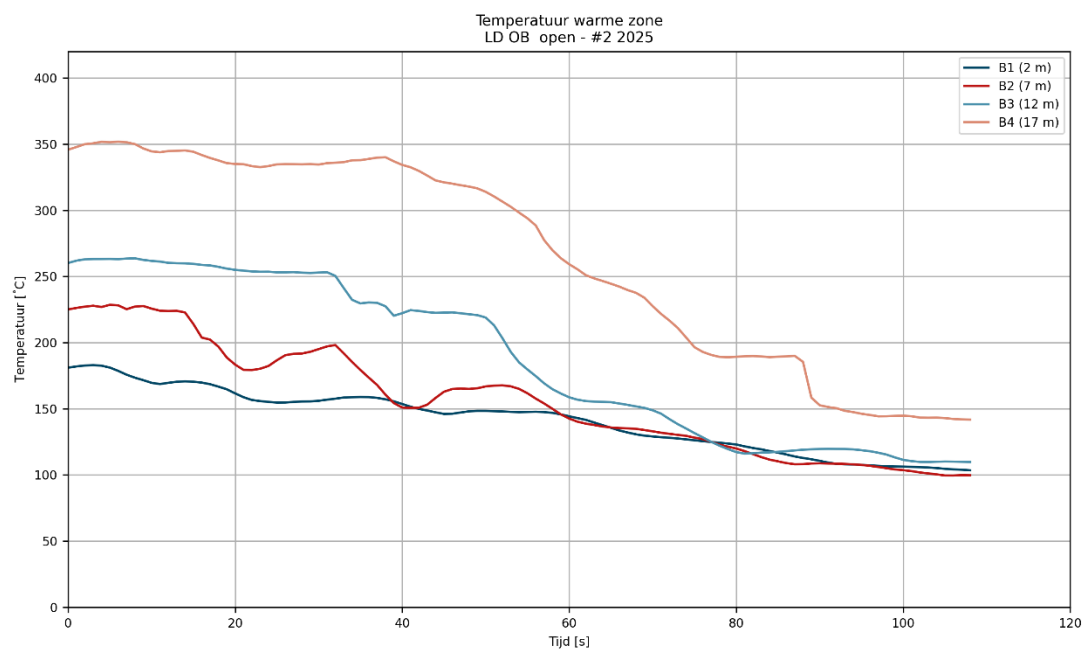












Bijlage 8 Veiligheid

brandweerpersoneel

Voor de veiligheid van brandweerpersoneel is gebruikgemaakt 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/m² gedurende 20 minuten
- > Maximale stralingsbelasting van 4,6 kW/m² gedurende 5 minuten.

Met deze twee punten is 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/m² 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:

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

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

Hieruit volgt dat:

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

De dosis op tijdstip T wordt dan berekend middels:

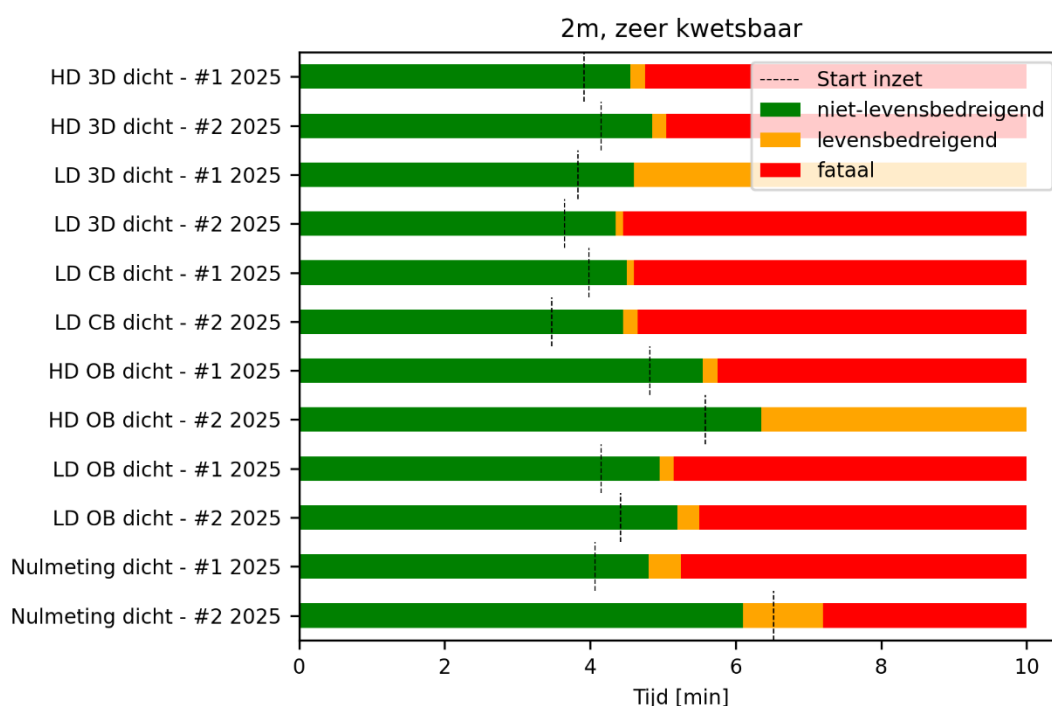
$$FED_{heat} = \sum_{t_i}^{t_2} \frac{1}{t_{irad}} \Delta t$$

Bijlage 9 Veiligheid slachtoffers

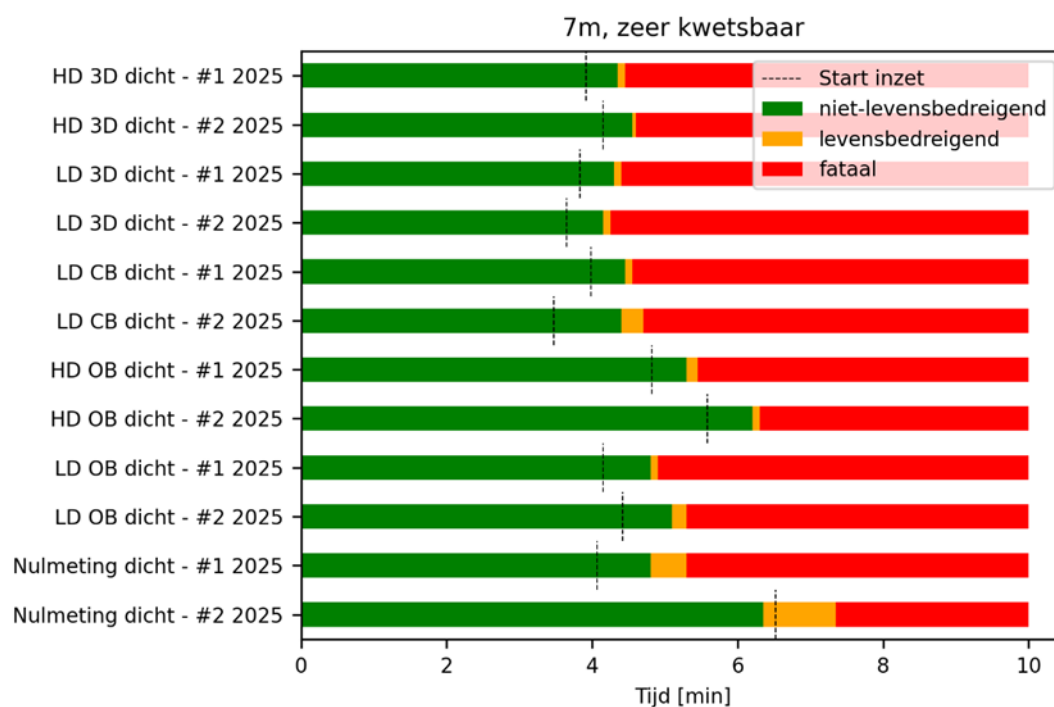
In deze bijlage zijn voor alle experimenten alle methoden voor het berekenen van de veiligheid voor slachtoffers uit het SFPE-handboek (Purser & McAllister, 2016) weergegeven en ook de grafieken van de meetwaarden voor gassen.

Groep zeer kwetsbaar

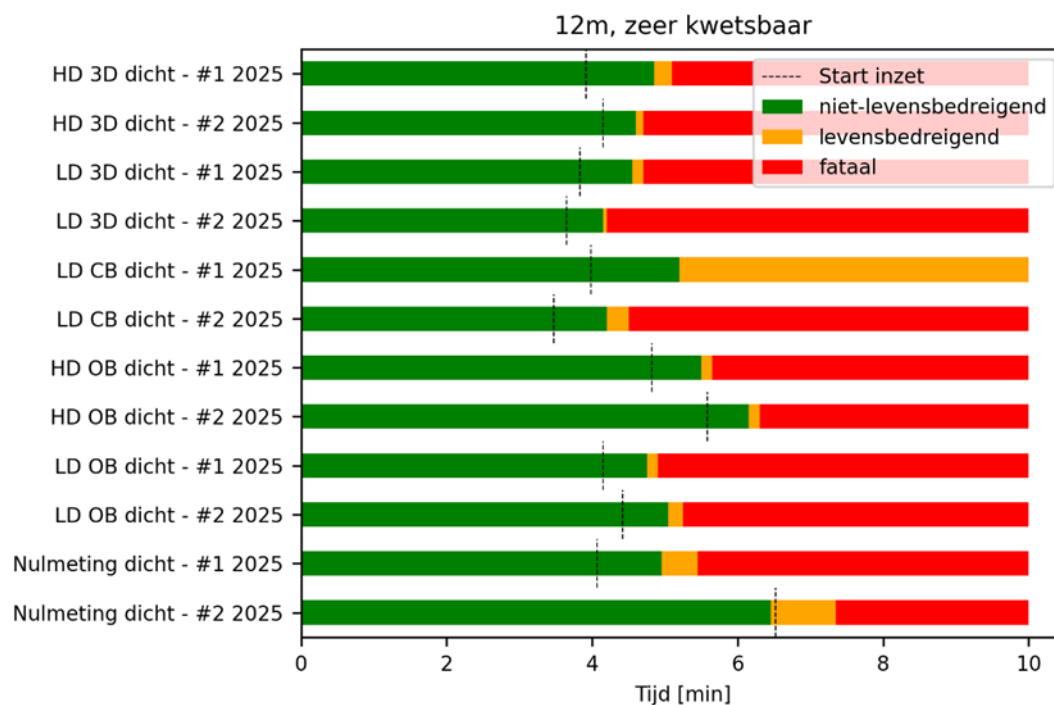
Voor de zeer kwetsbare groep verslechteren de overlevingscondities op 2 m in de gang bij elke inzet en de nulmetingen. Op den duur ontstaat bij elk experiment een fatale situatie, behalve bij één experiment met de 3D-pulsmethode met LD en één experiment met de onderbroken boogmethode met HD. Daar verslechteren de overlevingscondities van niet-levensbedreigend naar levensbedreigend.



Ook op 7 m in de gang verslechteren bij elke inzet de overlevingscondities voor de zeer kwetsbare groep. Na verloop van tijd ontstaat bij elk experiment een fatale situatie.

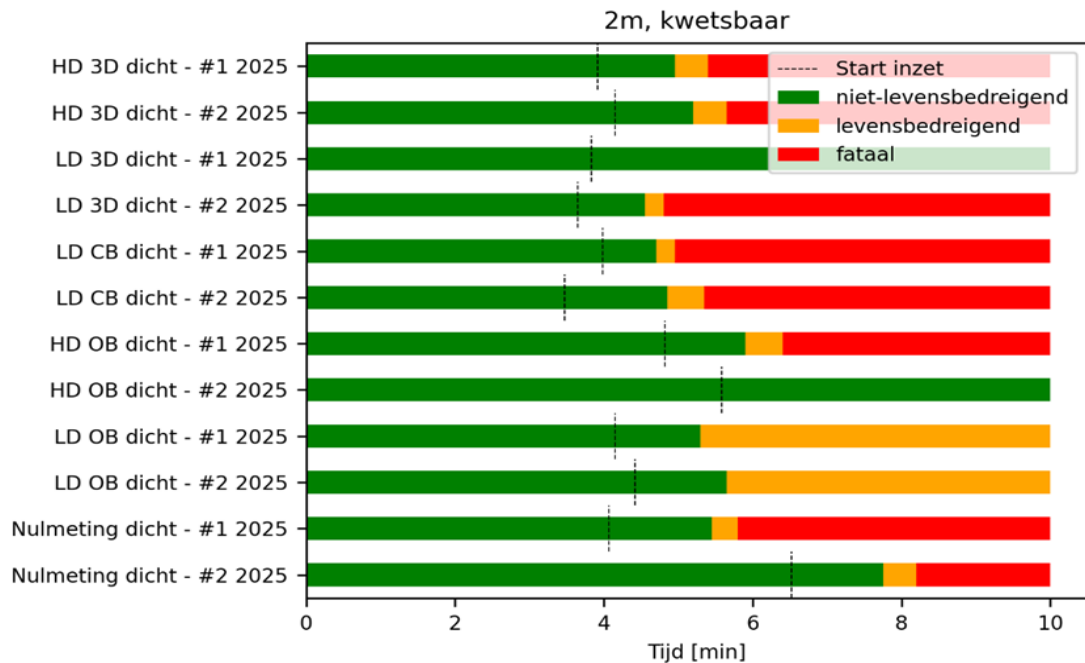


De overlevingscondities voor de zeer kwetsbare groep op 12 m in de gang verslechteren bij elke inzet en de nulmetingen. Bij elk experiment ontstaat uiteindelijk een fatale situatie, behalve bij één experiment met de continue boogmethode met LD. Daar verslechteren de overlevingscondities van niet-levensbedreigend naar levensbedreigend.

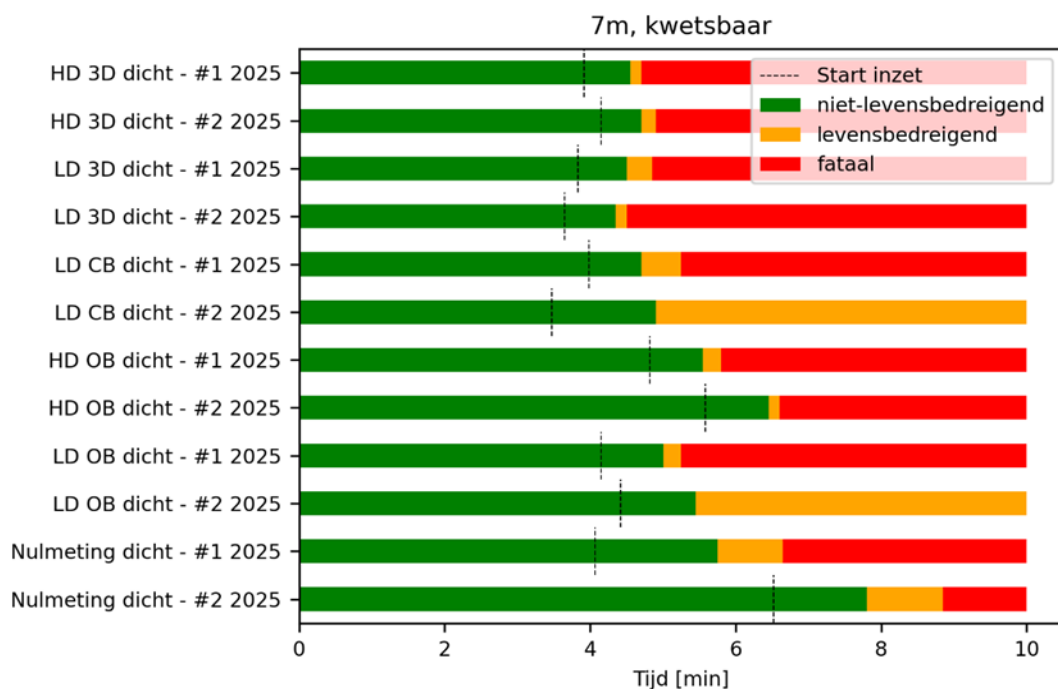


Groep kwetsbaar

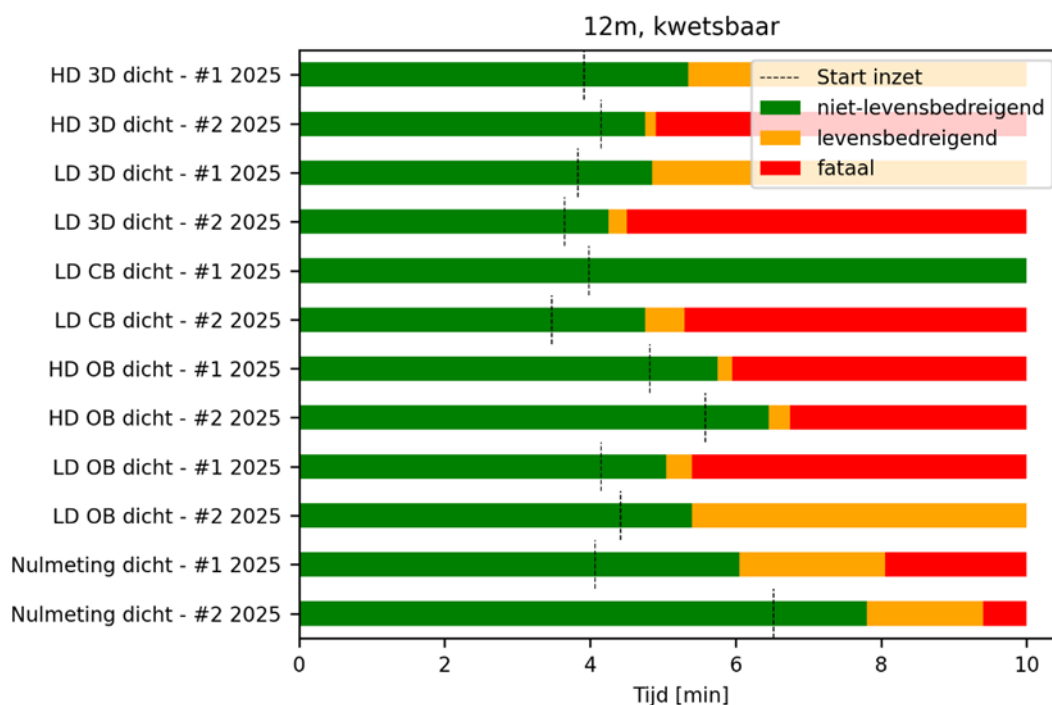
Bij de nulmetingen en acht van de tien experimenten verslechteren de overlevingscondities voor slachtoffers in de kwetsbare groep op 2 m in de gang. Bij deze experimenten ontstaat op den duur een fatale situatie, behalve bij de experimenten met de onderbroken boogmethode LD. Daar ontstaat geen fatale situatie, maar wel een levensbedreigende situatie. Bij één experiment met onderbroken boogmethode HD en één experiment met 3D-pulsmethode LD is er sprake van een overleefbare situatie voor kwetsbare slachtoffers.



De overlevingscondities op 7 m in de gang zien er minder goed uit. Op twee experimenten na ontstaat uiteindelijk overal een fatale situatie. Bij één experiment met de onderbroken boogmethode LD en één experiment met de continue boogmethode LD ontstaat een levensbedreigende situatie.

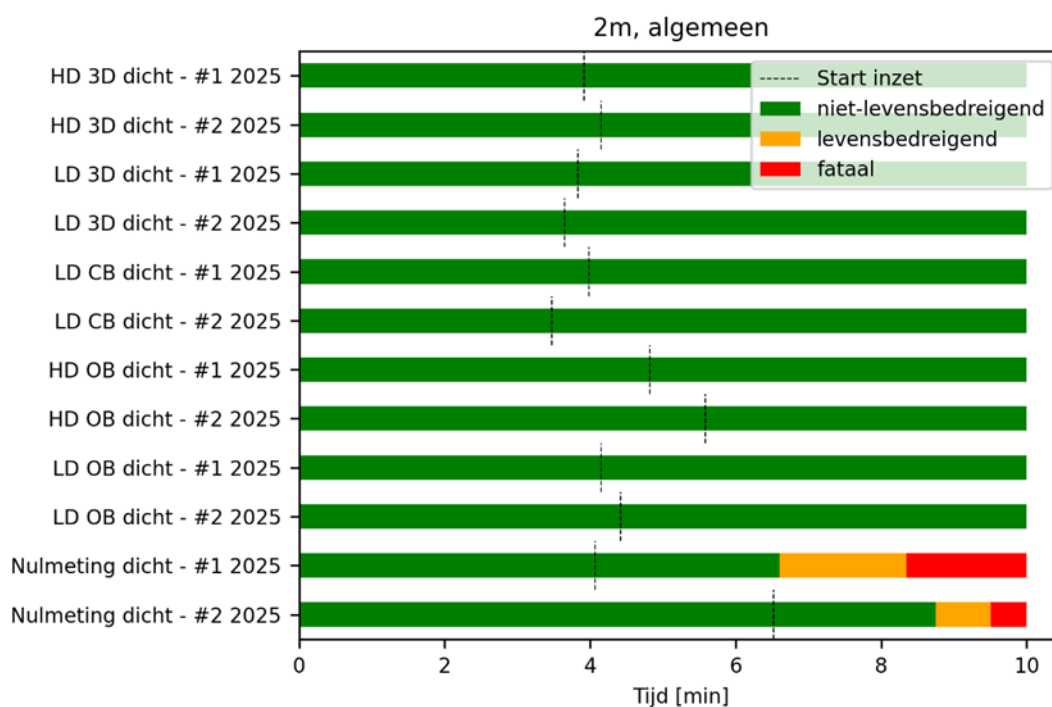


Bij de nulmetingen en zes van de tien experimenten wordt de fatale grenswaarde uiteindelijk overschreden op 12 m in de gang. Bij drie experimenten wordt de grenswaarde voor een levensbedreigende situatie overschreden. Bij één experiment met de continue boogmethode LD is er nog een overleefbare situatie voor kwetsbare slachtoffers.

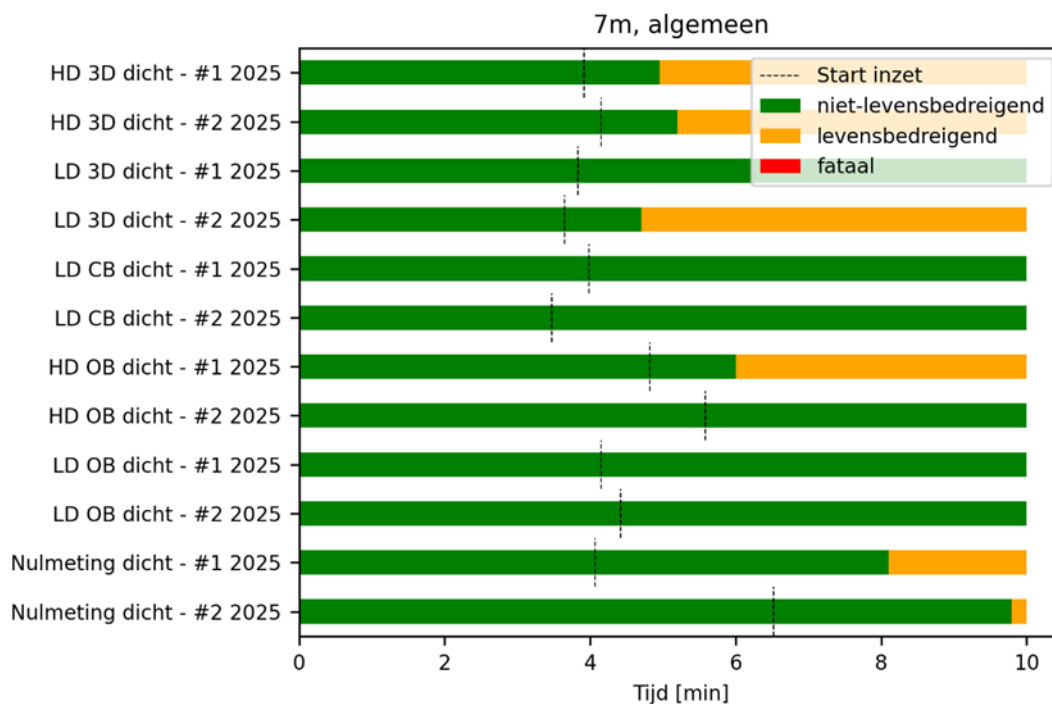


Groep algemeen

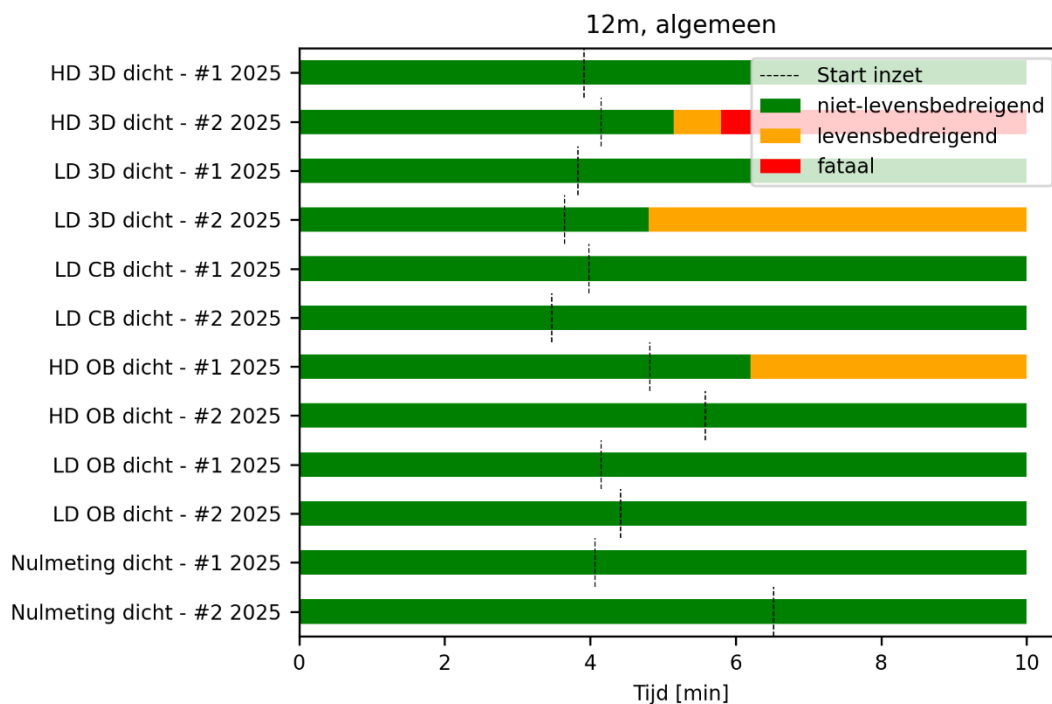
Bij de algemene groep wordt alleen bij de nulmetingen op 2 m in de gang de fatale grenswaarde overschreden, waarschijnlijk omdat de rooklaag hier het eerste daalt. Bij de experimenten waarbij een inzet is gedaan, blijft de situatie overleefbaar.



Op 7 m in de gang ontstaat bij de nulmetingen en vier van de tien experimenten een levensbedreigende situatie. Bij zes experimenten zijn de condities overleefbaar

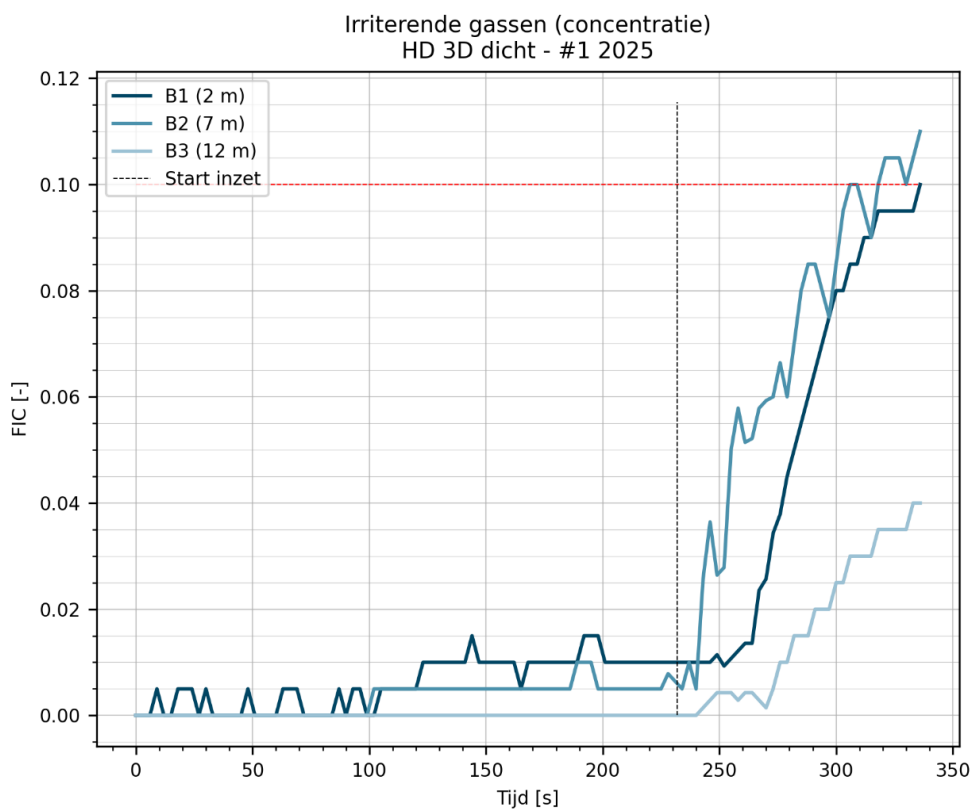
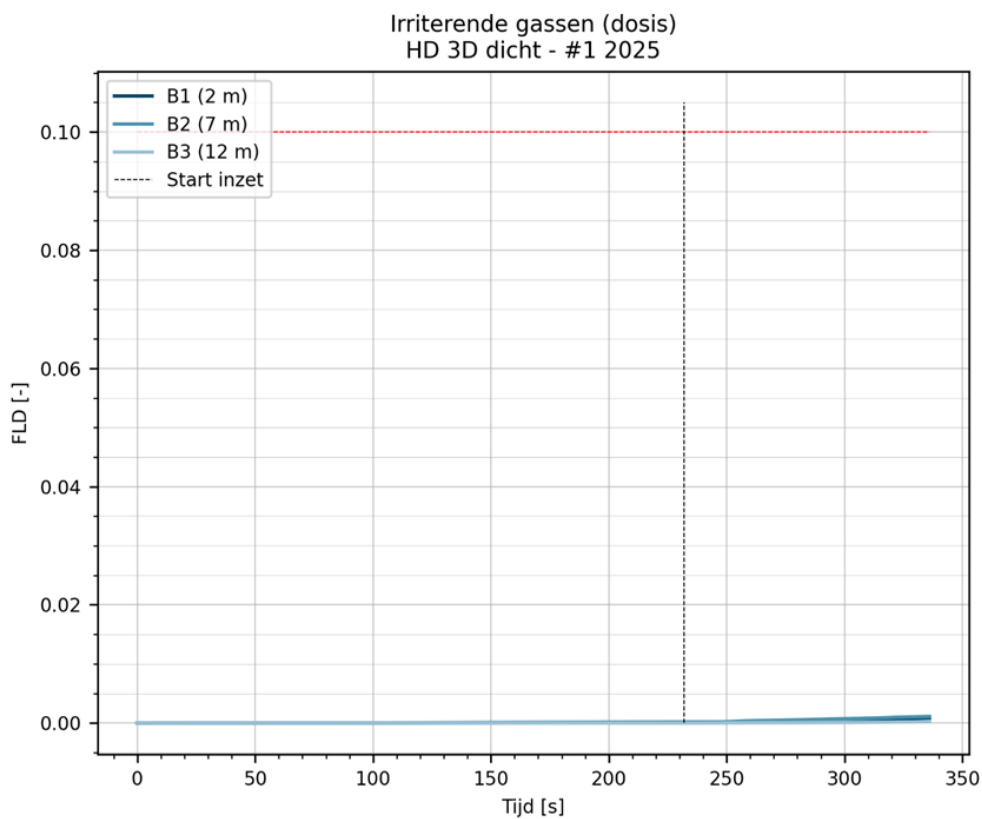


Zowel bij de nulmetingen als bij zeven experimenten blijft de situatie voor slachtoffers op 12 m in de gang overleefbaar. Alleen bij één experiment met de 3D-pulsmethode HD wordt de fatale grenswaarde overschreden. Bij twee experimenten wordt de grenswaarde voor levensbedreigend bereikt.

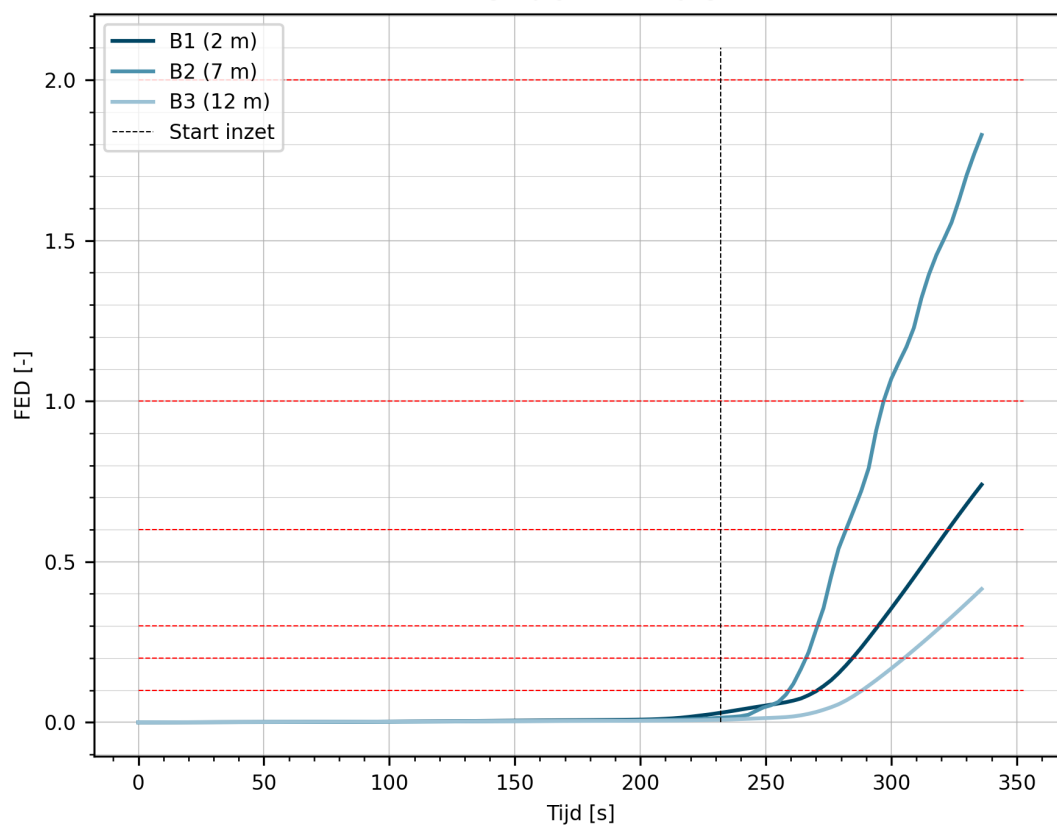


Resultaten gemeten gassen

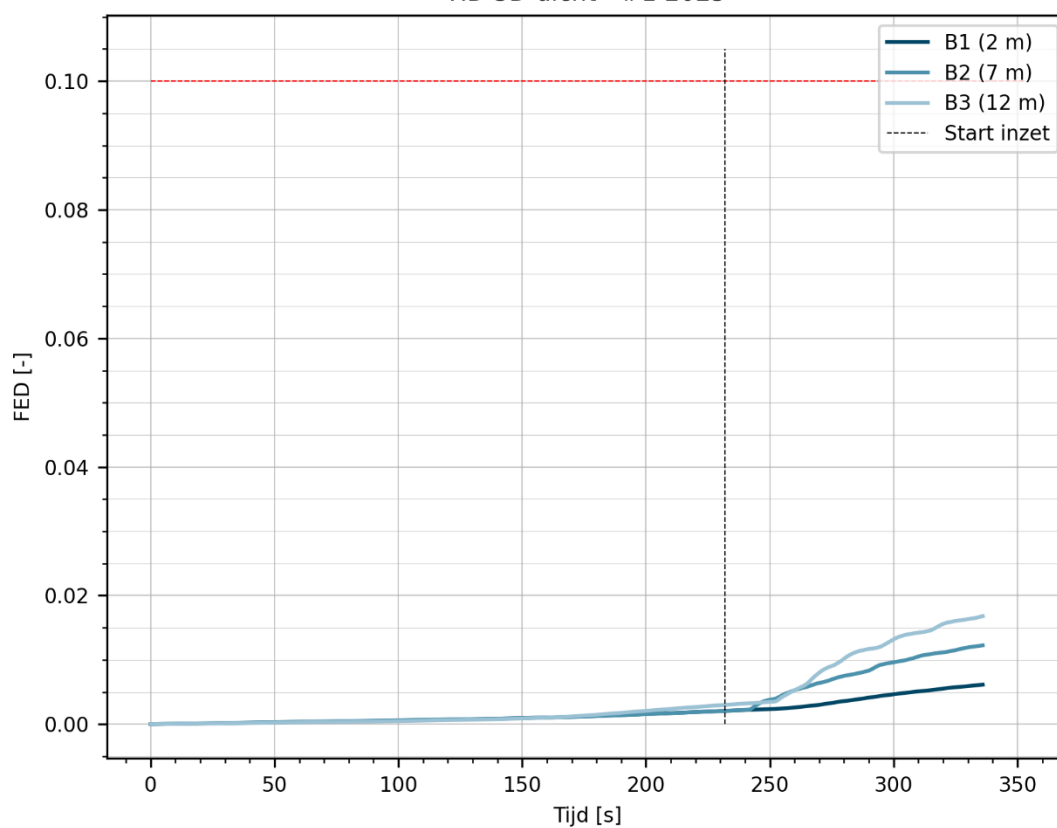
De rode horizontale stippellijnen geven de grenswaarden voor de verschillende groepen weer (zie ook Tabel 1.3 Overzicht van grenswaarden volgens het SFPE-handboek). De tijd begint bij het ontsteken van de brandhaard.



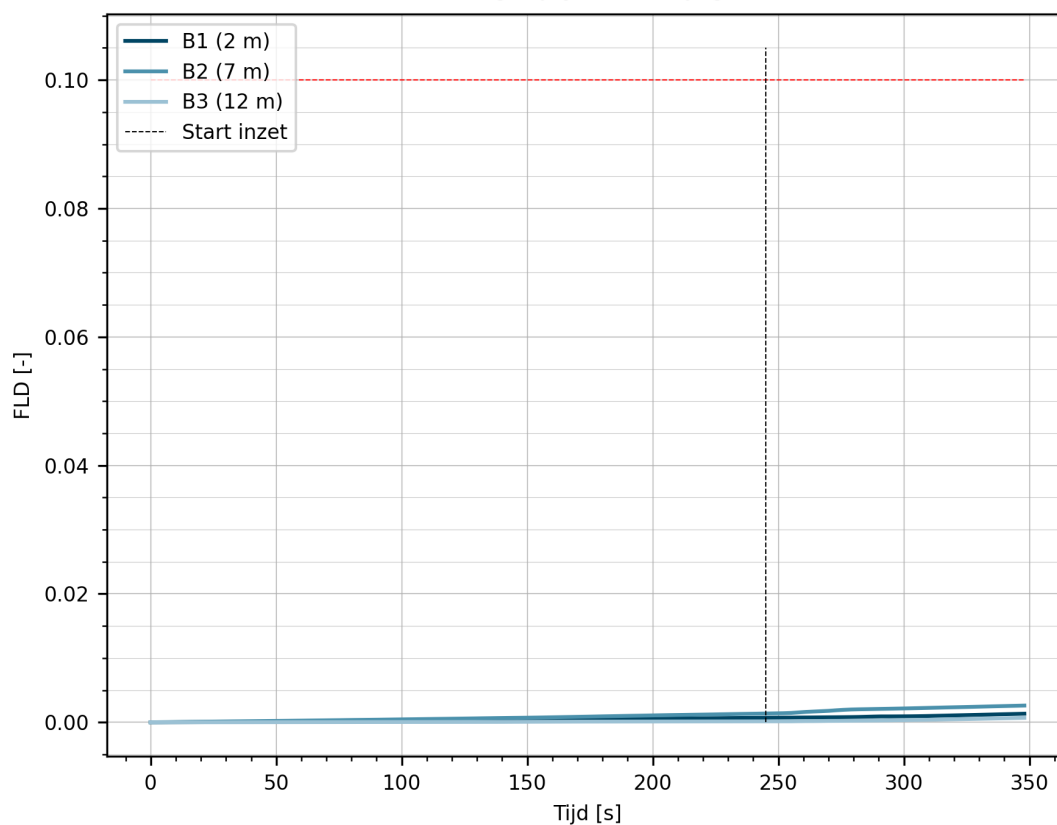
Verstikkende gassen (dosis)
HD 3D dicht - #1 2025



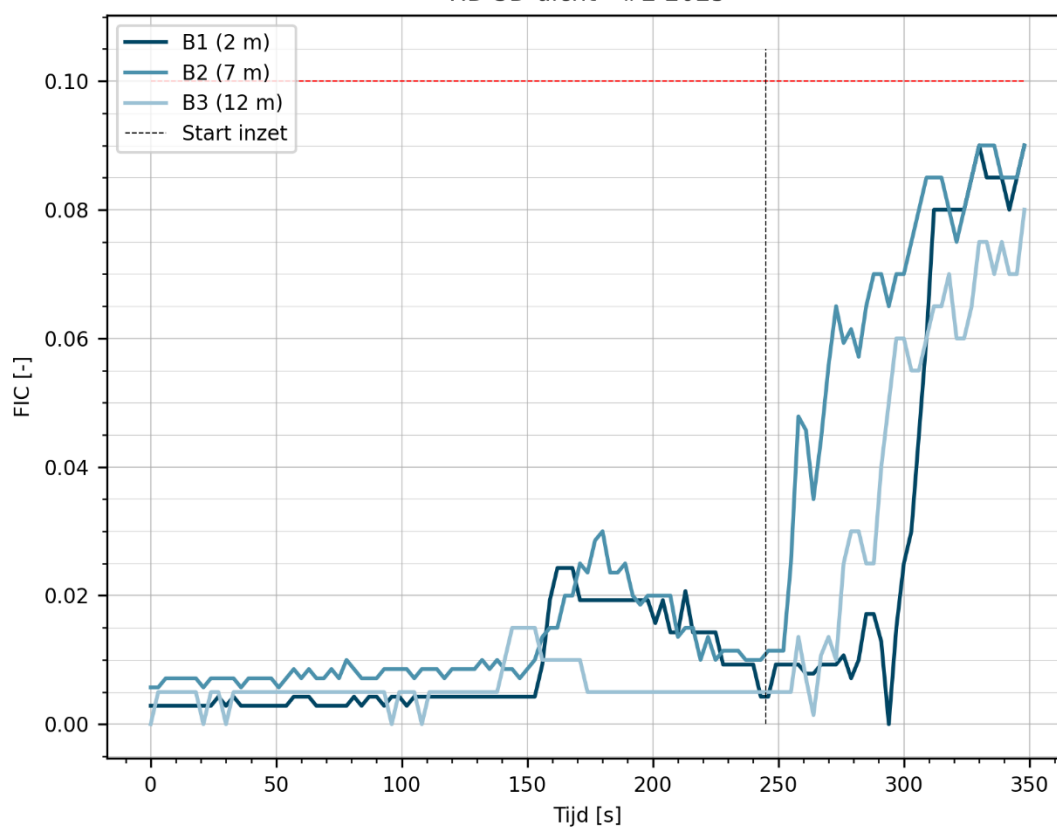
Warmteflux (dosis) 0.3 m
HD 3D dicht - #1 2025



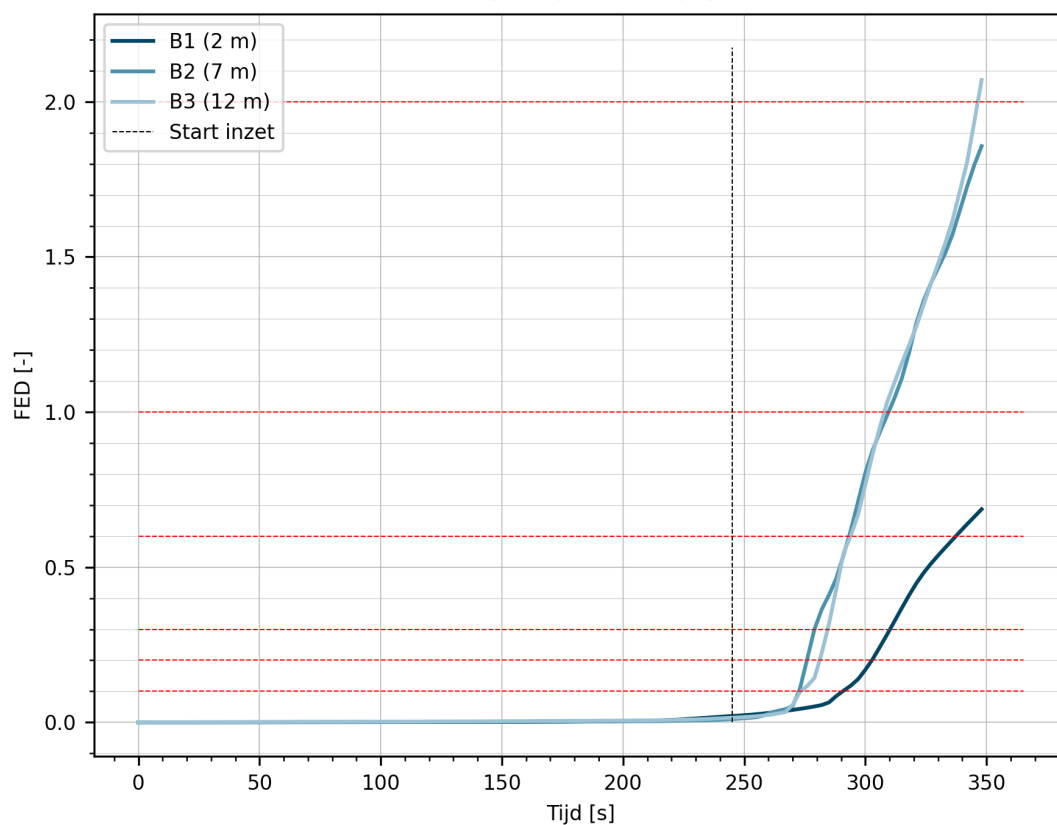
Irriterende gassen (dosis)
HD 3D dicht - #2 2025



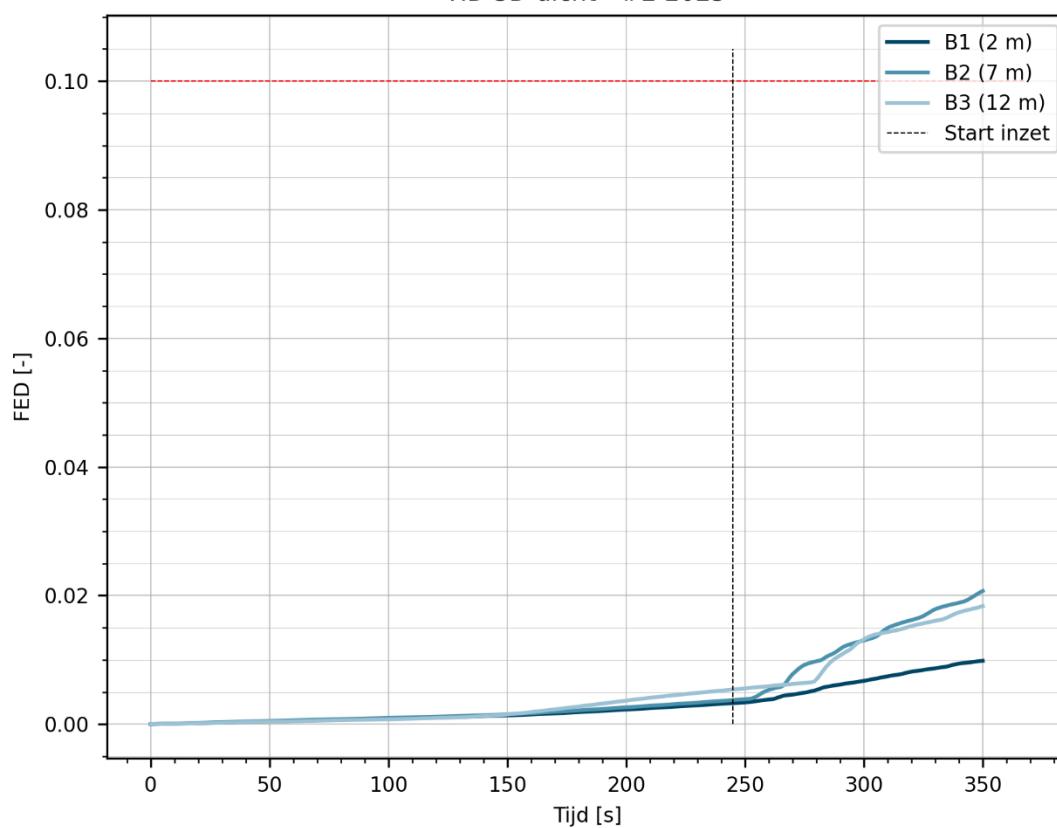
Irriterende gassen (concentratie)
HD 3D dicht - #2 2025



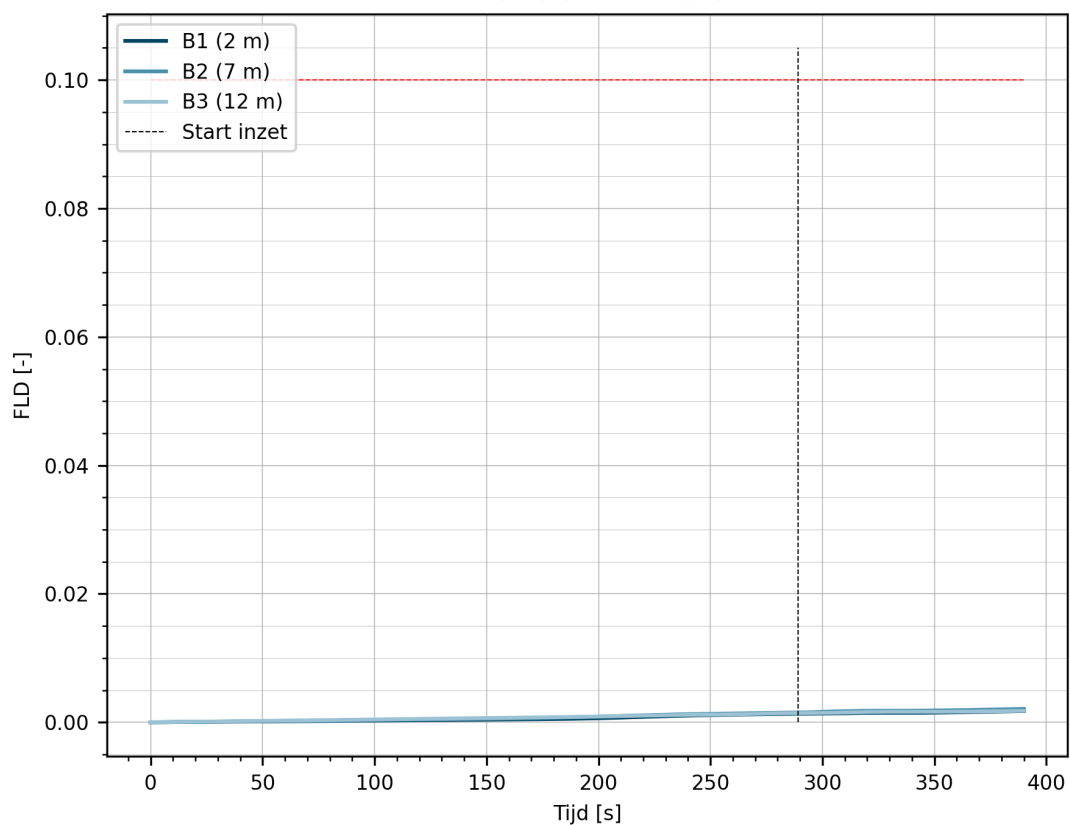
Verstikkende gassen (dosis)
HD 3D dicht - #2 2025



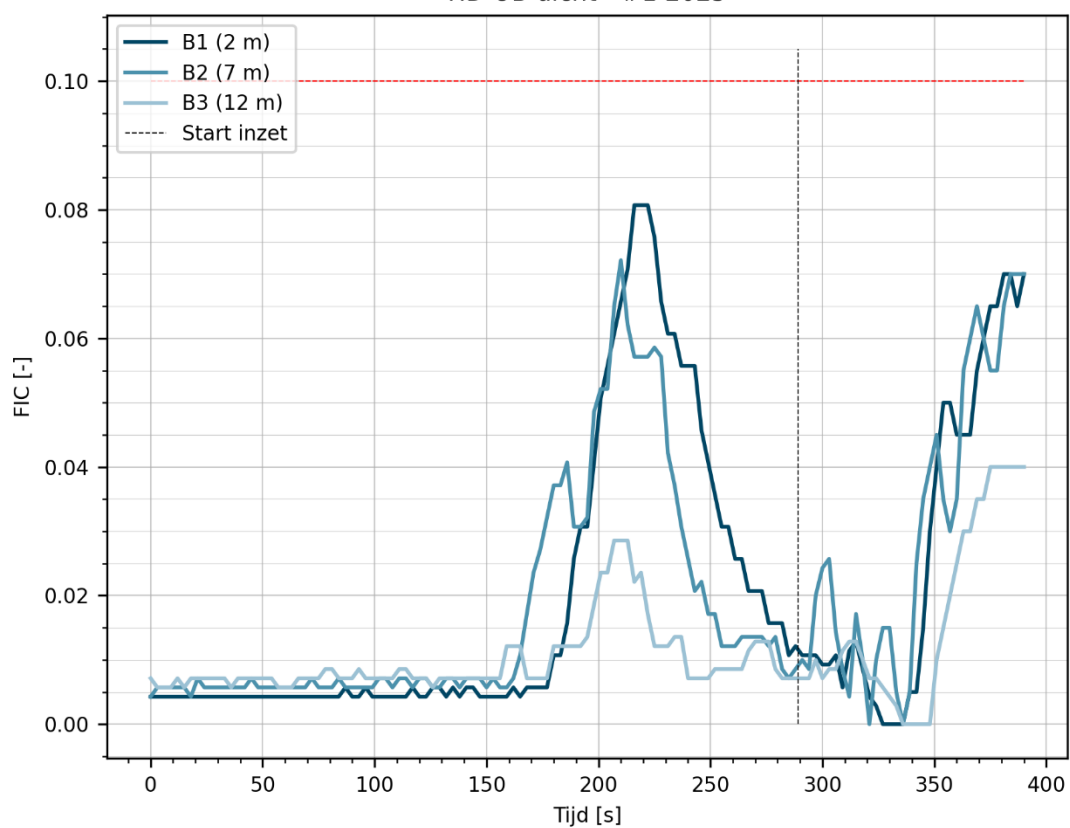
Warmteflux (dosis) 0.3 m
HD 3D dicht - #2 2025



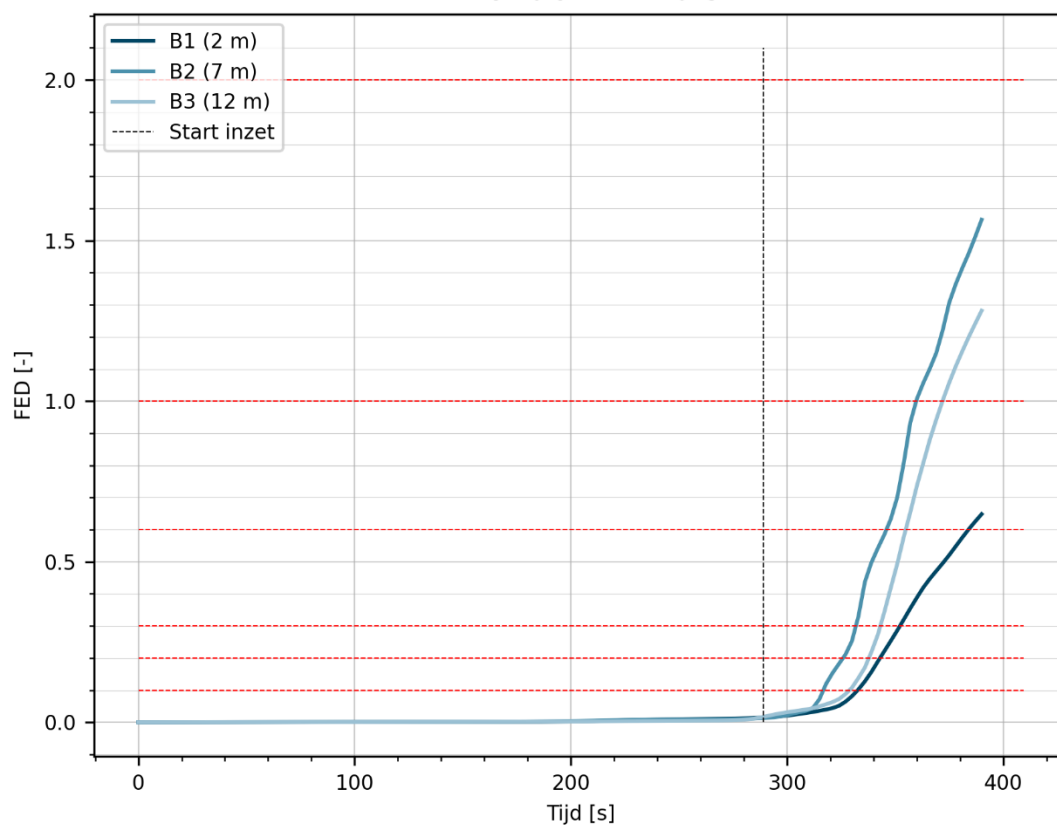
Irriterende gassen (dosis)
HD OB dicht - #1 2025



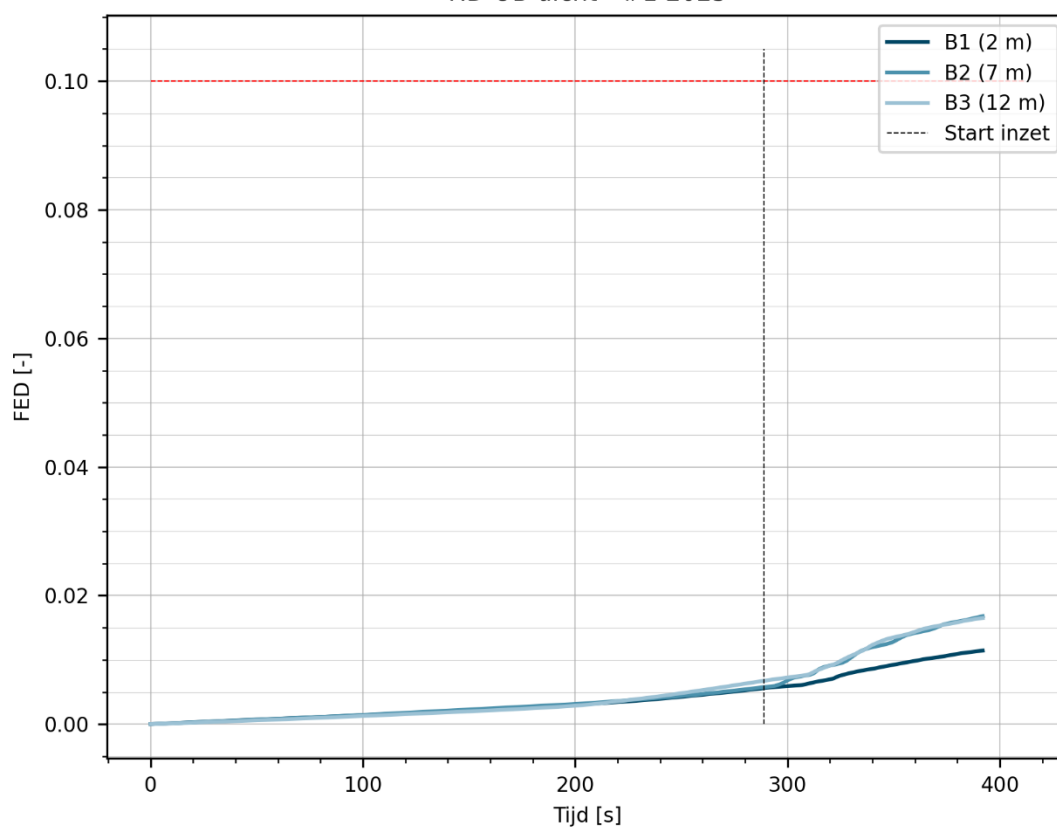
Irriterende gassen (concentratie)
HD OB dicht - #1 2025



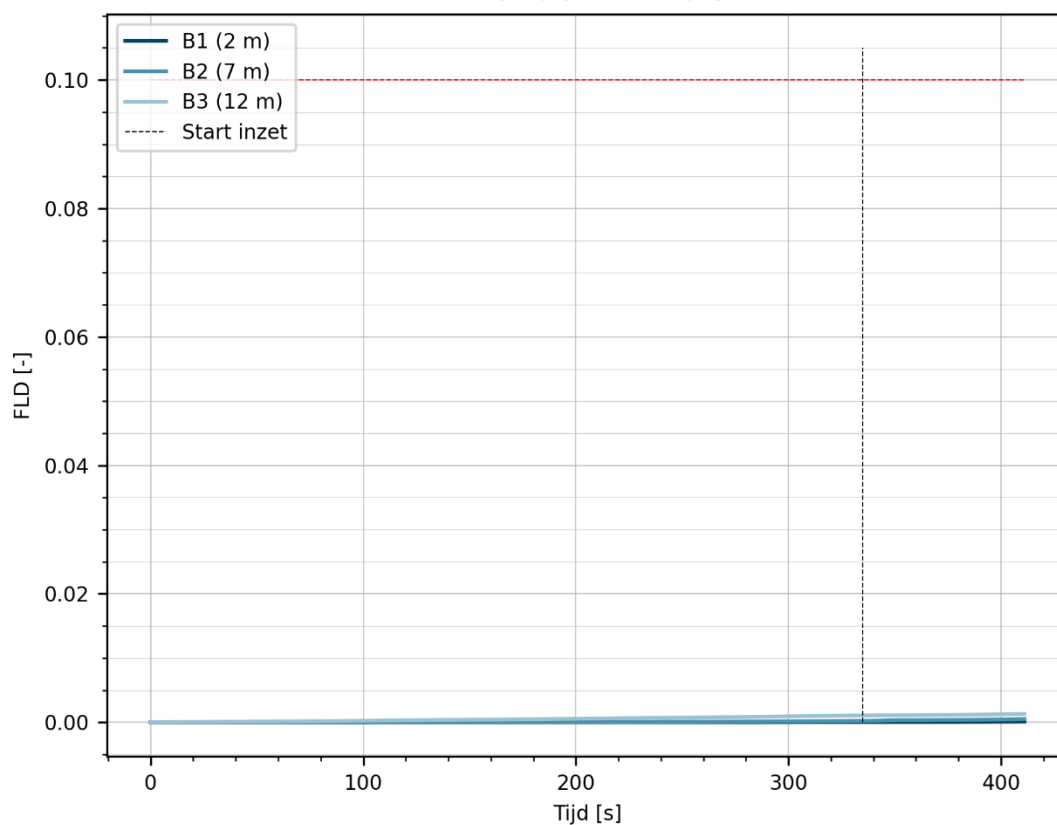
Verstikkende gassen (dosis)
HD OB dicht - #1 2025



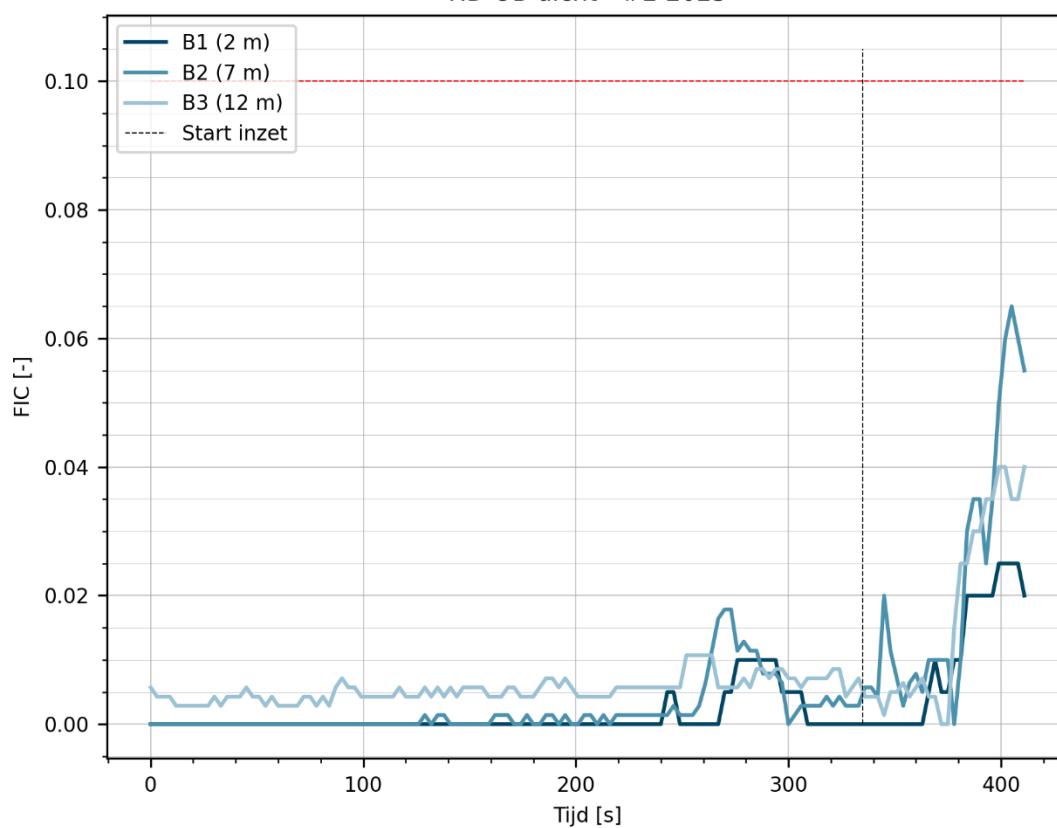
Warmteflux (dosis) 0.3 m
HD OB dicht - #1 2025



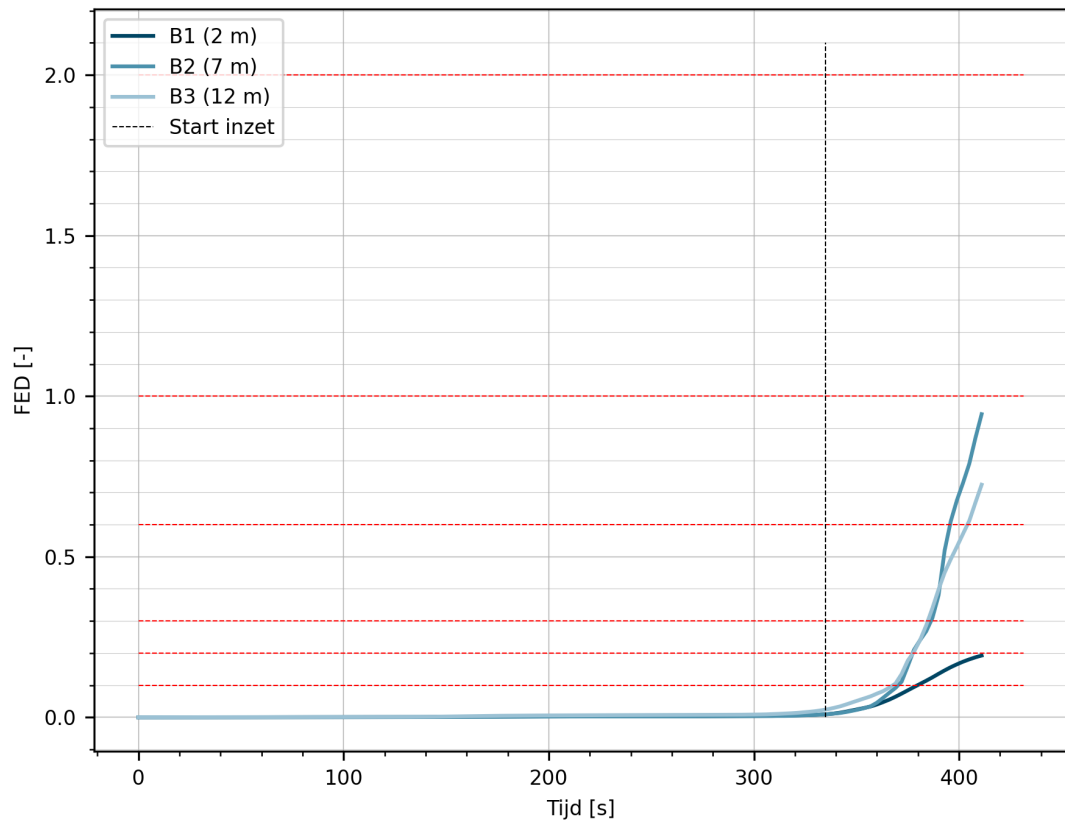
Irriterende gassen (dosis)
HD OB dicht - #2 2025



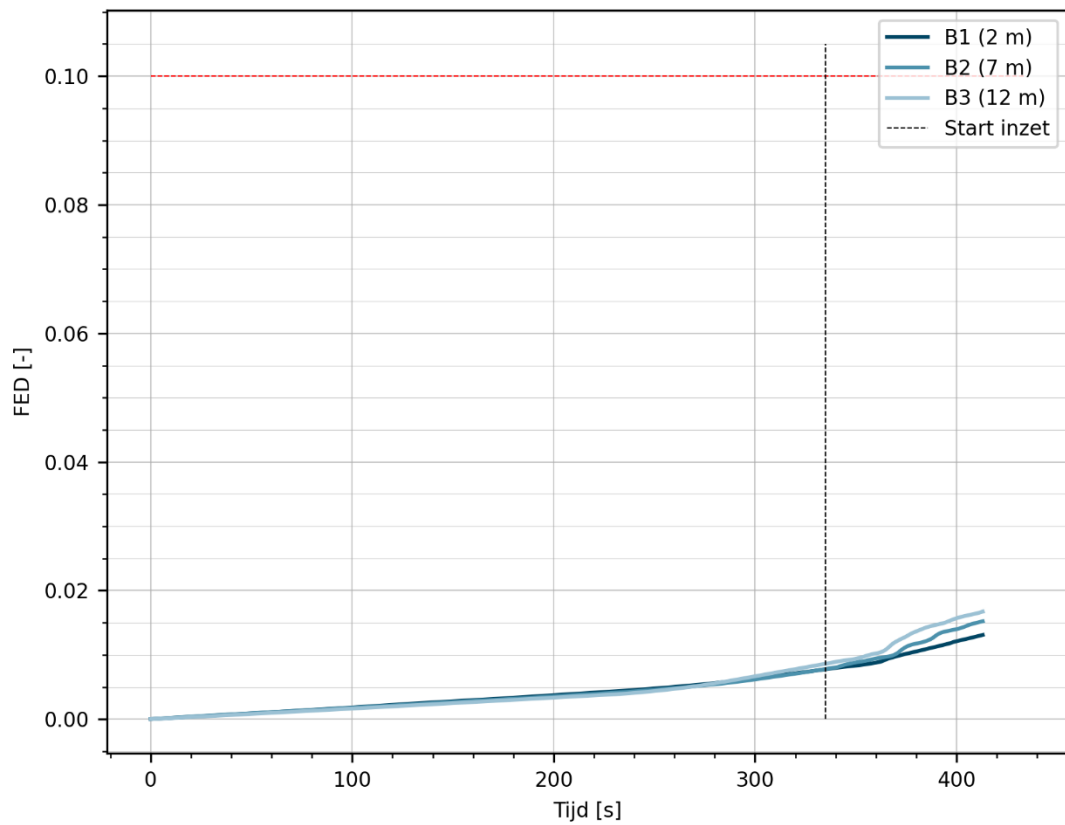
Irriterende gassen (concentratie)
HD OB dicht - #2 2025



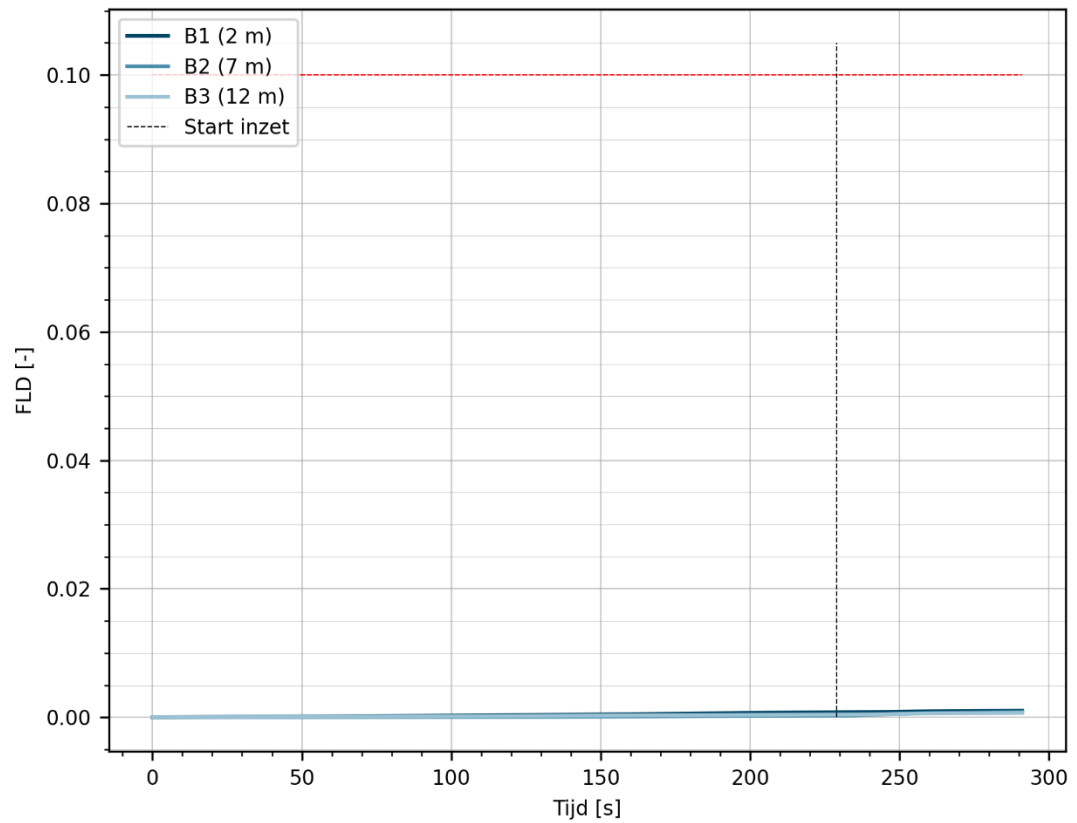
Verstikkende gassen (dosis)
HD OB dicht - #2 2025



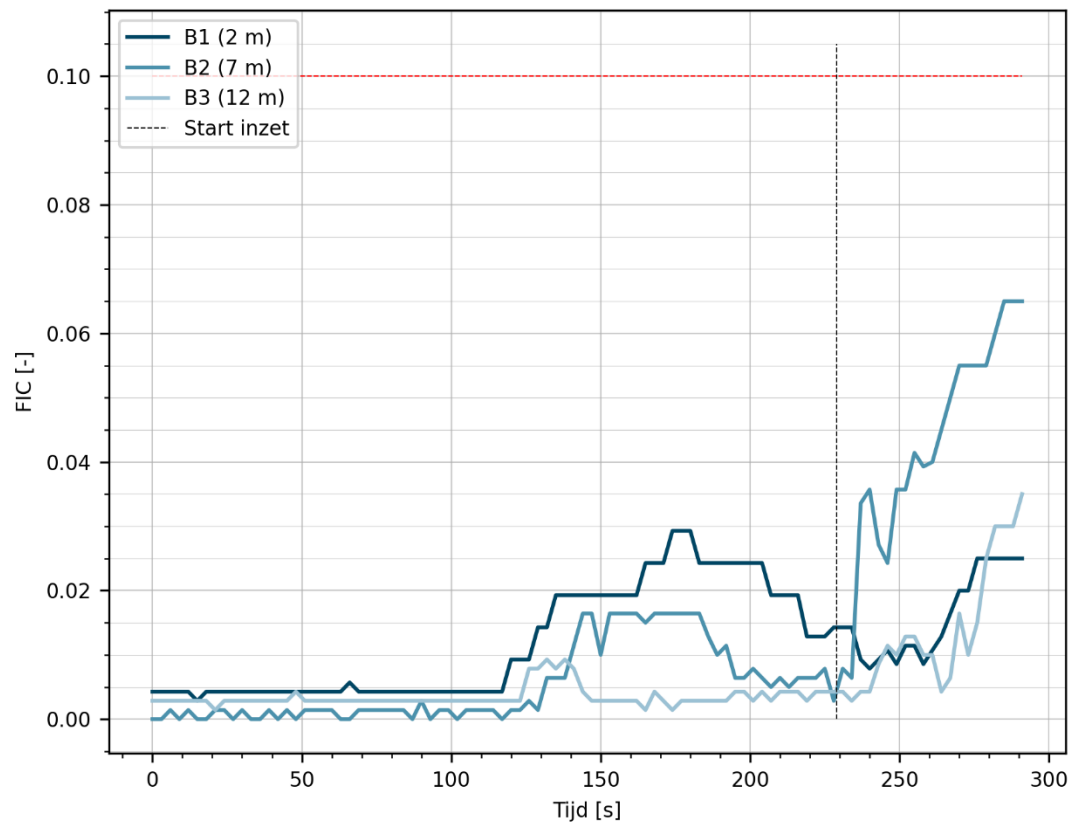
Warmteflux (dosis) 0.3 m
HD OB dicht - #2 2025



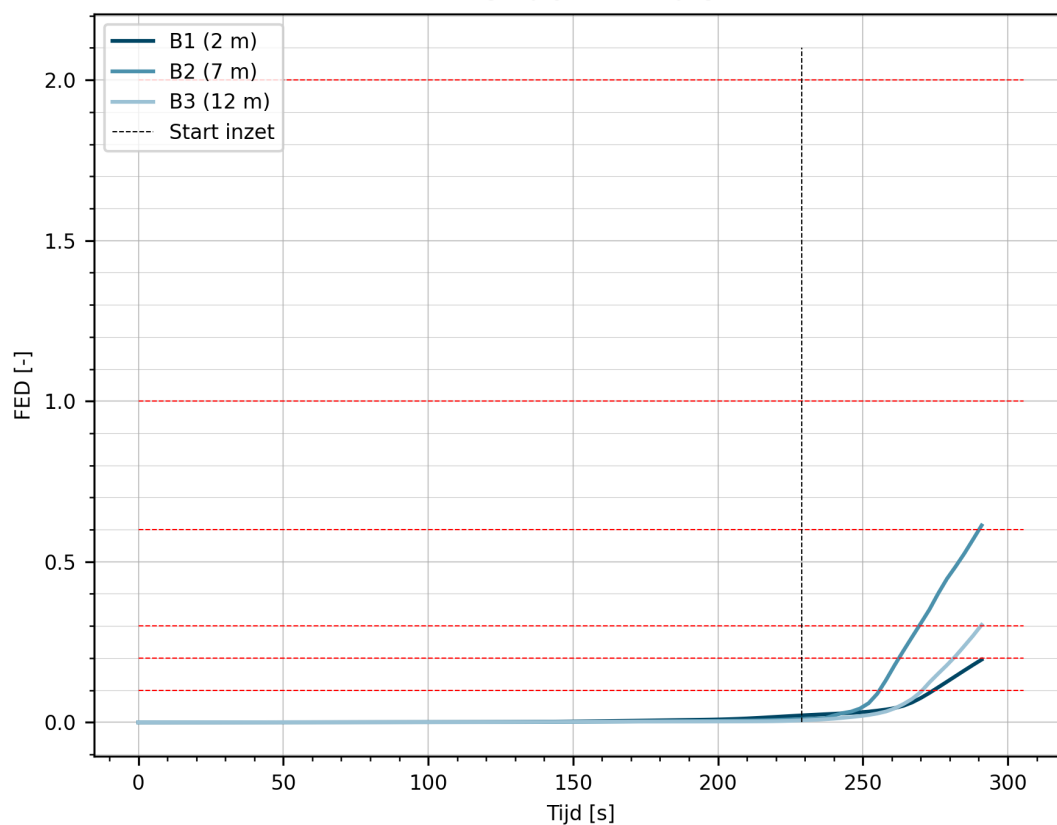
Irriterende gassen (dosis)
LD 3D dicht - #1 2025



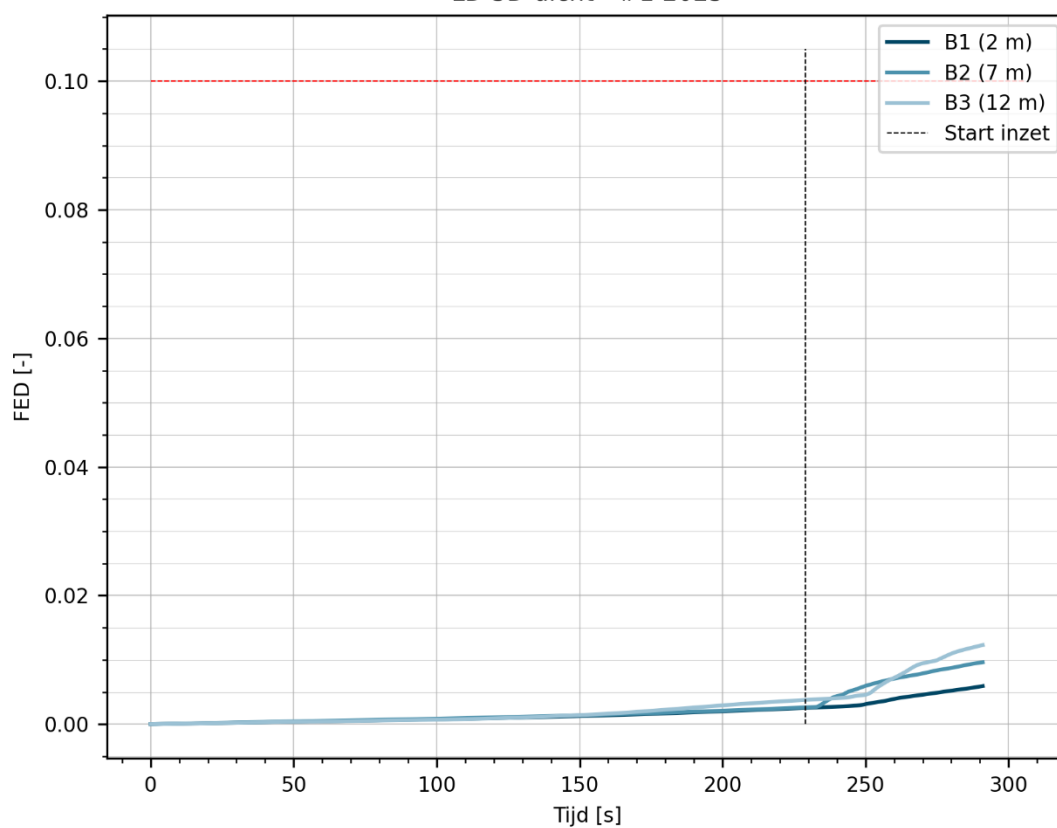
Irriterende gassen (concentratie)
LD 3D dicht - #1 2025



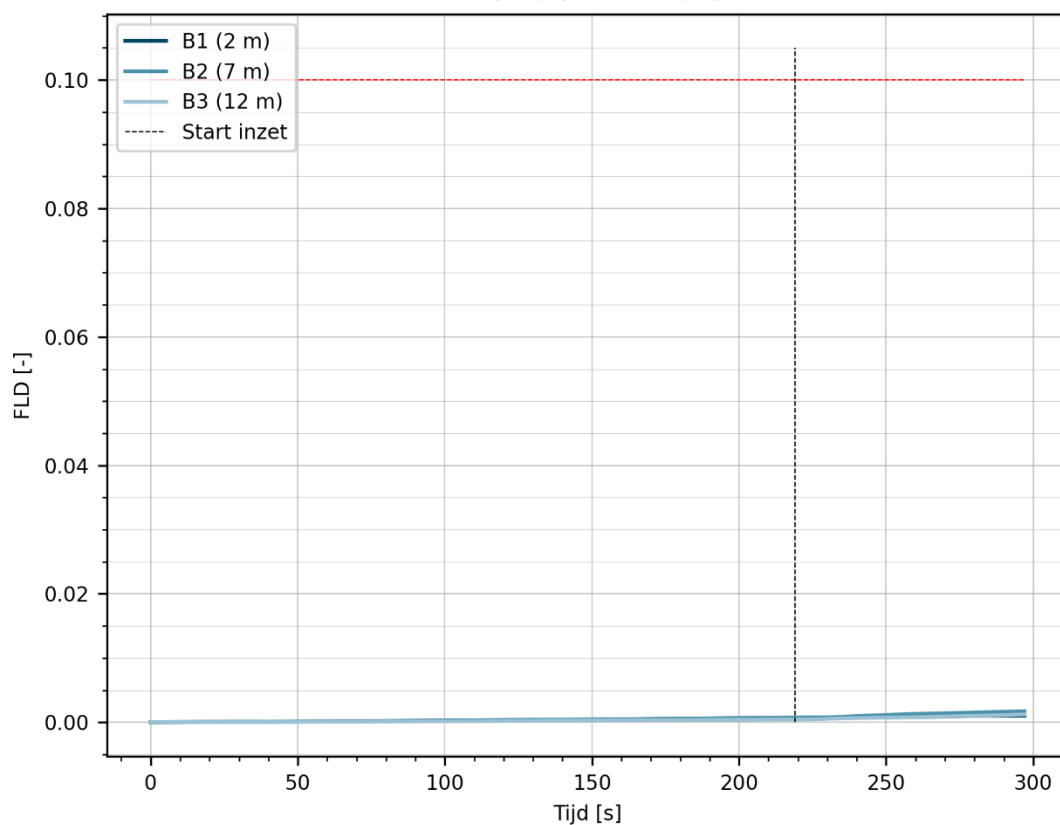
Verstikkende gassen (dosis)
LD 3D dicht - #1 2025



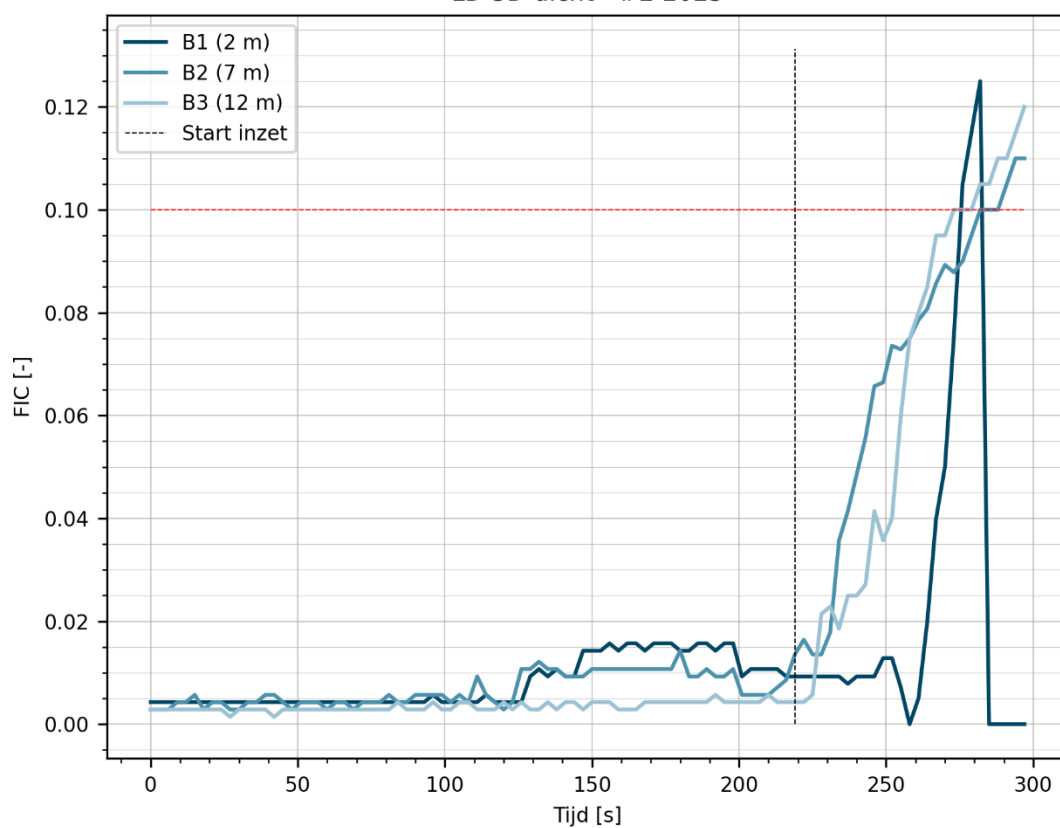
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD 3D dicht - #1 2025



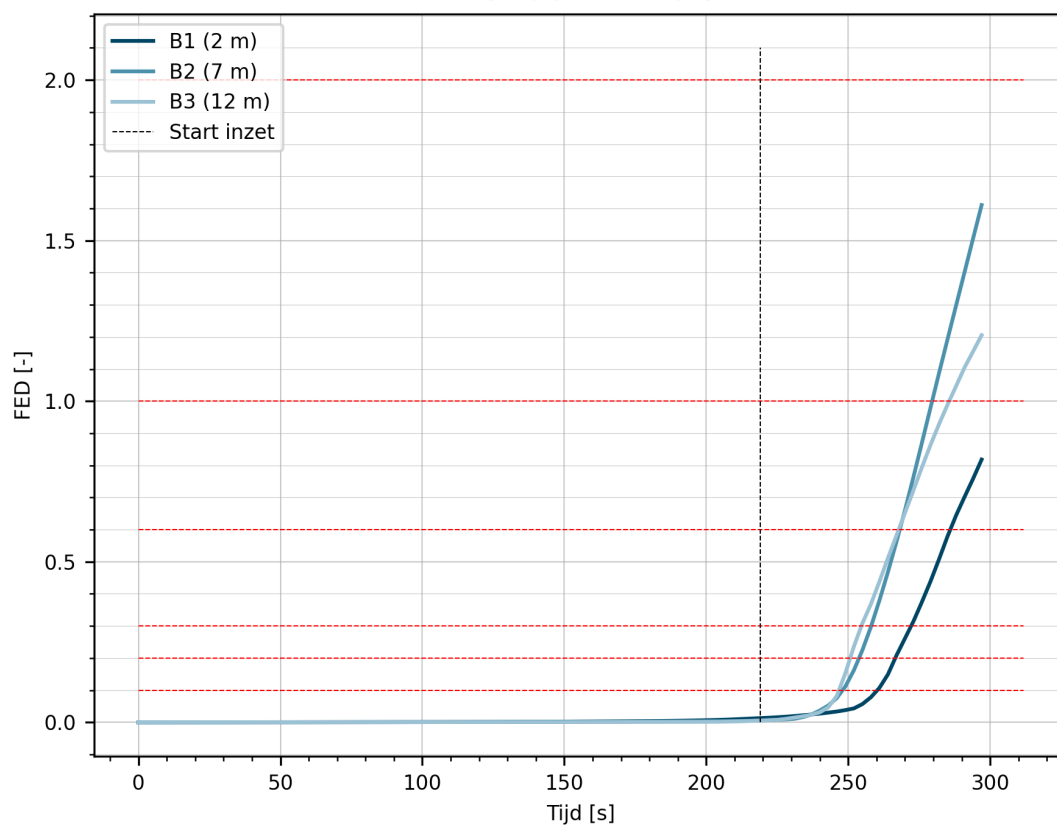
Irriterende gassen (dosis)
LD 3D dicht - #2 2025



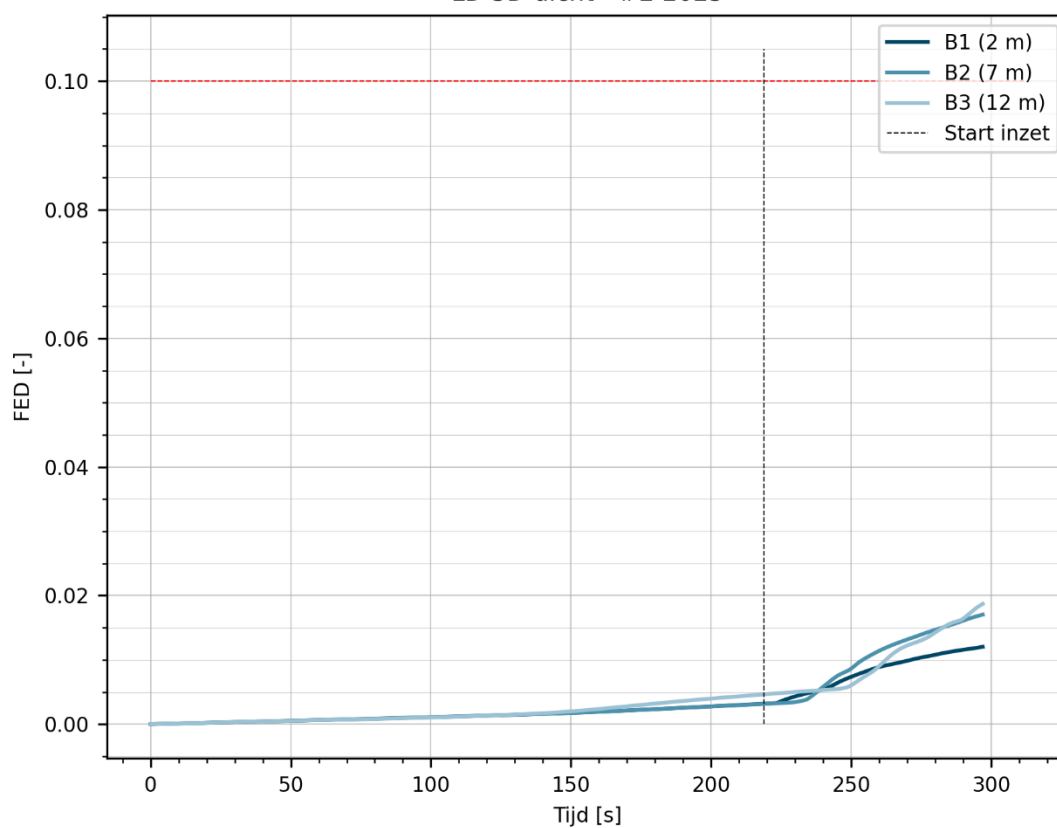
Irriterende gassen (concentratie)
LD 3D dicht - #2 2025



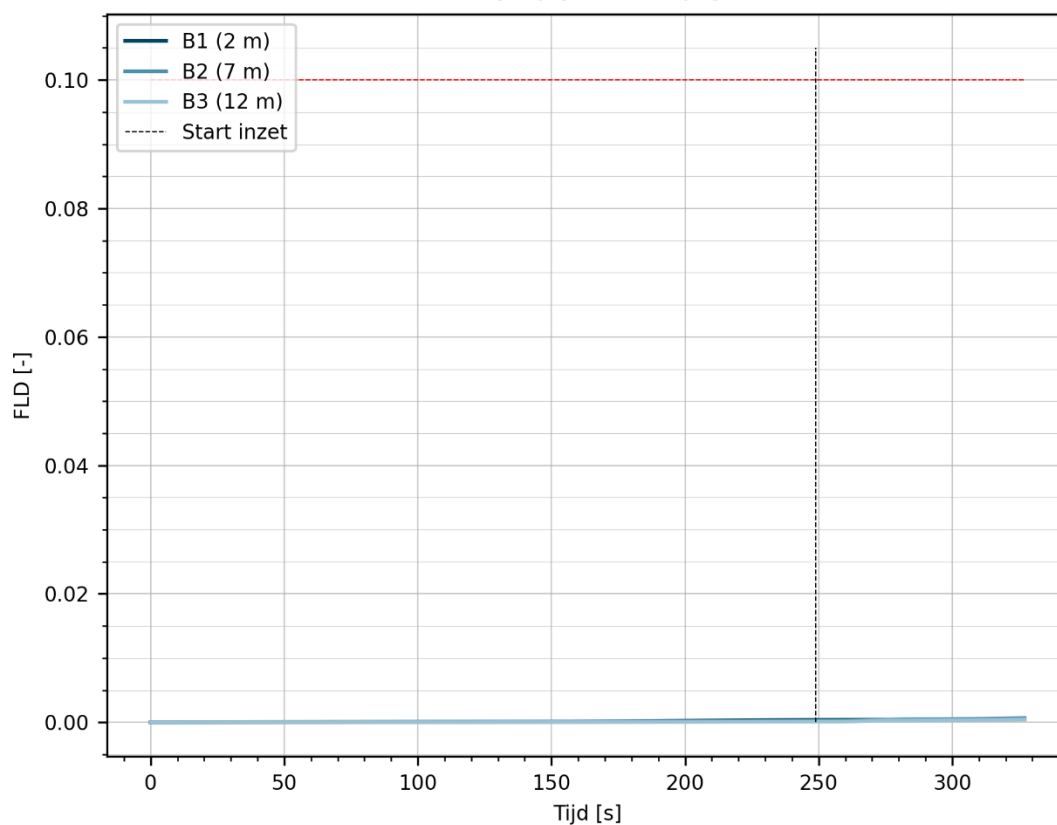
Verstikkende gassen (dosis)
LD 3D dicht - #2 2025



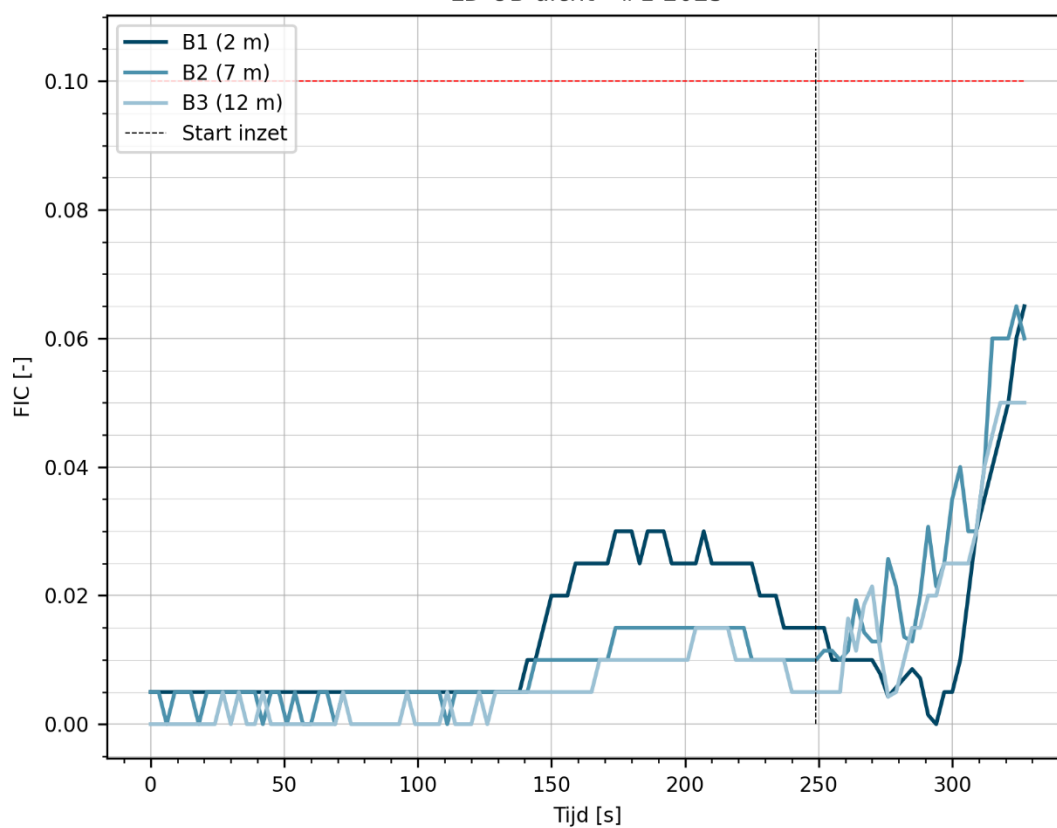
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD 3D dicht - #2 2025



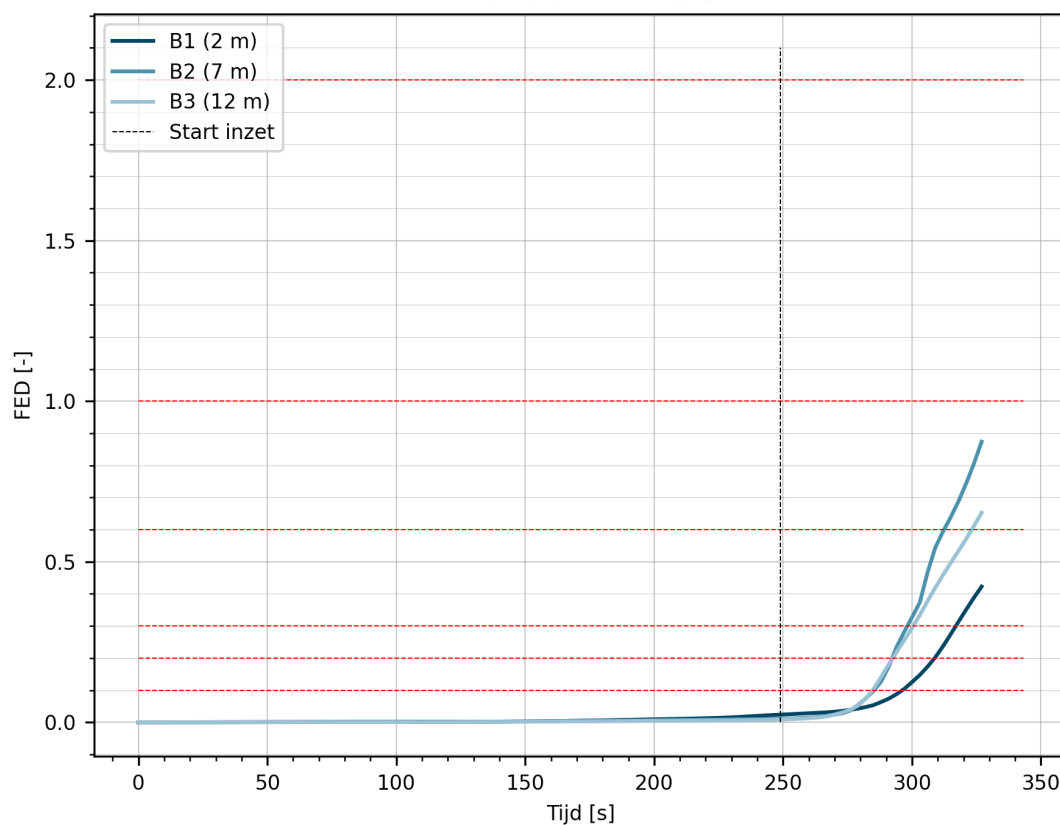
Irriterende gassen (dosis)
LD OB dicht - #1 2025



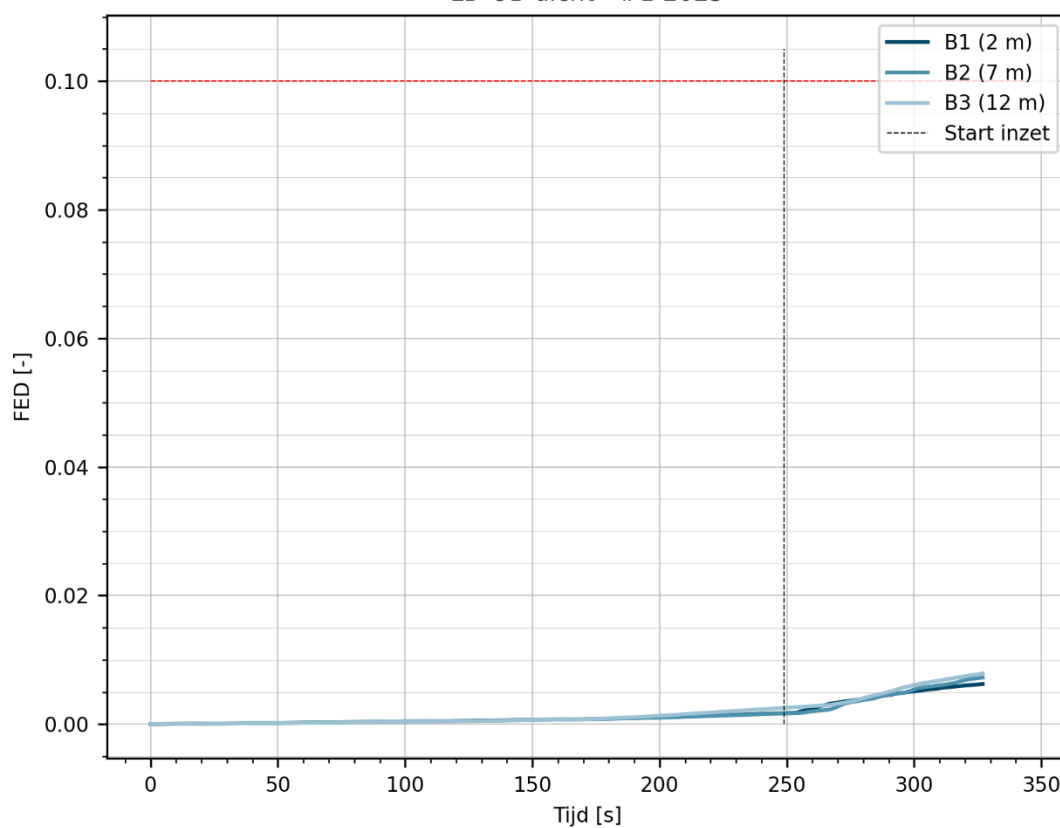
Irriterende gassen (concentratie)
LD OB dicht - #1 2025



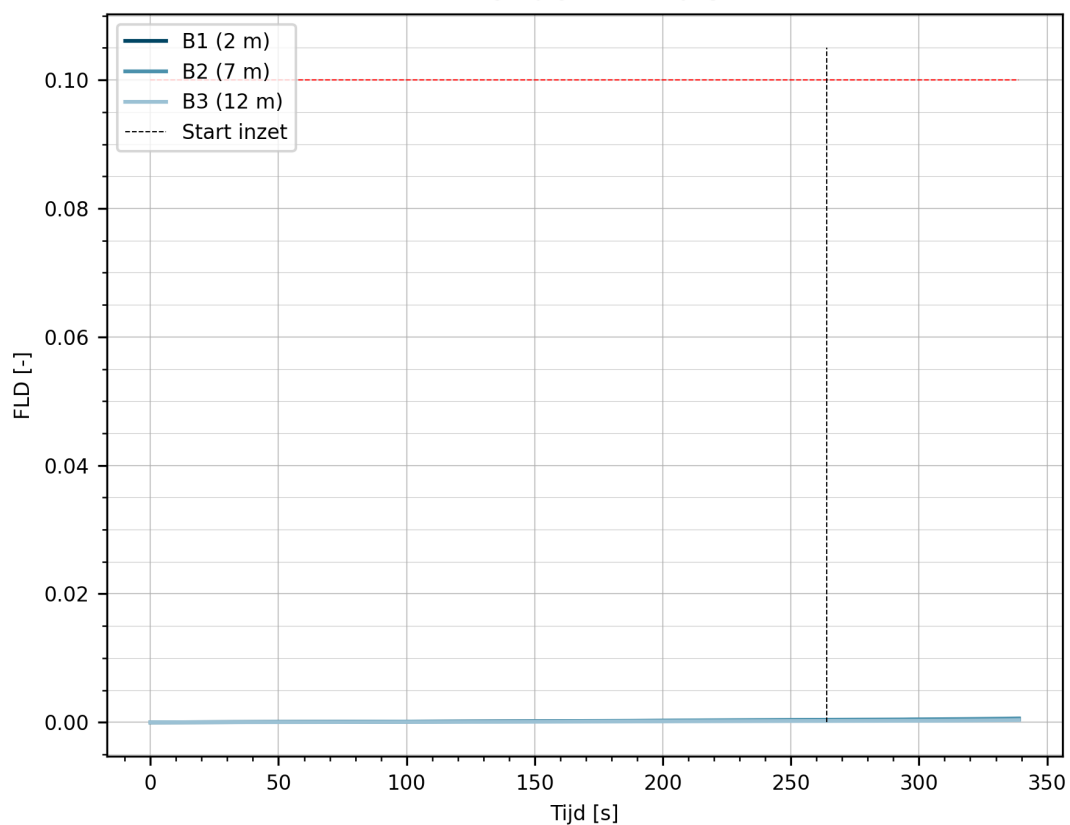
Verstikkende gassen (dosis)
LD OB dicht - #1 2025



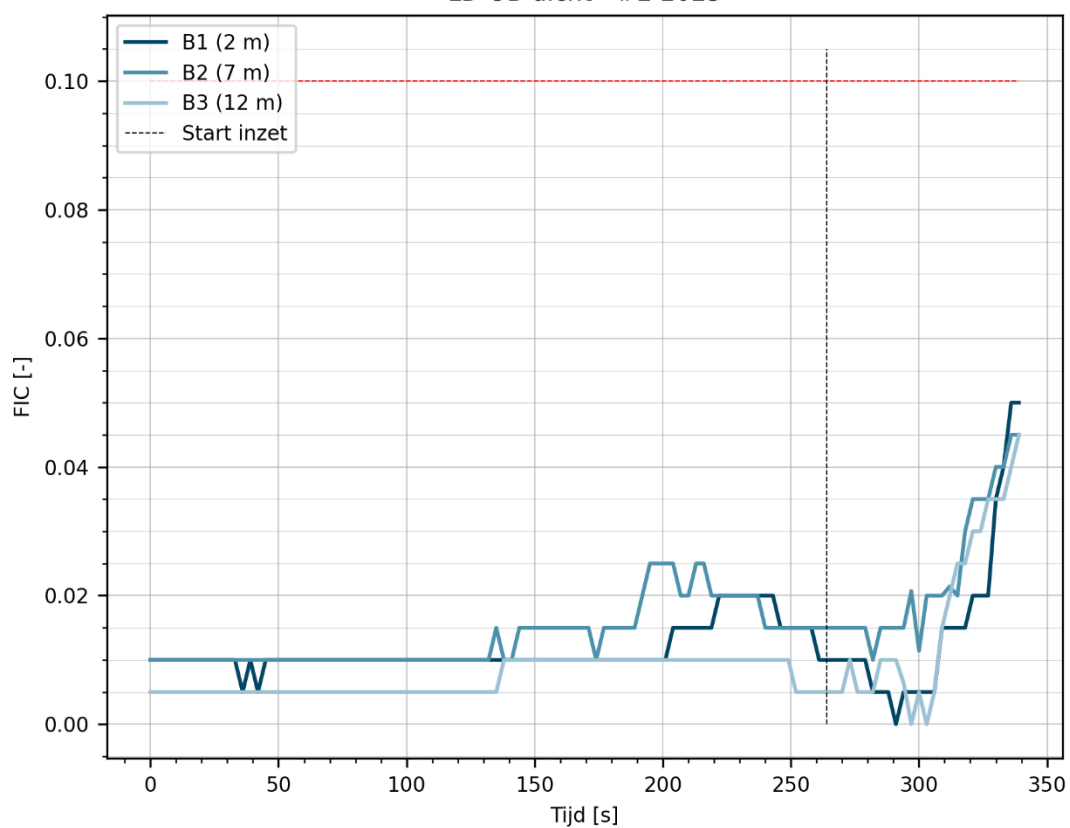
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD OB dicht - #1 2025



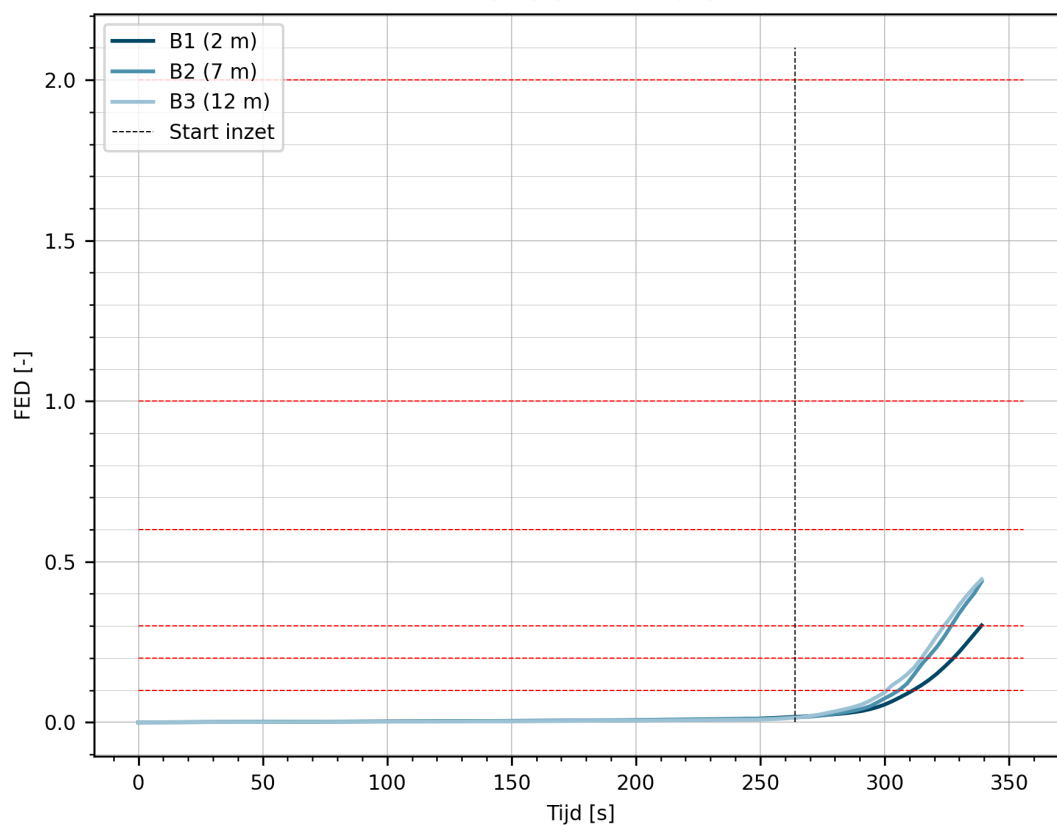
Irriterende gassen (dosis)
LD OB dicht - #2 2025



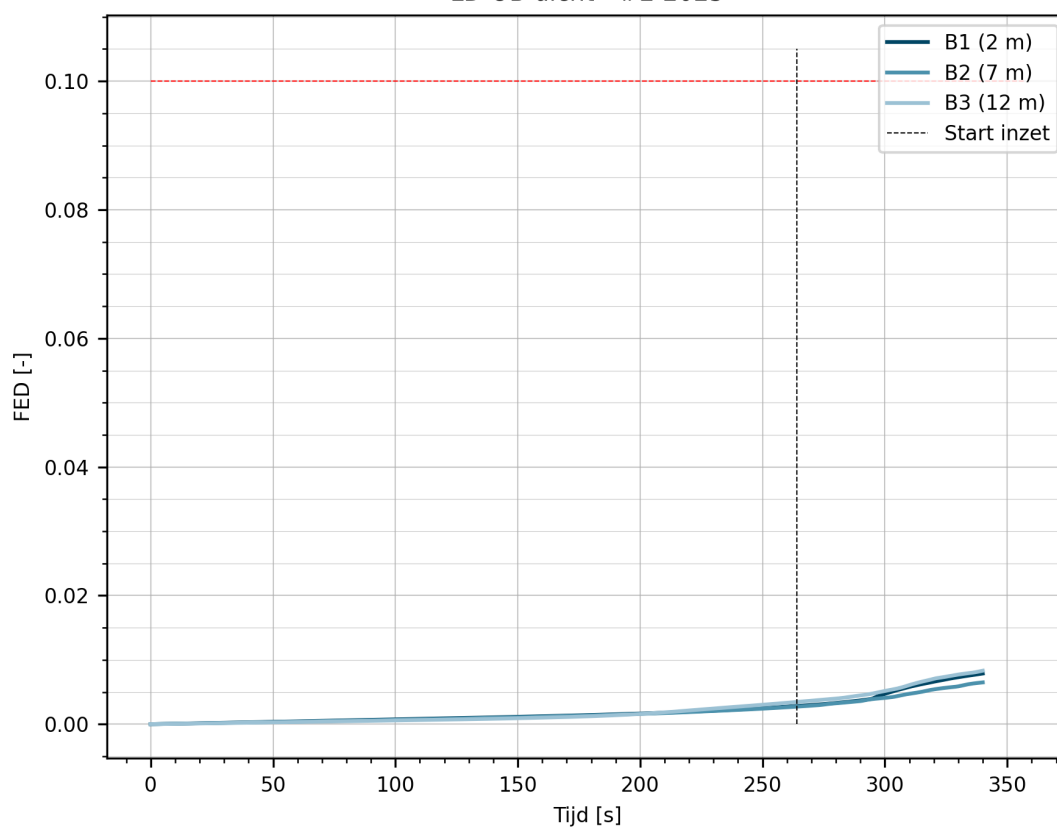
Irriterende gassen (concentratie)
LD OB dicht - #2 2025



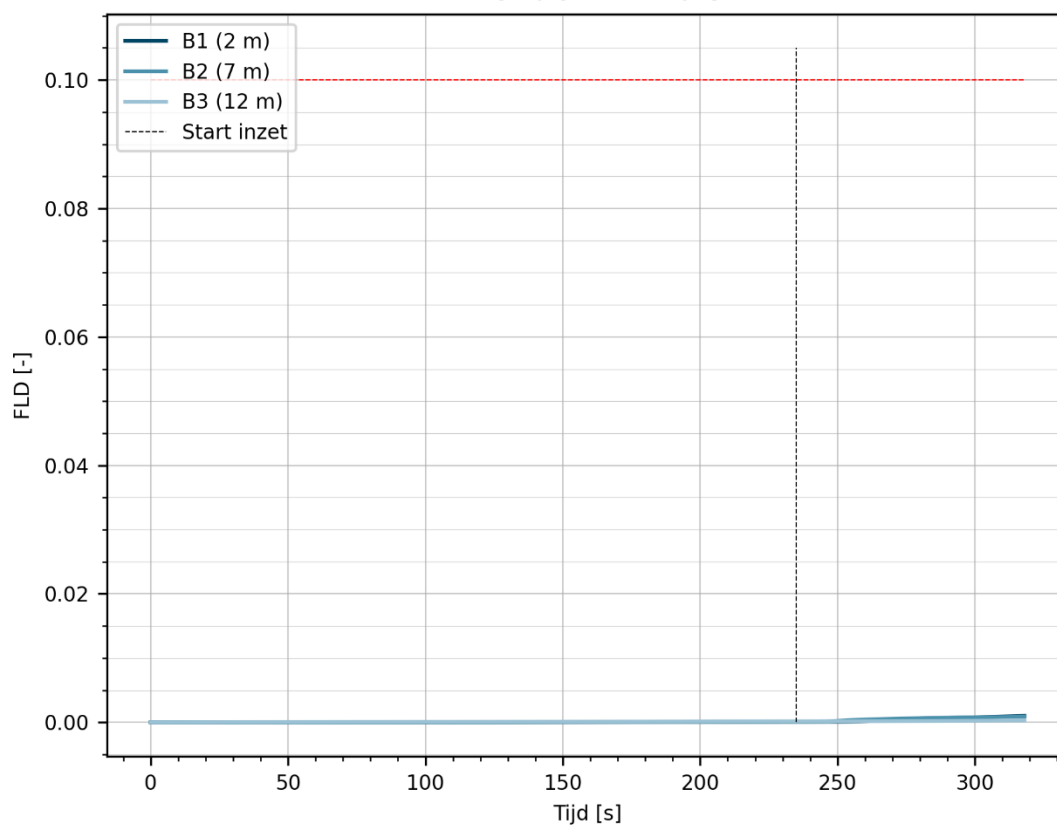
Verstikkende gassen (dosis)
LD OB dicht - #2 2025



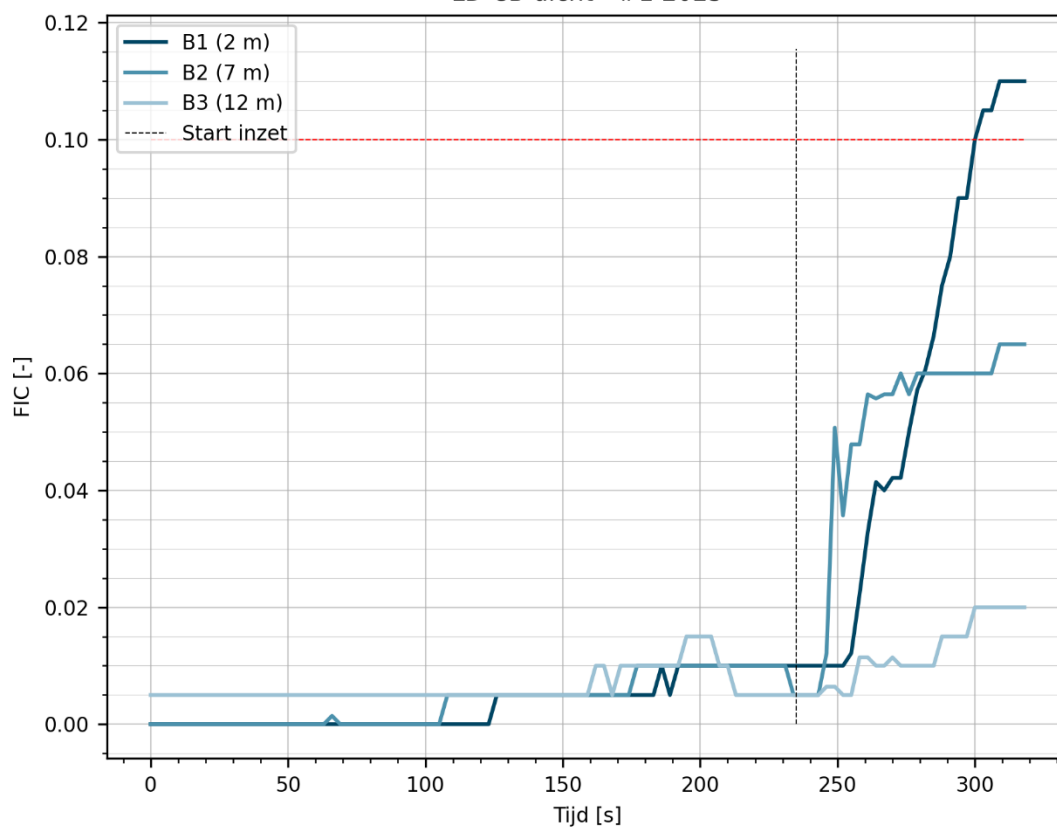
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD OB dicht - #2 2025



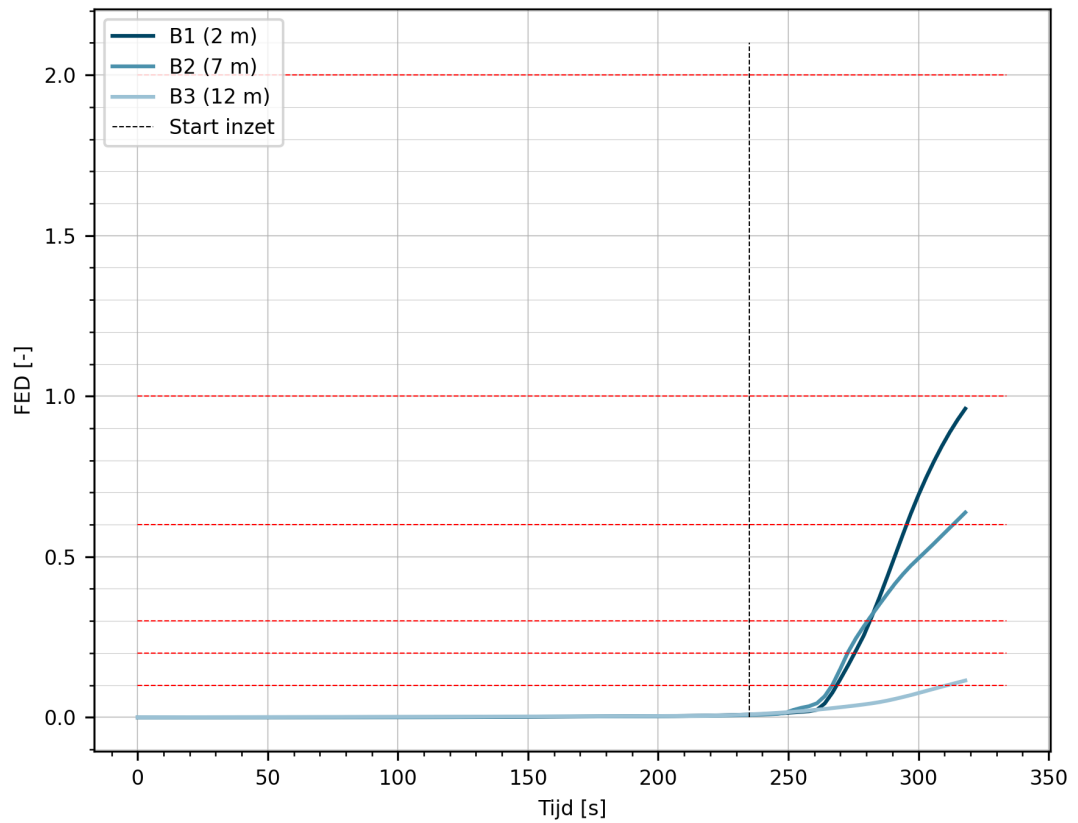
Irriterende gassen (dosis)
LD CB dicht - #1 2025



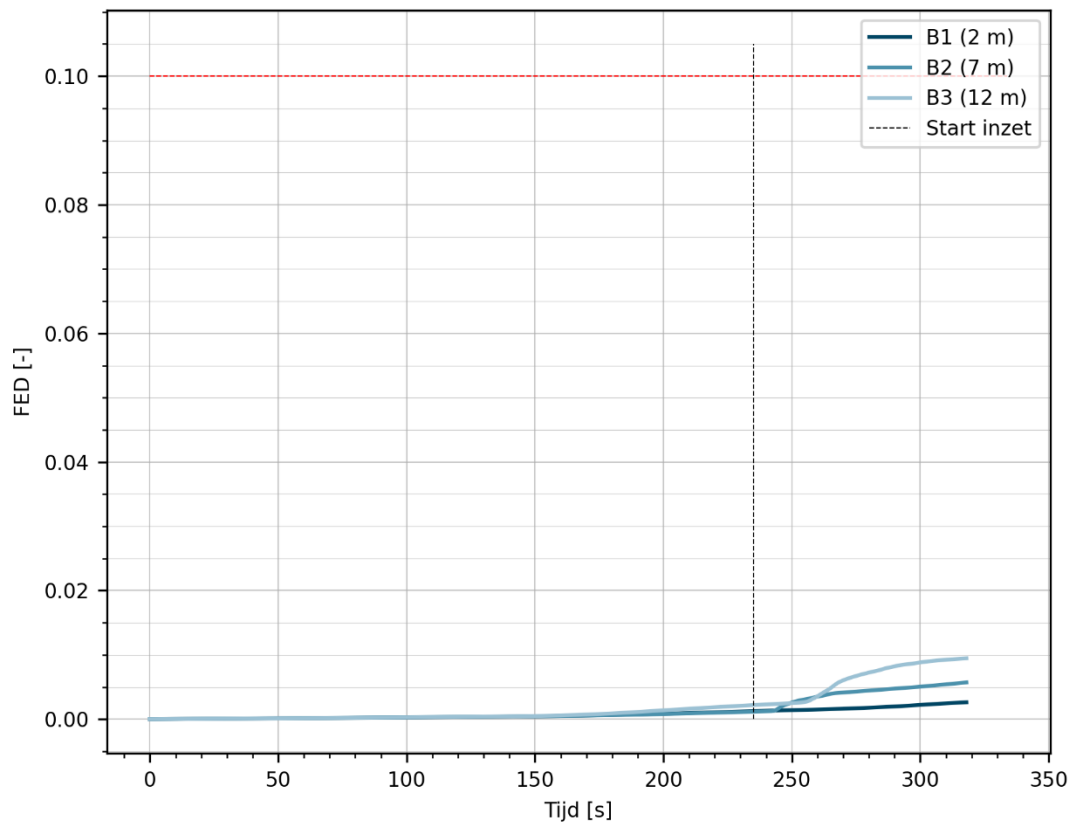
Irriterende gassen (concentratie)
LD CB dicht - #1 2025



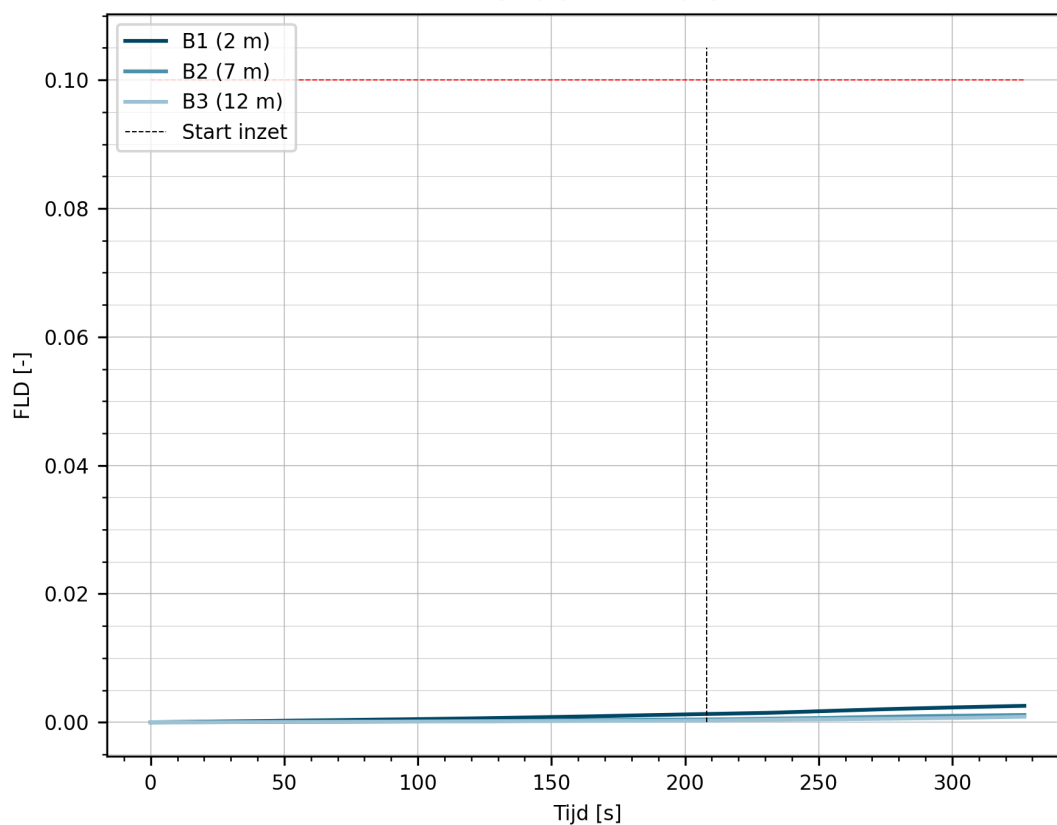
Verstikkende gassen (dosis)
LD CB dicht - #1 2025



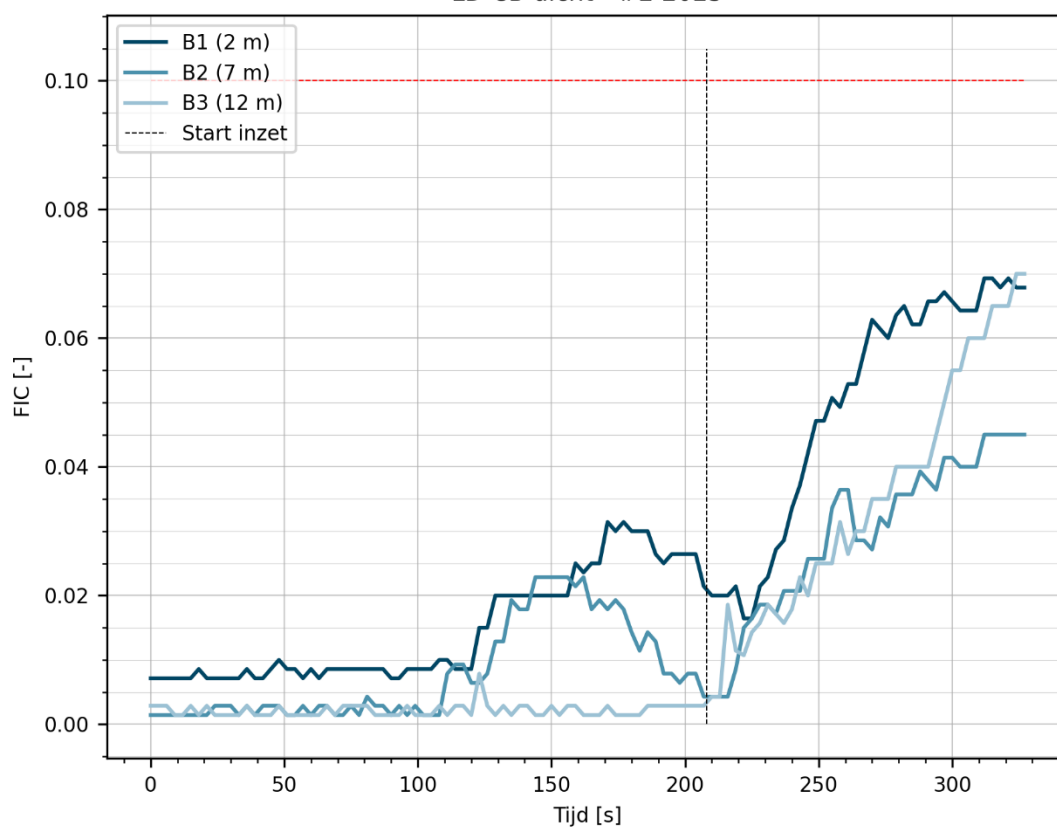
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD CB dicht - #1 2025



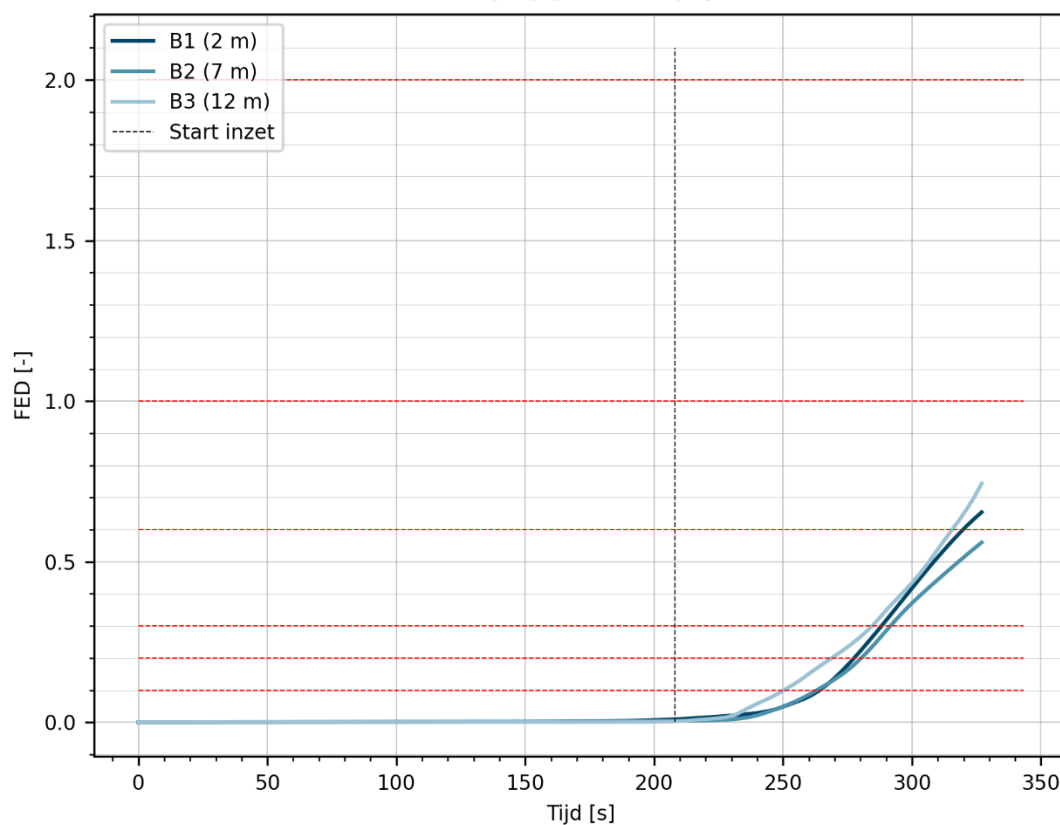
Irriterende gassen (dosis)
LD CB dicht - #2 2025



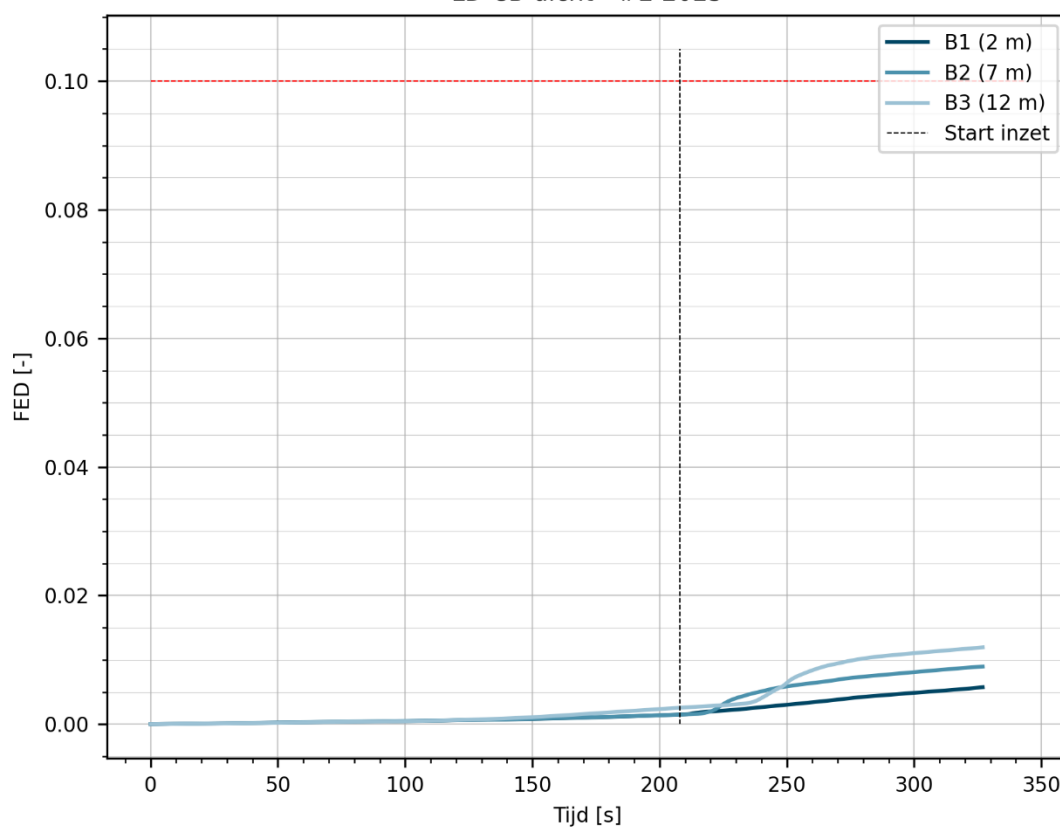
Irriterende gassen (concentratie)
LD CB dicht - #2 2025



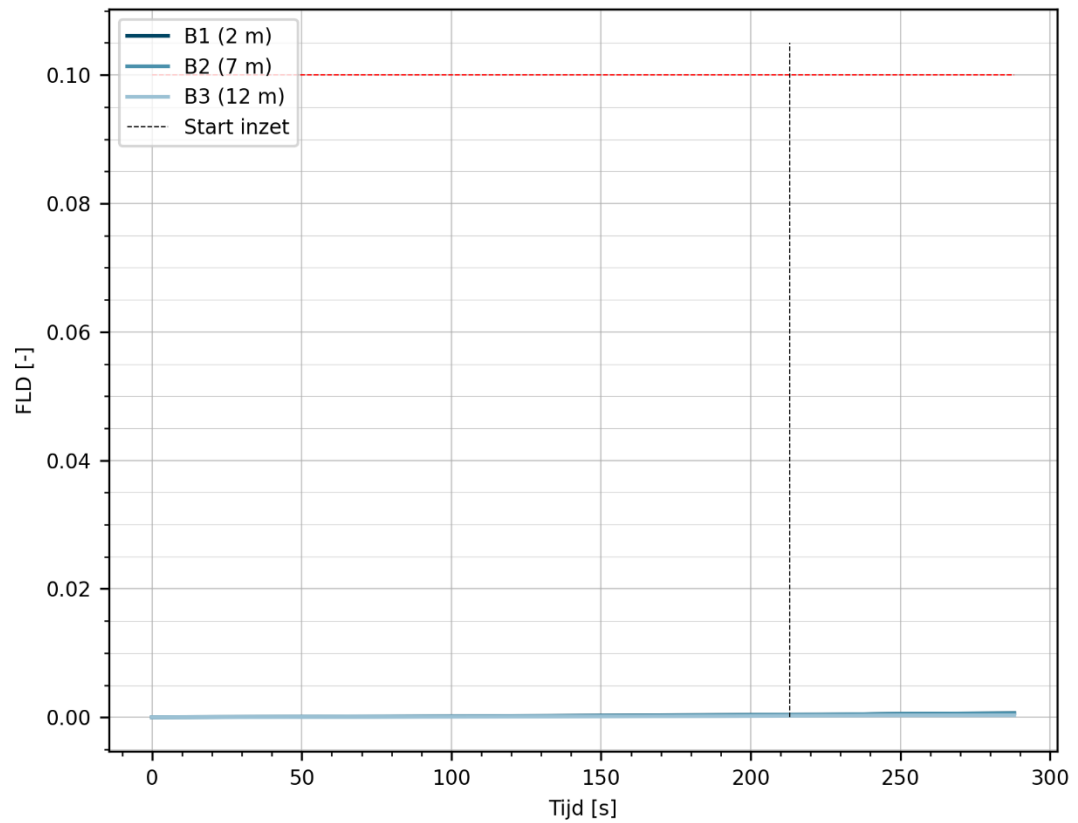
Verstikkende gassen (dosis)
LD CB dicht - #2 2025



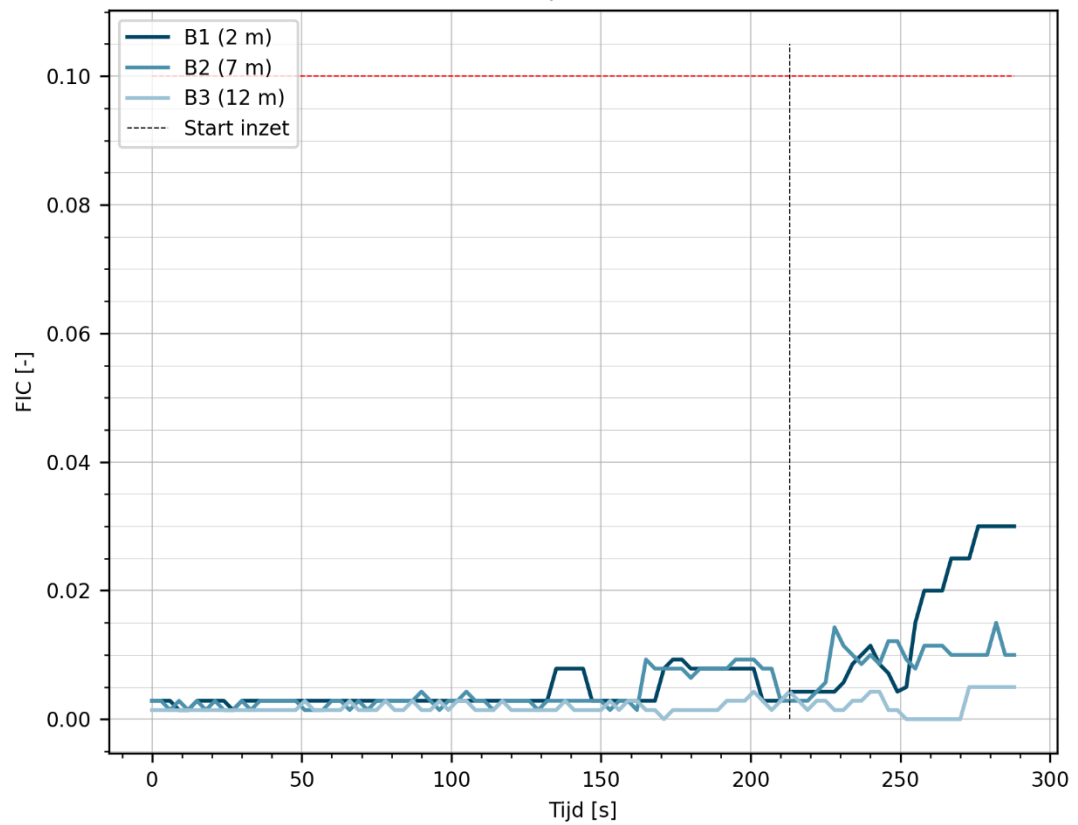
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD CB dicht - #2 2025



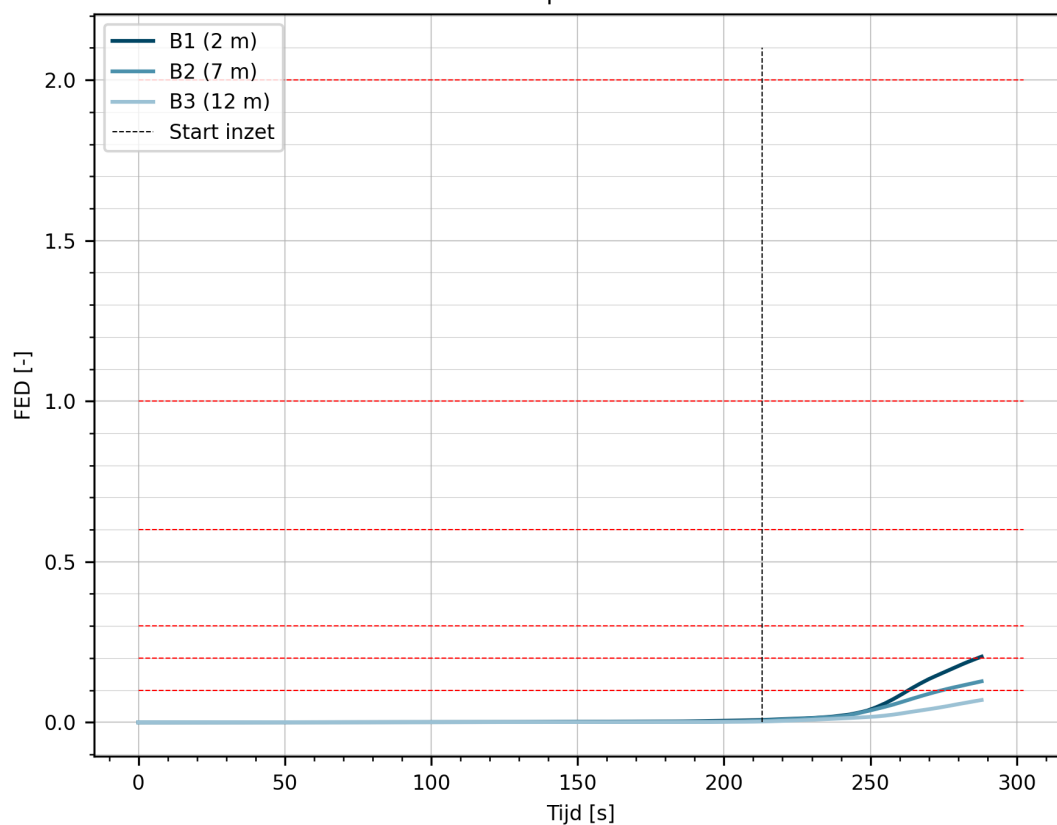
Irriterende gassen (dosis)
LD OB open - #1 2025



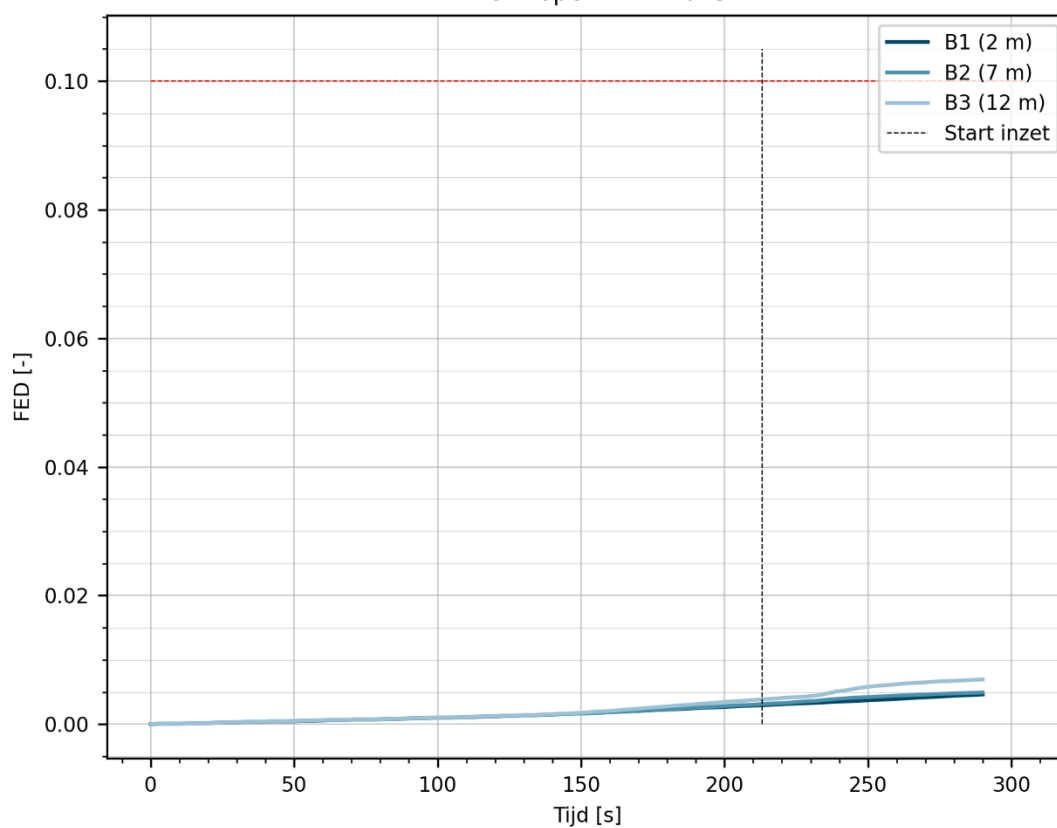
Irriterende gassen (concentratie)
LD OB open - #1 2025



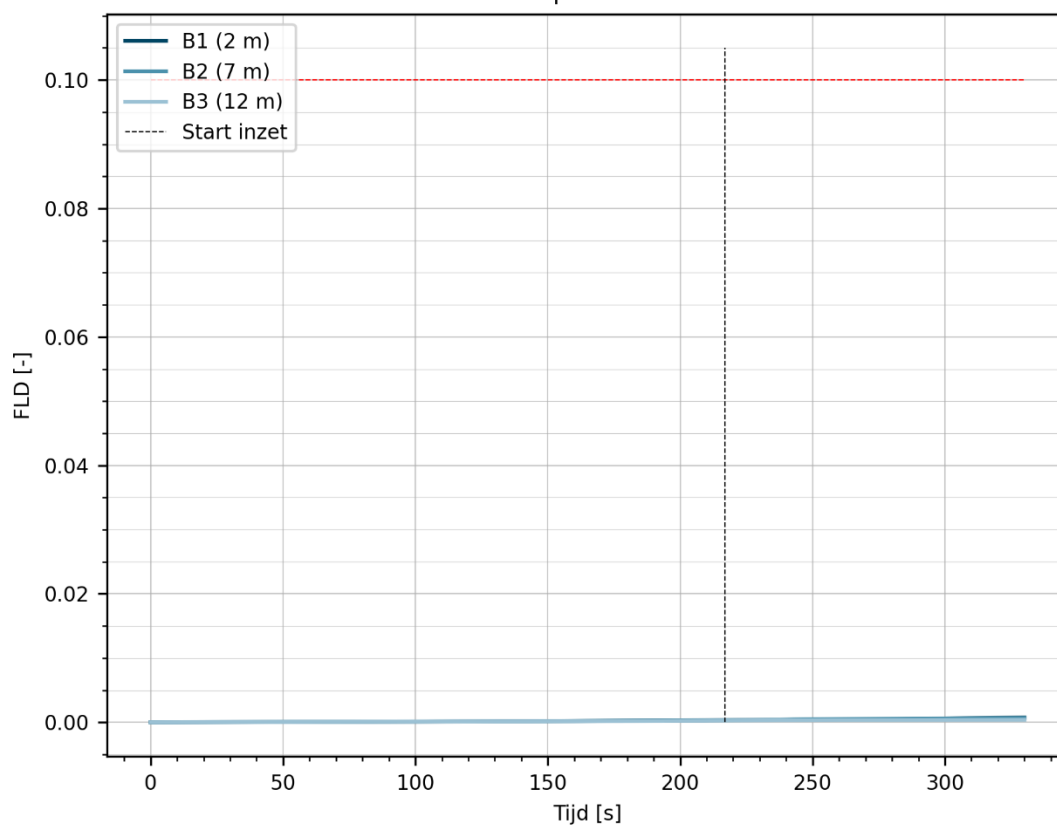
Verstikkende gassen (dosis)
LD OB open - #1 2025



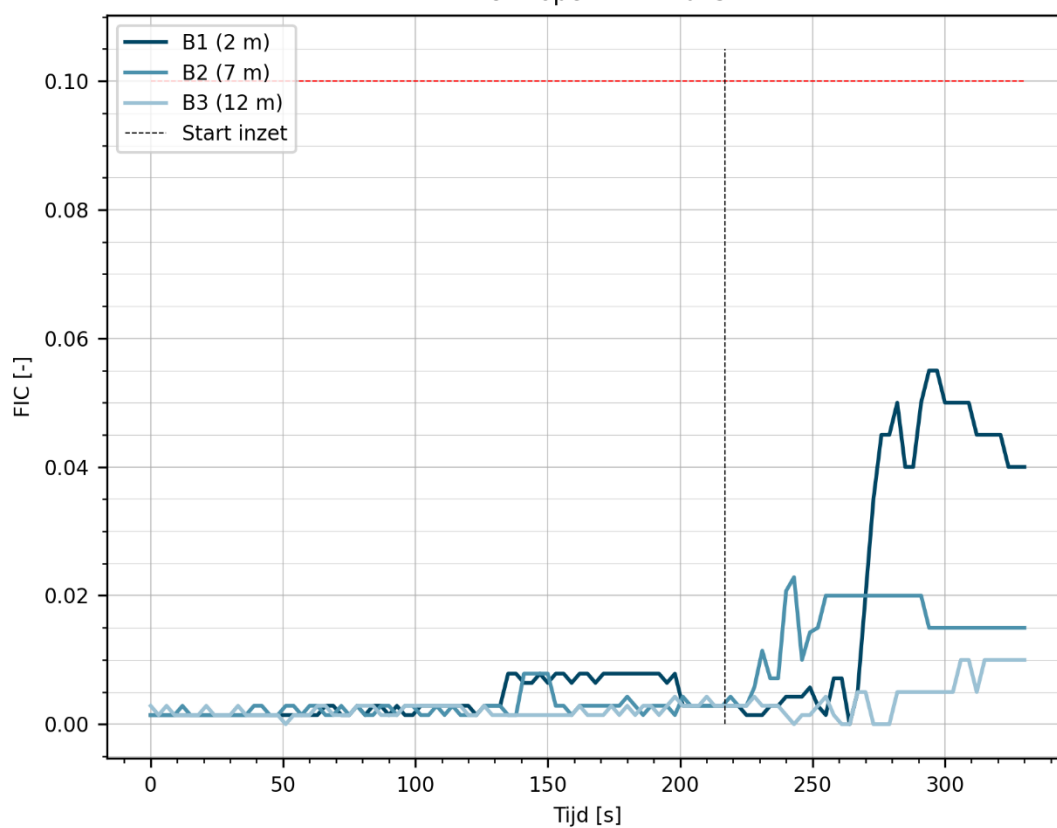
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD OB open - #1 2025



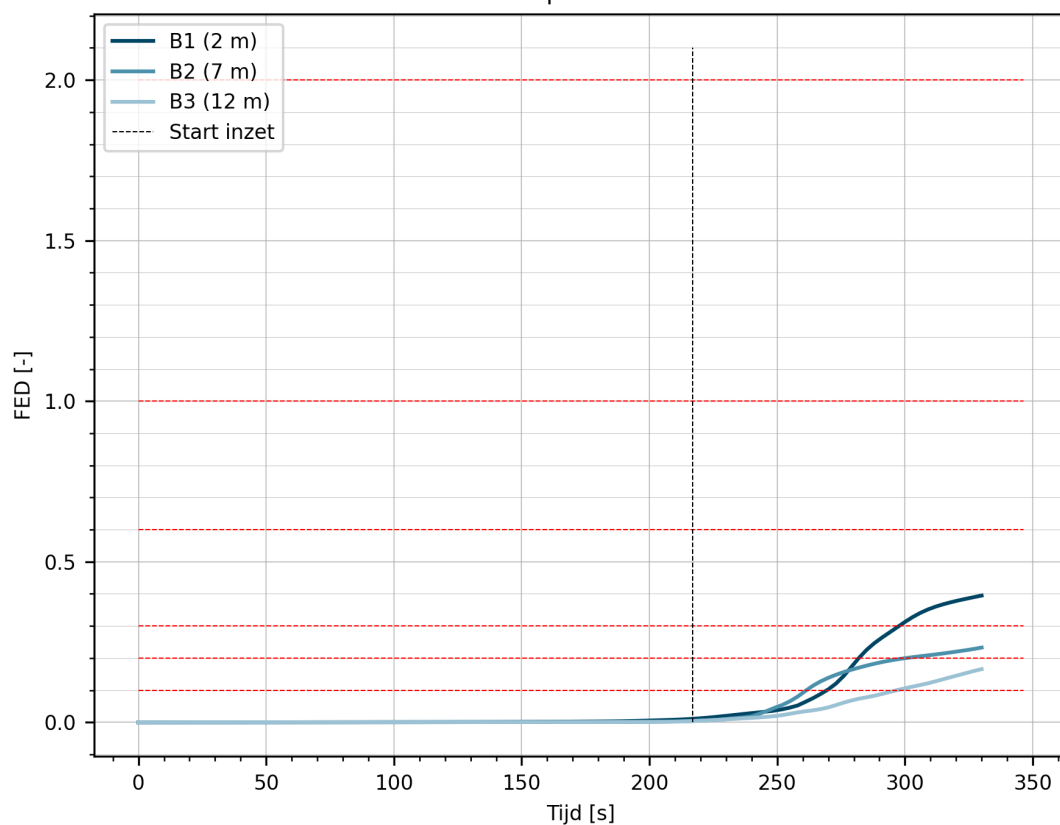
Irriterende gassen (dosis)
LD OB open - #2 2025



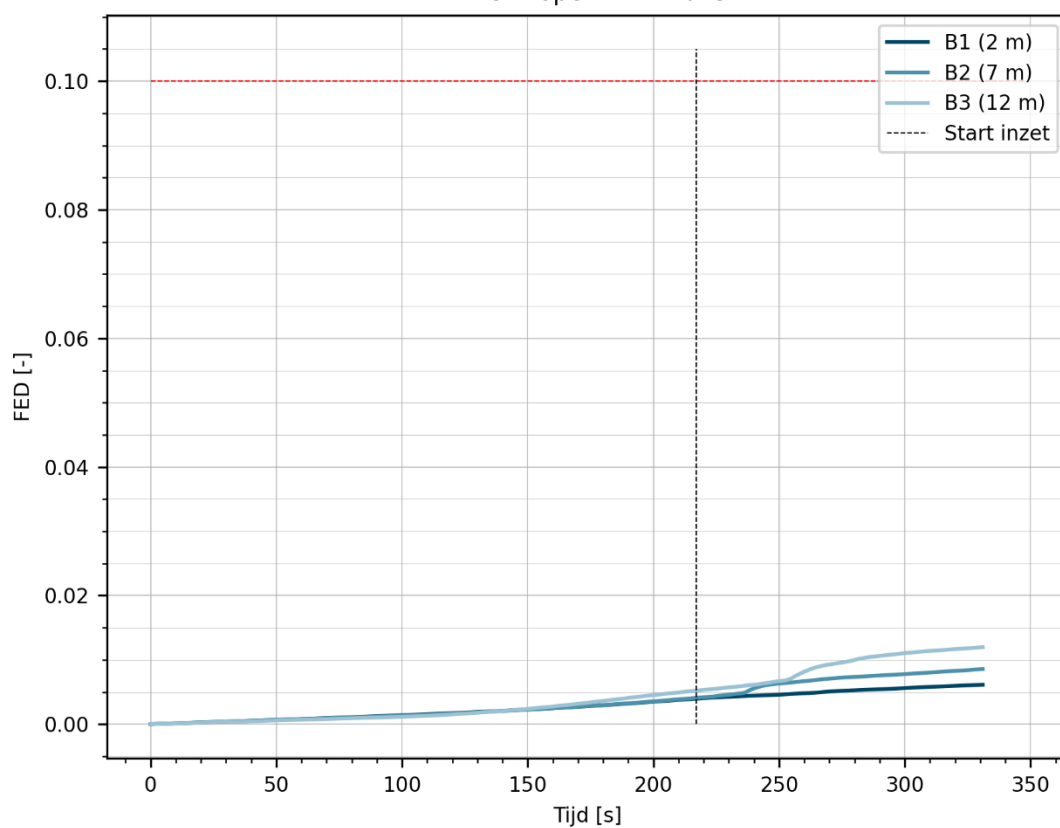
Irriterende gassen (concentratie)
LD OB open - #2 2025



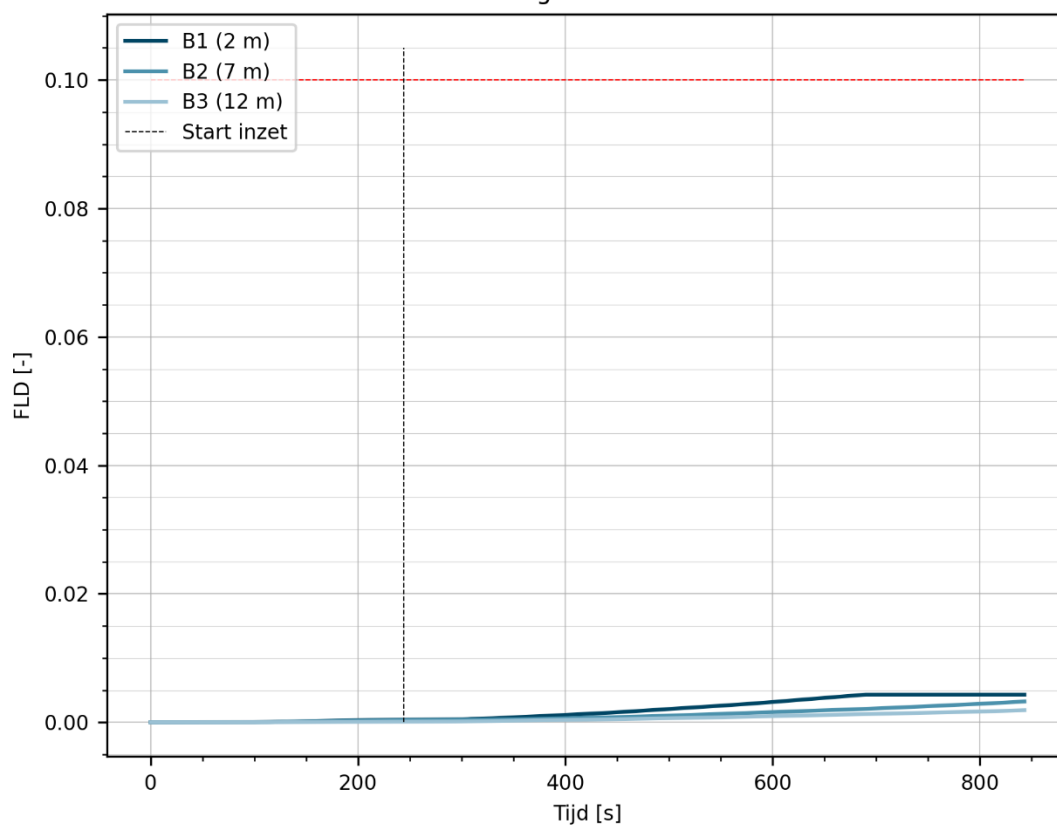
Verstikkende gassen (dosis)
LD OB open - #2 2025



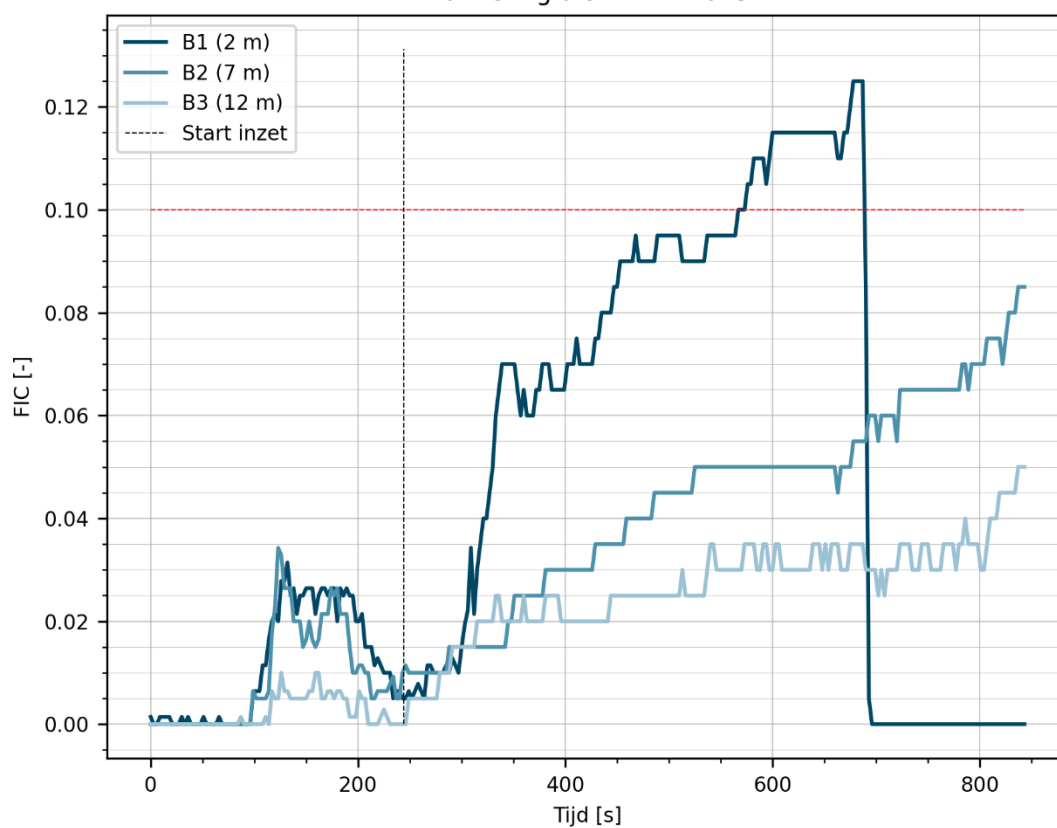
Warmteflux (dosis) 0.3 m
LD OB open - #2 2025



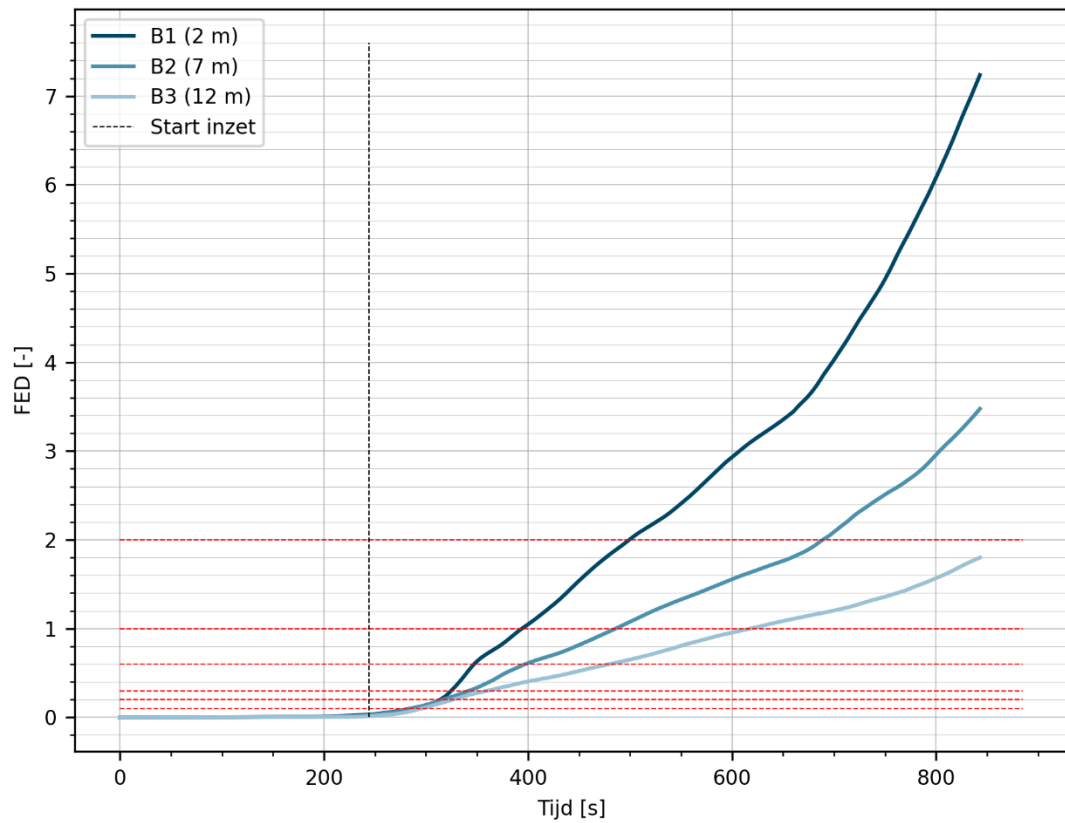
Irriterende gassen (dosis)
Nulmeting dicht - #1 2025



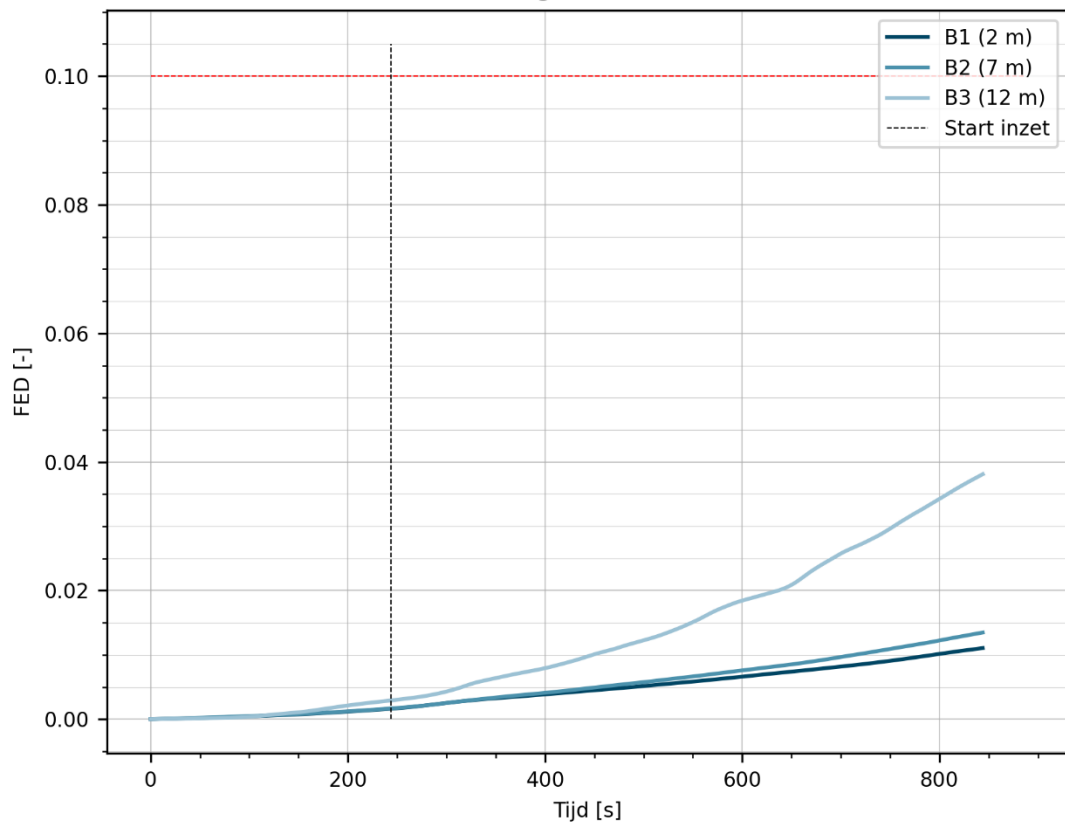
Irriterende gassen (concentratie)
Nulmeting dicht - #1 2025



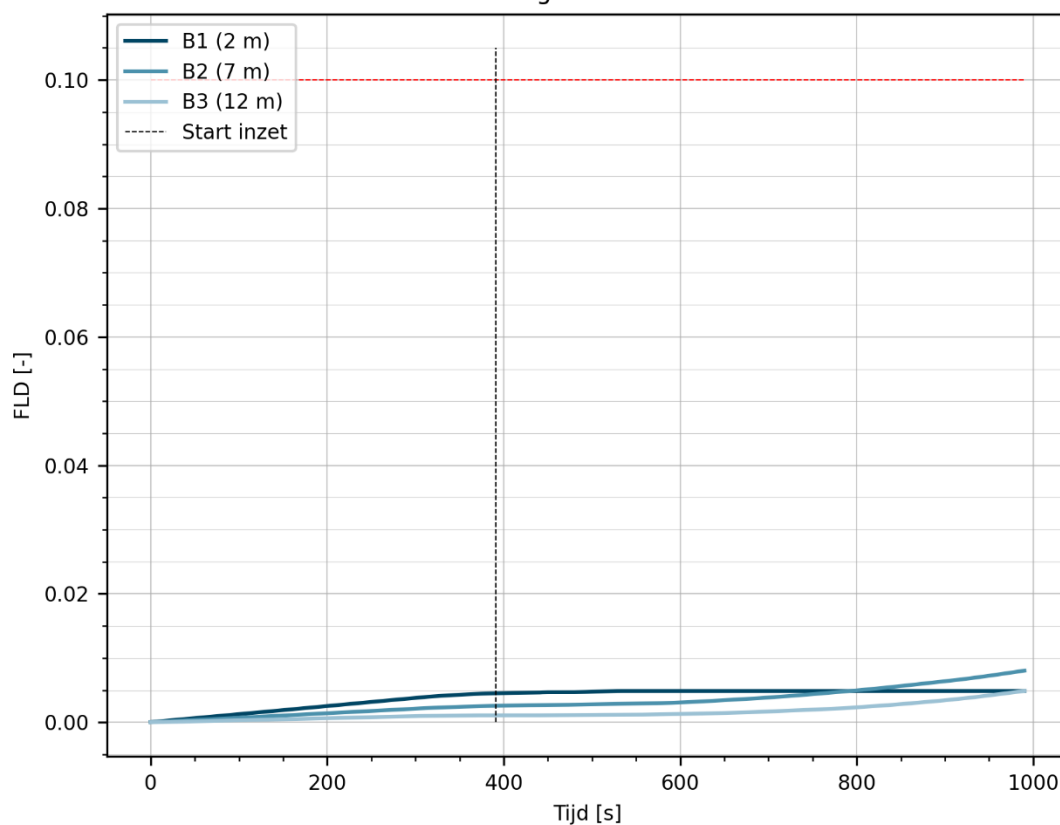
Verstikkende gassen (dosis)
Nulmeting dicht - #1 2025



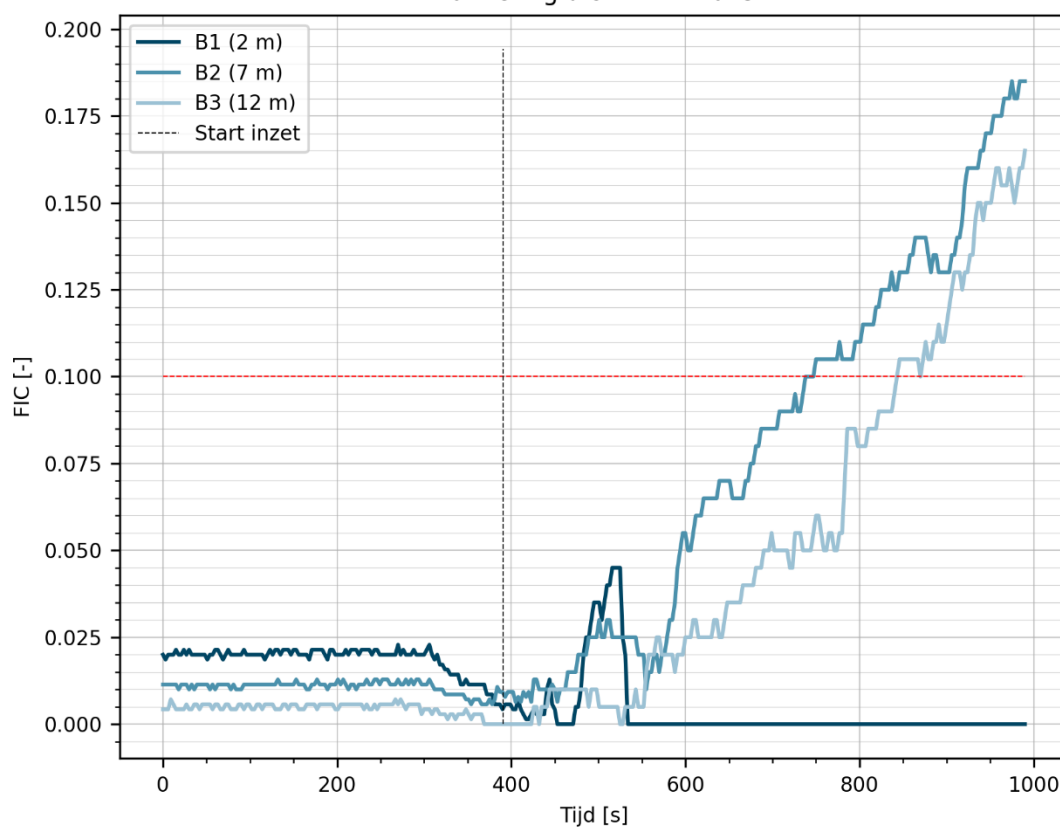
Warmteflux (dosis) 0.3 m
Nulmeting dicht - #1 2025



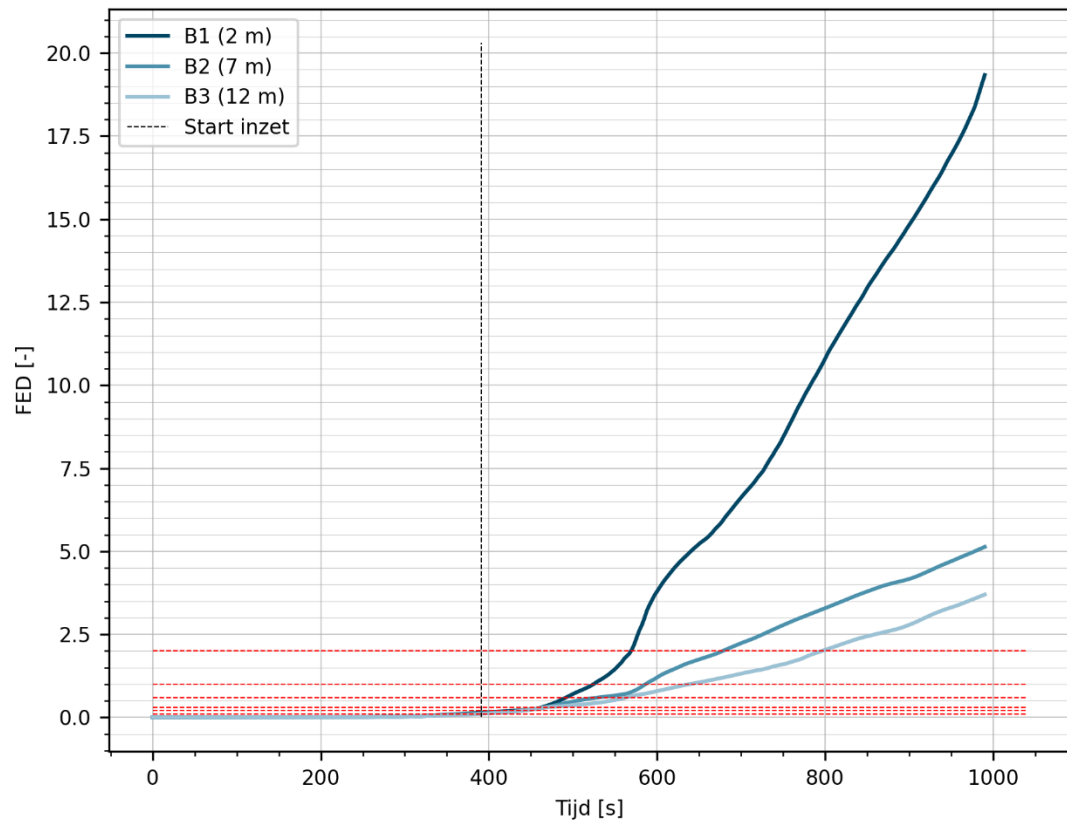
Irriterende gassen (dosis)
Nulmeting dicht - #2 2025



Irriterende gassen (concentratie)
Nulmeting dicht - #2 2025



Verstikkende gassen (dosis)
Nulmeting dicht - #2 2025



Warmteflux (dosis) 0.3 m
Nulmeting dicht - #2 2025

