

# HyDelta 2

## **WP5 – Safe operations of the high-pressure transmission grid**

### D5.1 – Afblazen en affakkelen

Status: final

## Document samenvatting

### Corresponderende auteur

<b>Corresponderende auteur</b>	Nard Vermeltfoort
<b>Verbonden aan</b>	Kiwa Technology B.V.
<b>E-mailadres</b>	Nard.Vermeltfoort@kiwa.com

### Document historie

Versie	Datum	Auteur	Samenvatting van de wijzigingen
1	12-Mei-2023	Nard Vermeltfoort (Kiwa), Sander Lueb (Kiwa), Néstor González Díez (TNO), Harmen Slot (TNO)	Eerste concept versie.
2	16-Juni-2023	Nard Vermeltfoort (Kiwa), Sander Lueb (Kiwa), Néstor González Díez (TNO), Harmen Slot (TNO)	Tweede concept versie.
3	28-Juni-2023	Nard Vermeltfoort (Kiwa), Sander Lueb (Kiwa), Néstor González Díez (TNO), Harmen Slot (TNO)	Concept tbv Supervisory Group

### Verspreidingsniveau

<b>PU</b>	Publiek	X
<b>RE</b>	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> <li>Project partners inclusief Expert Assessment Group</li> <li>Externe entiteit met wie een geheimhoudingsplicht bestaat</li> </ul>	

### Document review

Partner	Naam
Stedin	Gilles de Kok
Gasunie	Martin van Agteren
Gasunie	Martin Hommes
DNV	Pieter Wolff
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group

## Samenvatting

In het kader van het nationale onderzoeksprogramma HyDelta is een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden om hoge druk waterstof transportleidingen drukloos te maken door middel van afblazen en affakkelen. Het onderzoek zoals beschreven in dit rapport is onderdeel van het werkpakket 5 “Veilige werken aan het hoge druk transportnet”.

Gasunie heeft de opdracht gekregen een landelijk waterstof transport systeem te maken. Tijdens de bedrijfsvoering van dit netwerk moeten er soms aanpassingen en/of uitbreidingen gemaakt worden aan dit transportsysteem. Om dit veilig te doen dient er in sommige gevallen waterstof gecontroleerd uit het netwerk gehaald worden. Dit zal allereerst worden gedaan door druknivellering en daarna door hercompressie. Het restant aan waterstof dat dan nog in het transportnet aanwezig is zal via afblazen of affakkelen verwijderd moet te worden.

Om vast te stellen of hoge druk waterstofleidingen met behulp van afblazen en affakkelen drukloos gemaakt kunnen worden zijn er dertien specifiekere onderzoeksvragen geformuleerd. Deze zijn beantwoord door uitvoering van theoretisch en praktisch onderzoek.

Het theoretisch onderzoek beschouwd de verschillen tussen afblazen en affakkelen in het algemeen en maakt een vergelijking tussen het affakkelen van aardgas en van waterstof. Daarnaast is er informatie vanuit de markt gehaald door het interviewen van een tweetal industriële grootverbruikers die bekend zijn met het affakkelen van waterstof. Tevens is er gesproken met twee leveranciers van fakkelininstallaties.

Bij het praktisch onderzoek is de fakkelininstallatie beoordeeld op;

- Het gedrag bij directe ontsteking
- Het gedrag bij vertraagde ontsteking
- De kans op vlaminslag

Bij de verschillende metingen zijn o.a. het debiet, de warmtestraling, het vlambeeld, de geluidsniveau's, de windsnelheid en de NOx-emissies vastgelegd.

De gehanteerde fakkelininstallatie en de bevindingen van de experimenten zijn getoetst aan de theorie en aan verschillende rekenmodellen. Hierbij zijn met name het stromingsprofiel door de vlamdover, de vlamhoogte, de warmtestraling en de geluidsproductie met elkaar vergeleken.

De algehele conclusie is dat affakkelen de voorkeur heeft boven afblazen. Dit nadat uitbufferen en hercompressie heeft plaats gevonden. Met de gebruikte fakkelininstallatie is aangetoond dat het affakkelen van debieten in de ordegrootte van 500, 2.500, 4.000 en 6.000 Nm<sup>3</sup>/h mogelijk is. Bij de uitgevoerde experimenten was er geen sprake van overmatige geluidsproductie of excessen in drukgolven. Het wordt aanbevolen om na te gaan in hoeverre de verkregen resultaten geëxtrapoleerd kunnen worden voor de toepassing van het affakkelen van grotere debieten en bij grotere diameters.

De hoeveelheid gevormd NOx is een punt van aandacht. Het wordt aanbevolen om nader onderzoek uit te voeren naar NOx-reducerende maatregelen. Voor het ontwerp van waterstoffakkelininstallaties kan gebruik worden gemaakt van bestaande theoretische modellen. De resultaten verkregen bij de experimenten blijken een redelijke overeenstemming te hebben met de theoretische bevindingen. Door een beperkte beschikbaarheid van mobiele waterstof fakkelininstallaties, wordt er aanbevolen om een marktconsultatie te houden met gespecialiseerde leveranciers om de voorwaarden te creëren die nodig zijn voor de ontwikkeling van commerciële producten op middellange termijn.

## Inhoud

Document samenvatting .....	2
Samenvatting.....	3
Inhoud .....	4
1. Inleiding .....	6
1.1 Algemeen.....	6
1.2 Probleemstelling.....	6
1.3 Doelstelling.....	6
1.4 Specifiekere onderzoeksvragen .....	7
2. Afblazen en Affakkelen.....	8
2.1 Inleiding .....	8
2.2 Affakkelen.....	9
2.3 Vergelijking tussen het fakkelen van waterstof en aardgas.....	10
2.4 Marktverkenning .....	11
2.5 NOx-emissies bij fakkelinstallaties .....	14
3. Werkwijze en beschrijving van de experimentele opstelling .....	15
3.1 Werkwijze van de uitgevoerde experimenten .....	15
3.2 Schematische weergave van de meetopstelling .....	16
3.3 Gegevens van de gebruikte apparatuur.....	18
3.3.1 De fakkelt .....	18
3.3.2 Debietmeter en Drukmeter .....	19
3.3.3 Geluidsmeter .....	19
3.3.4 Rookgasanalyzer .....	21
3.3.5 Warmtestralingssensor .....	21
3.3.6 Windmeter .....	22
3.3.7 Thermische beeld camera .....	22
4. Resultaten van het experimenteel onderzoek.....	23
4.1 Directe ontsteking .....	23
4.2 Vertraagde ontsteking.....	24
4.3 Maximaal debiet testen.....	27
4.4 Geluidsmetingen .....	30
4.4.1 Resultaten geluidsmetingen directe ontstekingen .....	30
4.4.2 Resultaten geluidsmetingen vertraagde ontstekingen .....	31
4.5 NOx-emissies metingen.....	31
4.6 Conclusies van de experimentele onderzoeken.....	33
5. Modelleren van het waterstof-fakkelen .....	34

5.1	Doelen van modelleren .....	34
5.2	Toepassing op experimentele opstelling.....	34
5.2.1	Stroomprofiel langs de leidingen .....	34
5.2.2	Beschrijving van de vlam .....	38
5.2.3	Warmtestraling.....	39
5.2.4	Geluid .....	41
6.	Conclusie, discussie en aanbevelingen.....	45
6.1	Conclusies experimenteel onderzoek .....	45
6.2	Conclusies theoretisch onderzoek .....	45
6.3	Discussies.....	46
6.4	Aanbevelingen.....	47
7.	Beantwoording van onderzoeksvragen.....	48
8.	Literatuur .....	50
9.	Bijlagen .....	51
9.1	Grafieken NOx-emissies en overige NOx-meetresultaten .....	51
9.2	Momenten van ontsteking en geluidspieken vertraagde ontsteking .....	54

## 1. Inleiding

### 1.1 Algemeen

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het nationale onderzoeksprogramma HyDelta. Dit programma is gericht op het veilig inpassen van waterstof in de bestaande infrastructuur voor gastransport en gasdistributie en heeft als doel om barrières voor innovatieve waterstofprojecten weg te nemen. Het volledige onderzoeksprogramma is ingedeeld in werkpakketten. Voor een toelichting op de verschillende werkpakketten zie [www.hydelt.nl](http://www.hydelt.nl).

### 1.2 Probleemstelling

Gasunie heeft de opdracht gekregen een landelijk waterstof transport systeem te maken. Tijdens de bedrijfsvoering van dit netwerk moeten er soms aanpassingen en/of uitbreidingen gemaakt worden aan dit transportsysteem. Om dit veilig te doen dient er in sommige gevallen waterstof gecontroleerd uit het netwerk gehaald worden. De optie met de minste uitstoot van gas zou zijn door eerst de druk te nivelleren (uitbufferen) en daarna het gas te hercompresseren. Echter, met hercompressie is het niet mogelijk om een leiding volledig H<sub>2</sub>-vrij te krijgen: het laatste deel achtergebleven waterstof dient afgeblazen of afgefakkeld te worden.

In dit werkpakket worden de methodes eerst theoretisch beschouwd. Omdat in het begin van het onderzoek naar voren kwam dat vanwege het indirect broeikasgas effect van H<sub>2</sub> affakkelen de voorkeur heeft t.o.v. afblazen hebben de experimentele onderzoeken zich vooral gericht op affakkelen. Affakkelen heeft daarnaast ook de voorkeur t.o.v. afblazen vanwege de veiligheid: als een gaswolk van waterstof bij het afblazen onverhoopt alsnog ontsteekt kunnen de gevolgen bij waterstof veel groter zijn dan bij aardgas door de hogere vlamsnelheid van waterstof. Volgens de huidige Gasunieprocedures voor aardgas kan via hercompressie de nominale werkdruk verlaagd worden van 67 barg naar 7 barg. In dit onderzoek is het uitgangspunt dat deze drukken ook van toepassing zijn op het toekomstig waterstoftransportsysteem. Bij de druk van 7barg zal het affakkelen plaats gaan vinden. Affakkelen met een druk van 7 barg komt overeen met de hoogste drukken waarbij regionale netbeheerders gaan affakkelen. In het hoge druk leidingsysteem van de regionale netbeheerders heerst een maximale druk van 8 barg. Voordat regionale netbeheerders waterstof in hun hoge druk distributieleiding gaan affakkelen zullen zij eerst de druk verlagen via afname vanuit het lage druk net. De resultaten in dit rapport zijn in ieder geval toepasbaar bij het affakkelen met drukken < 8 barg.

In deze rapportage worden de uitgevoerde experimentele testen, en de behaalde resultaten beschreven. Daarnaast worden modellen beschreven die nuttig zijn om voorspellingen te kunnen doen met betrekking tot het werken met fakkelininstallaties. Deze modellen kunnen gebruikt worden om nieuwe fakkelininstallaties te simuleren zodat hun werking bij grotere debieten kan worden onderzocht voordat deze in de praktijk getest worden.

### 1.3 Doelstelling

Vaststellen op welke wijze hoge druk waterstof transportleidingen veilig drukloos gemaakt kunnen worden door middel van afblazen en primair affakkelen. Hierbij is het uitgangspunt dat de hoge druk voorafgaande aan het affakkelen zoveel als mogelijk wordt verlaagd door bijvoorbeeld afname en hercompressie.

#### 1.4 Specifiekere onderzoeksvragen

Om aan de genoemde doelstelling te voldoen zijn specifieke onderzoeksvragen opgesteld. Deze onderzoeksvragen zijn als volgt;

- Welke (industriële) standaarden zijn er voor afblazen/affakkelen?
- Zijn er waterstof fakkelininstallaties te koop?
- Wat zijn de verschillen met aardgas wat betreft afblazen en affakkelen?
- Wat zijn de uitgangspunten voor veiligheid?
- Wat is de warmtestraling van een fakkel voor waterstof?
- Wat is de maximale druk in de fakkelininstallatie?
- Wat gebeurt er met de brander? Wat wordt de omvang van de vlam?
- Kan waterstof ontstoken worden bij de verschillende debieten/uitstroomsnelheden?
- Wat is het effect van vertraagd ontsteken?
- Kan detonatie optreden bij vertraagde ontsteking? (theoretische beschouwing)
- Kan bij het afblazen ongewenste ontsteking ontstaan? (bijv. door elektrische ontlading of wrijving door de hoge snelheden)
- Wat zijn de effecten van het affakkelen indien de leiding bijna leeg is?
- Welke NOx-emissies treden op?

De experimenten zijn uitgevoerd op het Twente Safety Campus (TSC). De Gasunie was op dat moment bezig met een andere langdurende test die gecombineerd kon worden met deze fakkeltesten.

## 2. Afblazen en Affakkelen

### 2.1 Inleiding

De toenemende schaal van de adoptie van waterstof als energiedrager leidt tot de noodzaak om waterstof over lange afstanden te transporteren van de productie naar de eindgebruikers. Dit is bijvoorbeeld het geval bij grootschalige offshore windparken die verbonden zijn met power-to-gas installaties, die de geproduceerde waterstof naar de kust sturen; of internationaal transport van landen die grote hernieuwbare elektriciteitsproductiecapaciteit ontwikkelen naar landen met grote industriële vraag. Om waterstof via buisleidingen over lange afstanden te transporteren, blijkt een transportsysteem gebaseerd op hoge druk meestal het meest economisch te zijn, zoals dat ook het geval is bij het transport van aardgas [1].

In de operatie van dergelijke hogedruk (waterstof) buisleidingsystemen kan het noodzakelijk zijn snel de druk in een bepaald (begrensd) segment van het systeem te kunnen reduceren. Dit kan nodig zijn in noodsituaties of bij gepland onderhoud. In de eenvoudigste oplossing, die typerend is voor de meeste systemen, wordt het segment van het systeem dat ontlast moet worden begrensd met afsluiters of andere equipment. Het geïsoleerde volume wordt ofwel naar de omgeving afgeblazen ofwel affakkeld, als her-compressie niet beschikbaar of mogelijk is. Voor transportsystemen wordt altijd de voorkeur gegeven aan affakkelen boven afblazen vanwege de potentie van aardgas als broeikasgas. Systeembeheerders maken gebruik van her-compressie om het gas van het geïsoleerde segment van het transmissiesysteem naar een naburig segment te leiden. Dit is uitsluitend mogelijk bij korte stukken van de onderbreking, of gelijke infrastructuur in de nabijheid of lage hoeveelheden om in tubes te pompen. Her-compressie apparatuur bestaat uit een kleine compressor gemonteerd op een aanhanger die naar verschillende segmenten van het netwerk kan worden gebracht. Toepassen van her-compressie betekent dat er minimale milieuschade wordt veroorzaakt en dat er geen waardevol product verloren gaat. Natuurlijk is dit alleen mogelijk wanneer het drukloos deel uitmaakt van een geplande activiteit.

Omdat her-compressie apparatuur voor waterstof momenteel commercieel nog niet of beperkt beschikbaar is en bovendien niet toereikend is om het gehele systeem drukloos te maken, moet de drukverlaging worden uitgevoerd door ofwel afblazen ofwel affakkelen. In beide gevallen wordt een tijdelijke mobiele installatie toegepast. Het is niet vanzelfsprekend dat, net zoals voor aardgas, waterstof beter gefakkeld dan afgeblazen kan worden. Affakkelen brengt ook risico's met zich mee die mogelijke milieutechnische voordelen niet kunnen compenseren. Tot zeer recent werden er in onderzoeken weinig aandacht besteedt aan het potentieel van waterstof als broeikasgas. Recente literatuur [2] geeft aan dat waterstof wel een impact heeft als een indirect broeikasgas. De beste optie tussen affakkelen en afblazen is mogelijk sterk afhankelijk van lokale omstandigheden. Over het algemeen moeten de volgende perspectieven worden onderzocht:

- Veiligheid: het brede ontvlambaarheidsbereik van waterstof in combinatie met zijn lage ontstekingsenergie creëert risico's voor vertraagde of onbedoelde ontsteking tijdens afblazen. Het afgeblazen waterstof uit een hogedruksysteem zal snel verspreiden en brandbare mengsels vormen met atmosferische lucht, wat kan leiden tot catastrofale ongevallen als er een ontstekingsbron aanwezig is. Ook affakkelen is niet vrij van veiligheidsrisico's, hoewel het een gecontroleerd proces is. De operatie moet worden gemonitord en personeel moet op voldoende veilige afstand zijn om zichzelf te beschermen tegen stralingshitte.



- Milieueffecten: verbrande waterstof in een fakkel zal voornamelijk waterdamp produceren, maar door de hoge vlamtemperatuur is het ook meer geneigd om stikstofoxiden te vormen. Het is recentelijk aangetoond dat afgeblazen waterstof indirect potentieel voor opwarming van de aarde met zich meebrengt.
- Regelgevende voorwaarde: de operatie moet worden uitgevoerd met respect voor lokale regelgeving in het kader van milieu, veiligheid en ten aanzien van verstoring van de gemeenschap rond de locatie van de afblazen- of affakkelininstallatie.

De huidige overheersende mening is dat, gezien waterstof kan bijdragen aan het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen in het energie-vraagstuk, affakkelen de voorkeur heeft boven afblazen om de beoogde minimale uitstoot van CO<sub>2</sub> te realiseren.

## 2.2 Affakkelen

In de context van waterstofproductie in de industrie, is het affakkelen van waterstof de gecontroleerde verbranding van waterstofgas onder atmosferische omstandigheden door middel van speciaal daarvoor geschikte affakkelininstallaties. Gecontroleerde verbranding van waterstof kan voorkomen in processen waarbij waterstof wordt geproduceerd als een bijproduct van olie- en gasproductie, raffinage of andere chemische productieprocessen. Het affakkelen van waterstof komt al voor in de context van industriële installaties. De operatie kan worden uitgevoerd voor mengsels van waterstof met andere gassen of voor bijna zuivere waterstof<sup>1</sup>. Hoe de affakkeloperatie kan worden uitgevoerd, wordt bepaald door normen die betrekking hebben op vier hoofdgebieden:

- Milieuregelgeving: deze regels kunnen limieten stellen aan de hoeveelheid waterstof die mag worden afgefakkeld in het geval er verontreinigende stoffen worden gevormd, evenals de duur en frequentie van het affakkelen.
- Arbo-standaarden: er kunnen normen zijn om werknemers te beschermen tegen gevaren die voortvloeien uit de operatie, zoals verhoogd geluid of warmtestraling.
- Energie-efficiëntie normen: affakkelen is niet een zeer efficiënte manier om overtollig gas te verwijderen, omdat het resulteert in het verlies van een waardevolle energiebron. Sommige landen hebben normen geïmplementeerd om het gebruik van efficiëntere methoden van afvalverwerking aan te moedigen, zoals het opvangen en hergebruiken van het gas of het omzetten ervan in elektriciteit.
- Industrie specifieke normen: er zijn ook industrie specifieke normen die van toepassing zijn op waterstof affakkelen. De olie- en gasindustrie heeft bijvoorbeeld normen met betrekking tot affakkelen die specifiek zijn voor die industrie.

Normen die toegepast kunnen worden op het affakkelen van waterstof zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Lijst van standaarden die op waterstof fakkelen kunnen worden toegepast.

Standard	Title	Edition	Region
API 521	Pressure-Relieving and Depressuring Systems	2020	USA
ASME B31.12	Hydrogen Piping and Pipelines	2020	USA
EIGA 121	Hydrogen Pipeline Systems	2014	Europe
EIGA 15	Gaseous Hydrogen Installations	2021	Europe
EIGA 211	Hydrogen Vent Systems for Customer Applications	2017	Europe
NFPA 55	Standard for the Storage, Use, and Handling of Compressed Gases and Cryogenic Fluids in Portable and Stationary Containers, Cylinders, and Tanks	2023	USA

<sup>1</sup> In de context van dit document wordt pure waterstof aangenomen als representatief voor de waterstof die zal stromen in de transportnetwerken van waterstofpijpleidingen.

### 2.3 Vergelijking tussen het fakkelen van waterstof en aardgas

In het algemeen worden de gassen die verbrand moeten worden naar een afgelegen locatie geleid, soms op een verhoogde positie, en verbrand in een vlam met behulp van een speciaal ontworpen brandertip. Soms worden er bepaalde gassen ingespoten om de mengefficiëntie te bevorderen. Het verbrandingsproces kan alleen worden gestart wanneer drie elementen aanwezig zijn: 1) een brandstof, 2) een oxidatiemiddel en 3) een ontstekingsbron. Echter, de brandstofcomponent moet voldoen aan een concentratievereiste: als de concentratie van de brandstof te laag is (d.w.z. onder de onderste ontvlambaarheidsgrens), zal er geen verbranding plaatsvinden. Op dezelfde manier, als het brandstofmengsel te rijk is (d.w.z. de concentratie van de brandstof is hoger dan de bovenste ontvlambaarheidsgrens), zal er geen verbranding plaatsvinden. Verbranding in een fakkel is een turbulent proces. Ongewenste neveneffecten zijn onder andere (warmte)straling, geluid, en emissies van NO<sub>x</sub>/CO. Deze effecten kunnen worden verminderd door een goed ontwerp van de fakkel en het fakkelproces.

In deze alinea worden de belangrijkste verschillen tussen het fakkelproces van waterstof en aardgas gedetailleerd beschreven, en hoe deze verschillen vereisen dat het fakkelontwerp wordt aangepast. Tabel 2 geeft een aantal eigenschappen van aardgas en waterstof die relevant zijn voor het fakkelen.

Tabel 2 Beknopt overzicht van Tabel 2 eigenschappen van aardgas en waterstof gerelateerd aan het fakkelen.

Property	Natural Gas	Hydrogen	Unit
Dichtheid (normaalcondities )	0.72	0.09	kg/m <sup>3</sup>
Diffusiecoëfficiënt	0.016	0.061	m <sup>2</sup> /s
Vlamsnelheid	0.4	1.7-3.5	m/s
Vlamtemperatuur	1937	2182	°C
Verbrandingswaarde (Hi, normaalcondities)	31.65	10.8	MJ/Nm <sup>3</sup>
Stoichiometrische luchtbehoefte	0.31	0.24	kg/MJ
Zichtbaarheid	Zichtbaar – Blauw/gele vlam	Zichtbaar in infra-rood	
Emissies	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O and trace constituents	H <sub>2</sub> O en N <sub>2</sub> ; risico van NO <sub>x</sub> productie	
Geluid		Het geproduceerde geluid is aanzienlijk groter in vergelijking met aardgas, vanwege de hoge uitlaatsnelheid. Het geproduceerde geluid heeft een hoge frequentie.	

Uit Tabel 2 kunnen we uit de waarden van de (bulk)dichtheid (bij atmosferische condities) en de diffusiecoëfficiënt afleiden dat waterstof sneller zal uitzetten in een bepaald volume ten opzichte van aardgas. Dit resulteert in een hogere vlam: waterstofvlammen tot 6 meter hoogte zijn niet ongebruikelijk. Als gevolg van de lagere dichtheid van waterstof, bij een gegeven druk en brander geometrie, zal de resulterende volumestroom ongeveer 3 keer groter zijn in vergelijking met die van aardgas.

Een typisch brander ontwerp omvat verschillende componenten en een vuurvaste keel of tegel. De verhoogde vlamtemperatuur van waterstof ten opzichte van die van aardgas vereist een verhoogde kwaliteit van het staal (of ander toegepast metaal) dat wordt gebruikt voor de constructie van de

nozzle, keel en vlamstabilisatoren naar een hoogwaardigere roestvrijstalen of gelegeerde variant. Het staal dat wordt gebruikt in branders die waterstof verbranden, mag niet gevoelig zijn voor waterstofbroosheid en voor aantasting door waterstof bij hoge temperaturen. Beide fenomenen kunnen een onjuist gekozen staal vroegtijdig degraderen, wat leidt tot vroegtijdig falen van de onderdelen van de brander.

Verbrandingsprocessen met lucht als brandstof boven  $T=1371\text{ °C}$  zijn gevoelig voor de vorming van stikstofoxiden ( $\text{NO}_x$ ) door de reactie van  $\text{N}_2$  met  $\text{O}_2$ . De verhoogde vlamtemperatuur van waterstof heeft daarom een verhoogd risico op de vorming van  $\text{NO}_x$  in vergelijking met de verbranding van aardgas.

Uit Tabel 2 blijkt dat waterstof een aanzienlijk hogere vlam-snelheid heeft vergeleken met aardgas. Dit betekent dat als de volumestroom van lucht en waterstof naar het verbrandingsgebied lager is dan de verbrandingssnelheid, het verbrandingsgebied dichter bij de vlamtip zal komen. Bij voorgemengde fakkeltoepassingen bestaat er dus een risico op vlamdoorslag naar de fakkelkolom als de uitlaatsnelheid van het brandstof/luchtmengsel te laag is. Dit kan worden voorkomen door over te schakelen naar een niet-voorgemengde toepassing (bijvoorbeeld een diffusiefakkel) of door de uitlaatsnelheid voldoende hoog te houden door de uitgangsdiameter van de nozzle te verkleinen of boven een minimumdruk te handhaven. Bij voorgemengde fakkelontwerpen is het noodzakelijk om risicobeperkende maatregelen te treffen om te voorkomen dat de vlam het verbonden procesleidingwerk kan bereiken. Dit wordt doorgaans gedaan door middel van een vlamdoover. Het is belangrijk op te merken dat het ook bij diffusietype fakkels een goede praktijk is om een vlamdoover te installeren om het verbonden procesleidingwerk te beschermen tegen onvoorziene processen waarbij een vlam naar de procesleidingen kan doorslaan.

Een ander belangrijk verschil tussen waterstof en aardgas is dat waterstof gevoelig kan zijn voor ontsteking door statische elektriciteit, mogelijk door elektrostatische ontladingen aan de scherpe rand van de uitlaatopening of chemisch reactie tussen waterstof en FeO deeltjes. Volgens API 521, kunnen dergelijke elektrostatische ontladingen voorkomen worden door een toroïdale ring te installeren op de fakkeltip.

## 2.4 Marktverkenning

Er werden interviews gehouden met verschillende marktpartijen om de stand van zaken van fakkelapparatuur op relevante schaal te bepalen. In het bijzonder werden de interviews gehouden met leveranciers van mobiele fakkelapparatuur enerzijds, maar ook met petrochemische en industriële partijen die naar verwachting waterstof (van hoge zuiverheid) affakkelen in hun processen (indien nodig). In totaal werden 8 partijen benaderd, waarvan 2 uit de grootschalige industrie en 2 leveranciers van fakkels openstonden voor een interview.

Alle geïnterviewde partijen benadrukten verschillende aspecten:

- Bestaande technische richtlijnen bieden een kader voor het affakkelen van waterstof;
- Specifieke aspecten van fakkelontwerp voor waterstof: de rol van de vlamdoover (of een ander afdichtingsapparaat) in combinatie met de beschikbare druk is een belangrijk veiligheidsaspect;
- Affakkelen heeft de voorkeur boven afblazen.

Enkele belangrijke bevindingen uit elk van de interviews worden hieronder gegeven:

#### **Grootschalige industriële gebruiker 1**

- Gebruik een lockout-tagout (LOTO) procedure om de lektheid van klepafsluiters te controleren voordat de te ontgassen segmenten worden gefakkeld.
- Een van de belangrijkste aandachtspunten is de mogelijkheid van vlamterugslag bij het fakkelen van waterstof. In het fakkel-systeem wordt een met water gevulde afscheidings-vat gebruikt om contact tussen zuurstof en waterstof te voorkomen voordat er gefakkeld wordt, zoals beschreven in API 521.
- Er wordt de voorkeur gegeven aan het fakkelen van waterstof, aangezien een ongecontroleerde ontsteking door drijfvermogen en diffusie niet gewenst is. Het afblazen van waterstof wordt daarom niet overwogen.
- Er zijn geen kennishiaten om een geschikte fakkel voor waterstoftoepassingen te ontwerpen. Er zijn normen beschikbaar en de markt is klaar om aan deze behoefte te voldoen.

#### **Grootschalige industriële gebruiker 2**

- Het is zeer waarschijnlijk dat als er wordt geventileerd (koude fakkel), er toch een vlam zal ontstaan (bijvoorbeeld als gevolg van Joule-Thomson-verwarming), daarom heeft fakkelen de voorkeur. Afblazen van waterstof zal vrijwel zeker leiden tot ontsteking met een bijbehorende knal. De vlam zal doven als de uitlaatsnelheid van waterstof voldoende hoog is.
- Waterstof stroomt snel en brandt bij hoge temperaturen, dus verwacht verhoogde geluidsproductie en warmtestraling als gevolg daarvan.
- Het fakkelen van waterstof wordt als relatief veilig beschouwd en standaardmodellering is adequaat. Bijvoorbeeld, richtlijnen met betrekking tot warmtestraling van fakkels kunnen worden gevonden in referentie [3]. De belangrijkste ontwerpparameters voor een fakkelsysteem (dimensionering, geluid) kunnen worden berekend met bestaande modellen zonder gebruik van CFD.
- Fakkels zullen op een hoge positie worden geplaatst, waarbij 6 meter niet ongebruikelijk is. Mobiele fakkels zijn doorgaans koude fakkels, het organiseren van hete fakkels is moeilijk (afhankelijk van de locatie). De blootstelling van mensen aan warmtestraling bepaalt de afstanden voor personeel en het publiek rondom de fakkel.
- Een fakkel zoals bedoeld voor aardgas kan ook ingezet worden voor waterstof, maar er zijn wel aanpassingen nodig. Bij aanpassingen valt te denken aan de toepassing van een tegendrukregelaar, de toepassing van een vlamdover, het verwijderen van eventuele voormenging en aanpassing van de tip van de brander.
- Afhankelijk van het land worden tijdelijke fakkels (bijvoorbeeld tot 200 uur gebruik) niet gereguleerd. Permanente fakkels wel.

#### **Leverancier 1**

- Het fakkelen van waterstof komt voornamelijk voor in de chemische industrie en is momenteel geen gebruikelijke praktijk in (hogedruk) transportleidingssystemen.
- In principe is het mogelijk om een niet-voorgemengd fakkelsysteem dat is ontworpen voor aardgas toepassingen te gebruiken voor het fakkelen van waterstof, maar er is een beperking in de vorm van een vereiste minimale drijvend drukverschil; een lagere uitlaatsnelheid zorgt voor luchtinlaat, wat het risico op vlamterugslag verhoogt. Je hebt ook een vlamdover en zelfs een detonatiedemper nodig in geval van een drukgolf die zich in het fakkelsysteem voortplant.

- De warmte-impact is laag en de warmtestraling is beperkter, waterstof verbrandt snel en maakt veel geluid.
- De vlam is niet zichtbaar - in het verleden zijn dieren verwond omdat ze de vlam niet konden zien. Er zijn UV of IR-camera's nodig om de status van de vlam te controleren.
- Afgesloten fakkels genieten de voorkeur uit milieu- overwegingen: het proces in het interne volume wordt gecontroleerd en het geluid wordt geblokkeerd.

## Leverancier 2

- Het fakkelen van waterstof wordt beschouwd als een speciale operatie waarvoor veiligheidsoverwegingen nodig zijn.
- Mobiele fakkels die in gebruik zijn [in het land waar de leverancier is gevestigd], hebben gesloten vlammen vanwege emissieregels de voorkeur. De instroom van lucht wordt geregeld door temperatuurmeting in de vlamzone. Isolatie met keramische materialen wordt gebruikt om de warmte te behouden.
- Een grote fakkel geschikt voor 3000 Nm<sup>3</sup>/h kan 3 meter breed, 10 meter hoog en 4 ton zwaar zijn. Het is lastig om dit mobiel te maken.
- Het gebruik van de fakkel als "open fakkel" is alleen toegestaan voor noodsituaties, tot 200 uur per jaar.
- Een vlamdover is noodzakelijk, maar het is een vrij duur onderdeel. Deze oplossing heeft de voorkeur boven de oplossing met het waterdichte afscheidingsvat.
- Nuttige referenties voor de regelgevende randvoorwaarden zijn bijvoorbeeld TA Luft (*Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft*) en ISO 22580.

## Opsomming

In het kort zijn de volgende observaties gedaan op basis van deze interviews:

- Ontwerp: er is voldoende kennis om een fakkel te ontwerpen die geschikt is voor waterstof met een hoge zuiverheid. Bestaande modellen of technische normen kunnen hiervoor worden gebruikt. Er moet speciale aandacht worden besteed aan waterstof met de inclusie van een vlamdover in de fakkelkolom. Een tweede observatie is de voorkeur voor afgesloten fakkels, in sommige gevallen mogen open fakkels alleen worden gebruikt voor tijdelijke operaties tot 200 uur, afhankelijk van lokale regelgeving. Er kunnen mogelijkheden zijn om aardgasfakkels te hergebruiken voor waterstof, hoewel hierover geen duidelijke verklaring is ontvangen.
- Exploitatiefase: het is het beste om te fakkelen in vergelijking met afblazen. Fakkelen is veiliger wat betreft het voorkomen van ongecontroleerde ontstekingen en het is milieuvriendelijker (vanwege recent ontwikkelde kennis over het potentiële indirecte broeikasgasemissie van waterstof). Veiligheid voor personeel en het publiek moet in acht worden genomen met betrekking tot warmtestraling en geluidsoverwegingen.
- Marktgeredheid: geen van de geraadpleegde partijen had ervaring met mobiele fakkels voor verhoogde waterstofdebieten, alleen stationaire en zeer kleine toepassingen.

## 2.5 NOx-emissies bij fakkelininstallaties

Bij het affakkelen van aardgas zal er naast CO<sub>2</sub> ook een deel NOx-vrijkomen. Bij het affakkelen van waterstof komt er geen CO<sub>2</sub> meer vrij, maar bestaat de kans dat de emissie NOx toeneemt. NOx kan schadelijk zijn voor mensen omdat het luchtwegklachten kan veroorzaken. NOx slaat ook neer in de natuur waardoor de biodiversiteit afneemt.

Voor stookinstallaties heeft de Nederlandse overheid emissie-eisen gesteld via het Activiteitenbesluit Emissie-eisen stookinstallaties (ABees). Deze emissie-eisen zijn afhankelijk van het type stookinstallatie, het ingaande thermisch vermogen, de soort brandstof, de bedrijfstijd en ook van het moment van in gebruikname. Voor een fakkelininstallatie die aardgas of waterstof verbrand en waarbij de warmte niet nuttig wordt gebruikt, worden geen eisen gesteld aan de emissie van NOx. Dit is ongeacht de bedrijfstijd. Voor bijvoorbeeld een verwarmingsketel < 50 MW, gestookt op aardgas en meer dan 500 bedrijfsuren per jaar, geldt volgens ABees een eis voor NOx van 70 mg/Nm<sup>3</sup> bij 3vol% O<sub>2</sub> (dit komt overeen met 35 ppm). Als de bedrijfstijd van dezelfde ketel minder is dan 500 uur per jaar dan geldt deze NOx-eis niet meer.

In de HyDelta rapportage “Literature research on low NOx hydrogen burners and developing design rules for low NOx burners” ref [4] is het effect op de NOx-emissie in geval van het verstoken van waterstof in voornamelijk industriële stookinstallaties benoemd en zijn technieken benoemd om verhoging van NOx-emissies tegen te gaan. NOx-emissies bij fakkelininstallaties worden niet in dit rapport beschreven. In dit rapport wordt bij een brander in een glas-smeltoven een waarde van 600 ppm gerapporteerd in geval van 100% waterstof.

### 3. Werkwijze en beschrijving van de experimentele opstelling

#### 3.1 Werkwijze van de uitgevoerde experimenten

Voor het afblazen en affakkelen was het oorspronkelijk de intentie om een omgebouwde aardgasfakkelinstallatie van de Gasunie in te zetten. Deze optie is komen te vervallen omdat een eventuele ombouw niet als veilig geacht werd. Er is besloten om een afblaas- c.q. fakkelinstallatie te gebruiken zoals deze momenteel op de markt is. Deze fakkelinstallatie is specifiek voor het affakkelen van waterstof ontwikkeld, met name vanwege de aanwezigheid van een vlamdover.

In het recente verleden zijn een tweetal onderzoeken uitgevoerd waarbij eveneens het affakkelen van waterstof is beschouwd. Ten op zichte van deze twee uitgevoerde onderzoeken (Kiwa Technology rapportage GT-200096 in opdracht van Netbeheer Nederland en Kiwa Technology rapportage GT-200311 in opdracht van de Gasunie) zijn de experimenten vernieuwend op de volgende gebieden:

- Grotere debieten van affakkelen
- Kwantificering/meting van warmtestraling
- NOx emissie metingen
- (uitgebreidere) vertraagde ontsteking
- Het affakkelen van waterstof uit een bijna lege leiding

Bij de experimenten zijn de debieten gevarieerd door de bediening van de afsluiter bij de buffer en het regelen van de druk via de drukregelaars bij de flessenpakketten. De metingen zijn te verdelen in de categorieën;

- Gedrag bij directe ontsteking
- Gedrag bij vertraagde ontsteking
- Beoordeling kans op vlaminslag

Het gedrag bij directe ontsteking is beoordeeld bij een viertal debieten variërend tussen 700 tot ongeveer 6.000 Nm<sup>3</sup>/h. Het vrijkomende waterstof werd ontstoken door de aanwezigheid van een vlam afkomstig van een propaanbrander. Dit betrof een integraal onderdeel van de fakkelinstallatie van Esders. In totaal zijn er acht metingen uitgevoerd met een directe ontsteking van waterstof middels de propaanbrander.

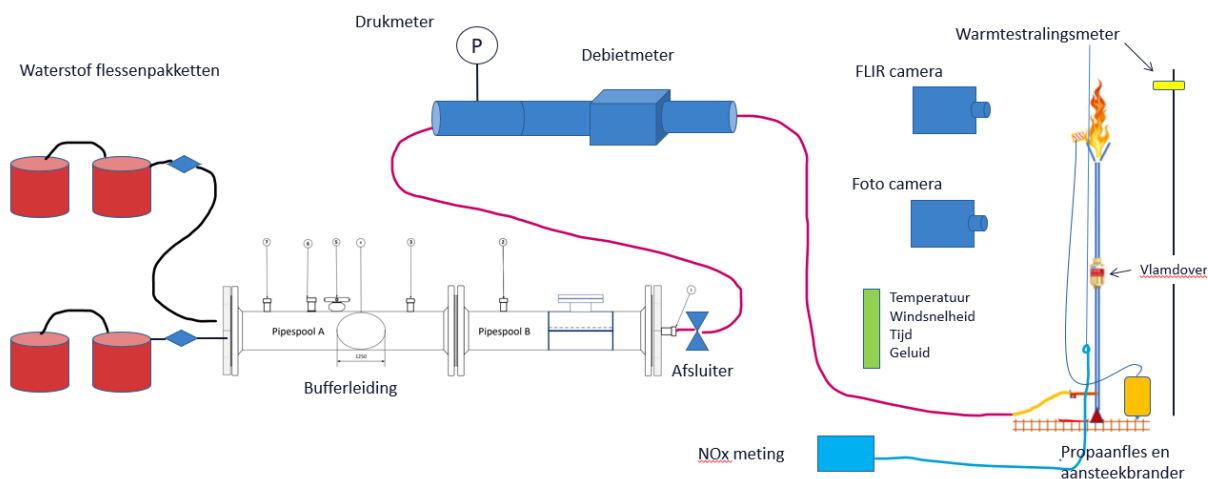
Het gedrag bij vertraagde ontstekingen is beoordeeld bij een drietal debieten variërend tussen 250 en 3.200 Nm<sup>3</sup>/h. De vertraagde ontsteking is aangebracht door het op afstand bekrachtigen van een vonkontsteker. Er is gestart met nulmetingen, dat wil zeggen bij bekrachtigde vonkontsteker de gastoevoer open zetten. Op deze manier kon worden vastgesteld hoe snel een waterstofwolk ontsteekt in de betreffende opstelling. Er zijn 7 meetseries uitgevoerd waarbij per meetserie het debiet en het moment van ontsteking gelijk bleef. In een meetserie zijn meerdere metingen gedaan om hiermee de reproduceerbaarheid vast te stellen.

De kans op vlaminslag is beoordeeld door de gasleiding en buffer langzaam leeg te laten lopen door het sluiten van de gastoevoer vanuit de flessenpakketten. Dit type meting is drie keer uitgevoerd.



### 3.2 Schematische weergave van de meetopstelling

Om de afblaas- en fakkeltesten uit te voeren is de opstelling gebouwd<sup>2</sup> zoals deze in Figuur 1 schematisch is weergegeven.



Figuur 1: Schematische weergave van de experimentele opstelling.

De stroomrichting in het schema is van links naar rechts. Links staan de flessenpakketten. Hierop aangesloten waren drukregelaars die een hoog debiet konden leveren. Deze hadden een maximale instelbare druk van 16 bar. Andere drukregelaars met een hogere maximale druk waren ook beschikbaar, maar omdat deze niet het beoogde debiet konden leveren waren deze niet gebruikt.

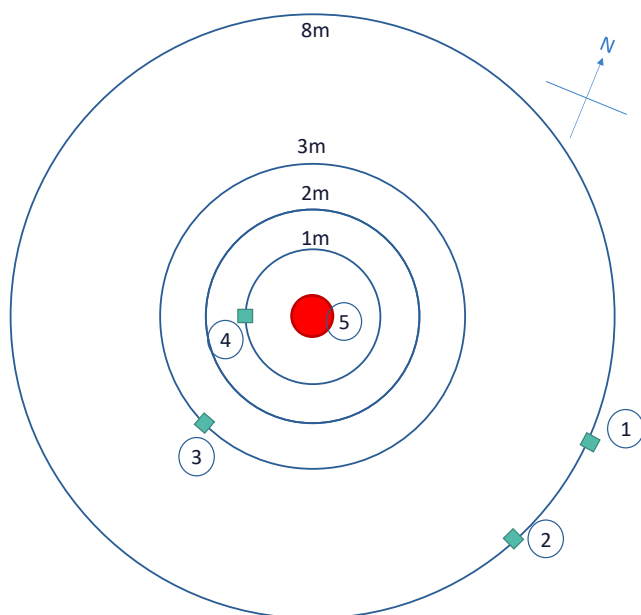
Indien nodig konden in totaal 4 pakketten tegelijkertijd worden aangesloten om de bufferleiding te vullen. Omdat er door omstandigheden maar 1 drukregelaar beschikbaar was, zijn de hoogste debieten gehaald met 3 gekoppelde flessenpakketten. Het merendeel van de vertraagde ontstekingstesten kon gedaan worden met 1 pakket en 1 regelaar.

Vanaf de pakketten liepen twee leidingen naar het bufferleidingdeel. Deze leiding had een inwendig volume van 2,11 m<sup>3</sup> en kon tot maximaal 68 bar waterstof gevuld worden. Het leidingdeel werd gebruikt als buffer en als afsluiterlocatie. Doordat de hoogdebiet drukregelaar een maximumdruk had van 16 bar, is de maximale druk tijdens de testen niet boven de 16 bar gekomen. Na de afsluiter liep een 2,5" slang naar de debietmeteropstelling. Deze bestond uit een leidingdeel met een drukkometer, gevolgd door een recht leidingdeel van 500mm om de stroming voor de debietmeter (rotormeter) gelijkmatig te krijgen. Na de debietmeter wederom een 4" leidingdeel. Daarop is een 2,5" flexibele leiding aangesloten die is verbonden met de affakel installatie. Voor het ontsteken van de vlam is een ingebouwde propaanbrander gebruikt of, tijdens de vertraagde ontstekingstesten, een vonk generator.

<sup>2</sup> Het deel van de meetopstelling dat diende als buffer (pipespool A en pipespool B) is geleverd door de Gasunie en was reeds op de testlocatie (Twente Safety Campus). Gasunie heeft namelijk via een ander onderzoek, niet deel uit makend van het HyDelta 2.0 project, onderzocht in hoeverre las- en stopple-werkzaamheden veilig zijn uit te voeren in een waterstofomgeving.



In Figuur 2 is een schets van het bovenaanzicht zichtbaar. Hierin staat in het midden de vlam afgebeeld, en daar omheen staan de diverse meetapparatuur op afstand.



Figuur 2: Schets van het bovenaanzicht van de opstelling

De volgende meetapparatuur is zichtbaar:

1. De FLIR warmtebeeldcamera (op 1.5m hoogte)
2. De fotocamera (op 1.5m hoogte)
3. De geluidsmeter (op 1.3m hoogte, later verzet van 3m naar 6m)
4. De warmtestralingssensor (op 1m hoogte boven de uittredingsopening van de fakkel en op 2m afstand van de uitstroomopening (bij meting 1 en 2 op 1m vanaf de uitstroomopening))
5. De fakkel, met daarin de NOx aanzuigpunt (1m boven de uitstroomopening).

### 3.3 Gegevens van de gebruikte apparatuur

#### 3.3.1 De fakkel

De fakkel is voor deze testen beschikbaar gesteld door de firma Esders. De fakkelinstallatie is voorzien van aarding en vastgezet met een drietal tuidraden. De buis van de fakkelinstallatie heeft een diameter van 2". De fakkelinstallatie heeft als Esders-artikelnummer 402208. De installatie is standaard voorzien van een waterstof vlamdover van het merk Kito (type FS-Def0-IIC-2" en K215763/22), deze is geïnstalleerd in het midden van de opstaande buis (net onder de borging van de tuidraden, zie figuur 4). De fakkelinstallatie is ontworpen voor de toepassing met waterstof maar nog niet getest met maximale debieten. De vlamdover zal de beperkende factor zijn voor wat betreft de doorlaat. Volgens opgave door Esders zou bij een drukverschil over de vlamdover van 300 mbar een affakkeldebiet van 5.000 Nm<sup>3</sup>/h waterstof haalbaar zijn. Dit wordt gesteld op basis van omrekening van luchtdebiet naar waterstofdebiet en extrapolatie van 100 mbarg tot 20 barg. Het waterstof dat uit de kelkbrander stroomt wordt ontstoken door een vlam van de aangebouwde propaanbrander. Het propaan wordt ontstoken door ontsteker die onderdeel is van de fakkelinstallatie. De drukknop van deze ontsteking kan permanent bekrachtigd blijven. Voor de beproevingen met de vertraagde ontstekingen is een externe vonkontsteker toegevoegd die op afstand bekrachtigd kon worden.



*Figuur 3 De brander van de fakkel met de aanzuigleiding van rookgassen (rode pijl) en Figuur 4 en Figuur 5 De brander van de fakkel met de toegevoegde vonkontsteker (gele pijl).*

### 3.3.2 Debietmeter en Drukmeter

Om het debiet te meten is er gebruik gemaakt van een rotormeter. Het model is een Instramet SM-RI-X-L. Deze meter heeft een meetbereik van 32 tot 650 m<sup>3</sup>/h met een nauwkeurigheid van  $\pm 0,2\%$ . De maximaal toegestane druk is 18.8 bar. Het meetbereik lag, gezien de verwachte drukken bij de meter, in het gewenste regime. Volgens het keuringsrapport moet de minimale volumieke massa (dichtheid) tussen de 0.5 en de 18.8 kg/m<sup>3</sup> liggen. Voor waterstof zou dit een minimale druk van 5.55 bar betekenen voor een accurate meting. Vooral in de lage debieten werd deze druk niet gehaald. De druk werd gemeten met een Badotherm drukmeter met een maximaal meetbereik van 16 bar en een nauwkeurigheid van  $\pm 0,2$  bar. De registratie van beide metingen werd gedaan door tegelijkertijd de druk en de meterstanden te filmen.



Figuur 6: Debietmeter (Links, geel), Drukmeter (rechts), Anemometer (midden boven), Uitlezer rookgasgasanalyse (midden onder)

### 3.3.3 Geluidsmeter

Om het geluid tijdens de metingen vast te leggen werd gebruik gemaakt van een geluidsmeter van Brüel & Kjaer type 2250. De fabrikant geeft geen nauwkeurigheidsmarge op.



Figuur 7 De Brüel & Kjaer geluidsmeter en de positie in de meetopstelling (gele pijl).

Tijdens de metingen van de directe ontsteking en beoordeling van de kans op vlaminslag is de geluidsmeter op een afstand van 3 meter vanaf de fakkelininstallatie geplaatst. Bij de vertraagde ontsteking werd bij een van de laatste meetseries het maximum van de meter bereikt. Bij die meting is de geluidsmeter toen verplaatst naar een afstand van 6 meter vanaf de fakkelininstallatie.

Bij de metingen zijn de o.a. de volgende parameters vastgelegd;

LCpeak; Het maximale geluidsniveau gedurende een meting. L staat voor Level, C staat voor C-frequentie. Deze waarde wordt gebruikt voor het beoordelen van mogelijke gehoorschade bij mensen veroorzaakt door kort durende hoge geluidsniveaus.

LAFmax: Het maximale geluidsniveau op basis van A-frequenties en een “fast time response”. L staat voor Level, A voor A-frequentie weegfactor en F voor fast. Het is het hoogste niveau van hoorbaar geluid dat is opgetreden gedurende de meettijd, waarbij de laagste en hoogste frequenties buiten beschouwing zijn gelaten.

LA eq: Het gemiddelde geluidsniveau op basis van A-frequenties.

Voor weegfactoren van de frequentie zijn de toevoegingen A, C en Z gebruikelijk. Bij Z worden alle frequenties meegenomen. Dus zowel de lage frequenties (bromtonen) als de hoge frequenties (pieptonen). Bij A worden de hoogste en laagste frequenties niet meegenomen. Bij C worden de hoogste en laagste frequenties wel meegenomen in de gepresenteerde waarde. Bij een geluidsniveau onder de 100 dB horen mensen de lage en hoge frequenties niet of minder goed. Als geluidsniveaus hoog worden (> 100 dB), dan wordt het menselijk gehoor juist gevoeliger voor zowel de hoge als lage frequenties en kan het daardoor nog luider ontvangen worden. Het is daarom gebruikelijk om bij geluidsniveau's onder de 100 dB de A-frequentie-weging toe te passen en bij geluidsniveau's boven de 100dB de C-frequentie-weging toe te passen.



### 3.3.4 Rookgasanalyzer

Voor het meten van de NOx en zuurstofconcentraties in de rookgassen is gebruik gemaakt van een rookgasanalyser van ECOM type J2KN pro. Het aanzuigpunt van rookgassen vond 1 meter recht boven de fakkel plaats (zie Figuur 1 en Figuur 3). Het afzuigen van alle rookgassen was in deze opstelling niet goed uitvoerbaar. Doordat er op één punt boven de fakkel is afgezogen, waarbij het meetpunt als gevolg van de wind zich soms buiten de vlam bevond, is er niet in alle gevallen een emissie van NOx gemeten. Dat wil niet zeggen dat er op dat moment geen emissie van NOx plaats vond. Bij de metingen met vertraagde ontstekingen zijn er geen NOx-metingen uitgevoerd omdat het affakkelen kortstondig plaats vond. De NOx-emissie kan worden vastgesteld in een bereik van 0 tot 4000 ppm en heeft een nauwkeurigheid van  $\pm 5\%$  van de aflezing. De nauwkeurigheid van de zuurstofmeting is  $\pm 0,3\%$  (absolute waarde).



Figuur 8 De rookgasanalyser ECOM type J2KN pro

### 3.3.5 Warmtestralingssensor

De warmtestraling werd gemeten met een Hukseflux HF03-LI19 (zie Figuur 9). Deze bestaat uit een HF03 sensorhouder, maar daarin de SBG01 warmtestralings sensor en een LI19 uitleesapparaat. De sensor heeft een meetbereik van 0 tot  $10 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ . Dit past in het meetbereik dat verwacht werd op basis van de warmtestraling berekend in andere literatuur. De sensor kan kortstondig hogere waarden meten (tot  $15 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ ) en is nauwkeurig tot  $0,1 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ . Door de afstand vanaf de vlam te variëren is ervoor gezorgd dat de warmtestraling binnen het meetbereik van de sensor bleef. De eerste twee metingen was de afstand 1 meter. Echter werd de sensor hierdoor te hoog belast en ging de aansluitkabel smelten. Door de warmtestralingsmeter nog een meter extra van de vlam af te plaatsen werd dit probleem verholpen.



Figuur 9: De Hukseflux LI19-HF03

### 3.3.6 Windmeter

De gebruikte windmeter was een JDC Skywatch Eole, zie Figuur 10.



Figuur 10: De JDC Skywatch Eole windmeter (links) en de FLIR E40 (Rechts)

De windmeter is windrichting onafhankelijk, heeft een nauwkeurigheid van  $\pm 3\%$  Full Scale en kan meten van 2 tot 150 km/h. De windmeter is gepositioneerd nabij de fakkel op een hoogte van 1 tot 2 meter. Voor de testen was deze ingesteld zodat de gemiddelde waarde werd weergegeven over de afgelopen minuut. Dit is ook de waarde zoals deze is genoteerd tijdens de metingen.

### 3.3.7 Thermische beeld camera

De gebruikte thermische beeld camera, ook wel warmtebeeld camera (WBC), genoemd was van het merk FLIR en het type E40. De FLIR E40 heeft 160 x 120 pixels, een hoog temperatuurbereik (tot 650 graden) en hoge thermische gevoeligheid ( $< 0,07^\circ\text{C}$ ). De nauwkeurigheid is  $\pm 2^\circ\text{C}$ , of  $\pm 2\%$  Full Scale. Door het gebruik van deze camera kon de vlamcontour zichtbaar gemaakt worden.

## 4. Resultaten van het experimenteel onderzoek

De metingen zijn uitgevoerd volgens een vooraf opgesteld meetplan. Tijdens het uitvoeren van metingen zijn wijzigingen gemaakt in het meetprogramma. Dit had diverse redenen, zo was de beschikbare hoeveelheid waterstof beperkt en kon het debiet ter plekke niet snel worden afgelezen. Door echter met de voordruk in de leiding te variëren kon er met verschillende debieten getest worden. In totaal zijn er op drie verschillende dagen experimenten uitgevoerd. Er is aangevangen met het operationeel krijgen van de gasbuffer, de fakkels en alle meetapparatuur. Op de tweede dag zijn er hoofdzakelijk experimenten geweest met directe ontsteking van verschillende debieten. Op de derde dag zijn er experimenten geweest met vertraagde ontstekingen en zijn de maximaaldebiet testen gedaan.

### 4.1 Directe ontsteking

De experimenten met directe ontsteking zijn uitgevoerd door een propaanvlam te laten branden bij de uitgang van de fakkels. Dit is tijdens normaal gebruik van deze fakkels de ingebouwde ontstekingsbron. Er zijn vlammen met verschillende debieten getest. Er is aangevangen met een relatief beperkte druk in de waterstofbuffer. Hiermee werd de werking van de fakkels op waterstof beheerst gevalideerd. Uit deze testen bleek dat de fakkels geschikt is voor waterstof. Er zijn geen onverwachte gebeurtenissen waargenomen. In Tabel 3 zijn de uitgevoerde directe ontstekingen metingen en hun bijbehorende debieten opgesomd.

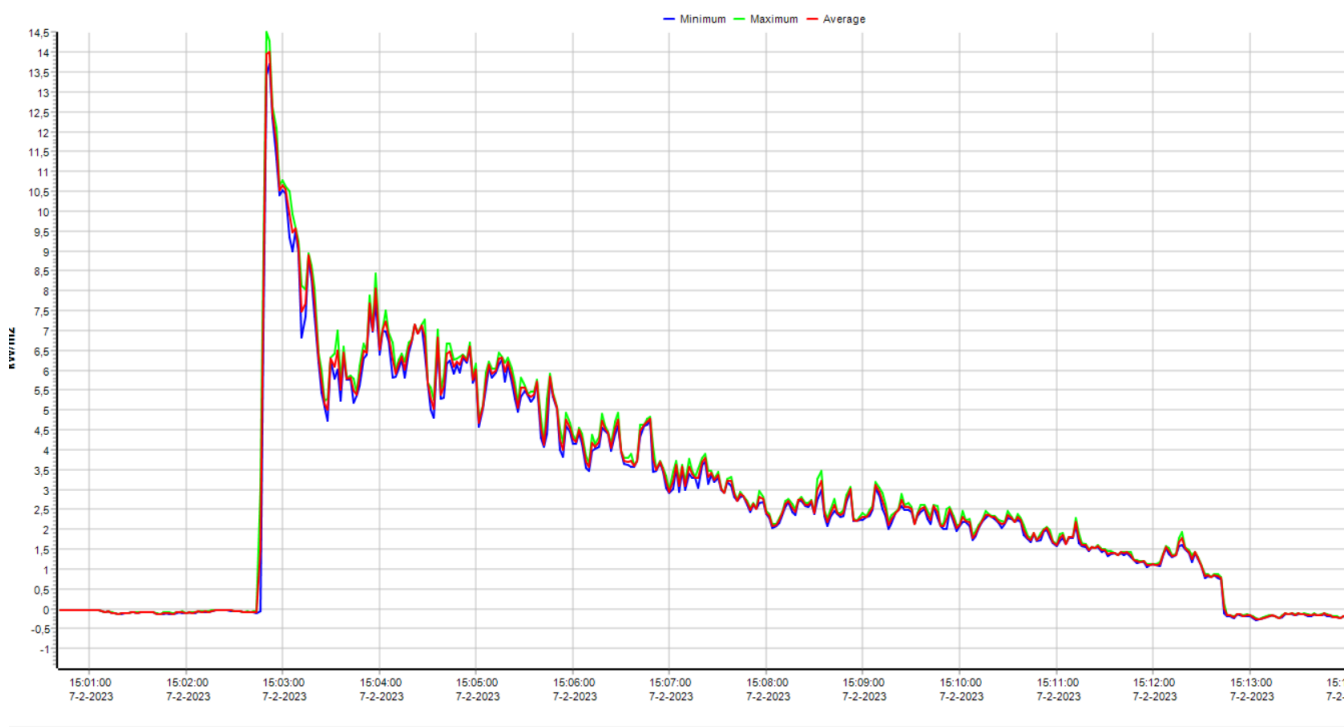
Tabel 3: Uitgevoerde metingen directe ontsteking

Metingnr.	Datum	Omschrijving	Debiet - gem. (Nm <sup>3</sup> /h)	Startdruk in de spoel (bar)	Startdruk bij de gasmeter (bar)	Windsnelheid (m/s)
1	06/02/2023	Beproeving met laag debiet	680	2	2,0	0,2
2	06/02/2023	Beproeving met laag debiet	780	2	2,0	0,3
3	07/02/2023	Buffer leegtrekken, beoordeling inslag	n.b.	6	2,0	0,4
4	07/02/2023	Van volle spoel naar langzaam leeg laten branden, eind is 2e meting mbt inslag	n.b.	6	2,0	0,4
5	07/02/2023	Verhoging debiet, door verhoging spoeldruk	2500	8	4,2	0,8
6	07/02/2023	Verhoging debiet, onjuiste meting tbv debietbepaling	n.b.	16	10,2	0,3
7	07/02/2023	Verhoging debiet, door verhoging spoeldruk	3750	16	8,3	0,6
8	07/02/2023	Van volle spoel naar langzaam leeg laten branden, eind is 3e meting mbt inslag	n.b.	8	2,5	0,5
9	09/02/2023	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	n.b.	16	12,4	0,6
10	09/02/2023	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	6200	16	13,0	0,3

Alle bovengenoemde metingen met een propaanbrander die continue ingeschakeld was.

Meting 1,2,5,7 en 9 zijn metingen waarbij er steeds een toenemend debiet is aangeboden aan de fakkels. Dit gebeurde door de druk in de waterstofbuffer te verhogen voor hogere debieten en de open positie van de afsluiter te vergroten. Uiteindelijk is er tijdens test 10 gedurende 10 seconden een gemiddeld debiet gehaald van 6200 Nm<sup>3</sup>/h. Deze worden in paragraaf 4.3 verder besproken.

Meting 3, 4 en 8 zijn uitgevoerd door de waterstofbuffer nagenoeg helemaal leeg te laten lopen. Hierbij was er geen (of beperkte) toevoer vanuit de flessenpakketten. Zowel qua zichtbare grootte van de vlam, geluid en warmtestraling werd de vlam steeds kleiner. De vlam bleef branden en vertoonde geen inslag. Vanwege de beperkte tijd werd na verloop van tijd de afsluiter langzaam dichtgedraaid. Hierdoor werd het proces van uitdoving versnelt. Het verloop van de warmtestraling van meting 4 is te zien in Figuur 11. De waterstofbuffer is hier gevuld op 8 bar waarna deze in bijna 10 minuten drukloos wordt via de fakkel.



Figuur 11: De warmtestraling van een uitdovende vlam (meting nummer 4).

Rond het tijdstip 15:12:30 wordt de afsluiter langzaam dicht gedraaid. Hierna daalt de gemeten warmtestraling naar 0.

Bij deze metingen zijn het geluid en de NO<sub>x</sub>-emissies ook geregistreerd. Zie hiervoor paragraaf 4.4 en 4.5.

## 4.2 Vertraagde ontsteking

Voor de vertraagde ontstekingstesten is de ingebouwde propaanbrander van de fakkel uitgezet en werd het waterstofmengsel met een vonkontsteker, welke geplaatst is net boven de uitstroomopening, ontstoken. Voor de testen werd het leidingdeel gevuld tot een bepaalde druk (4 of 8 bar). Hierna werd de afsluiter geopend en werd er een bepaalde periode gewacht (5, 10 of 20 seconden) waarna de vonkontsteker werd geactiveerd.

Wat opvallend was is dat tijdens de meeste testen het vlamfront net na ontsteking alle kanten propageerde. De vlam propageerde daarmee dus ook naar beneden, iets waar vooraf geen rekening mee werd gehouden.

Er zijn in totaal 7 meetseries uitgevoerd waarbij het debiet en het tijdstip waarbij de ontsteking werd geactiveerd de variabelen zijn. Iedere meetserie bestond uit meerdere afzonderlijke metingen. Tijdens de verschillende metingen zijn het moment van ontsteken, het geluidsniveau, de



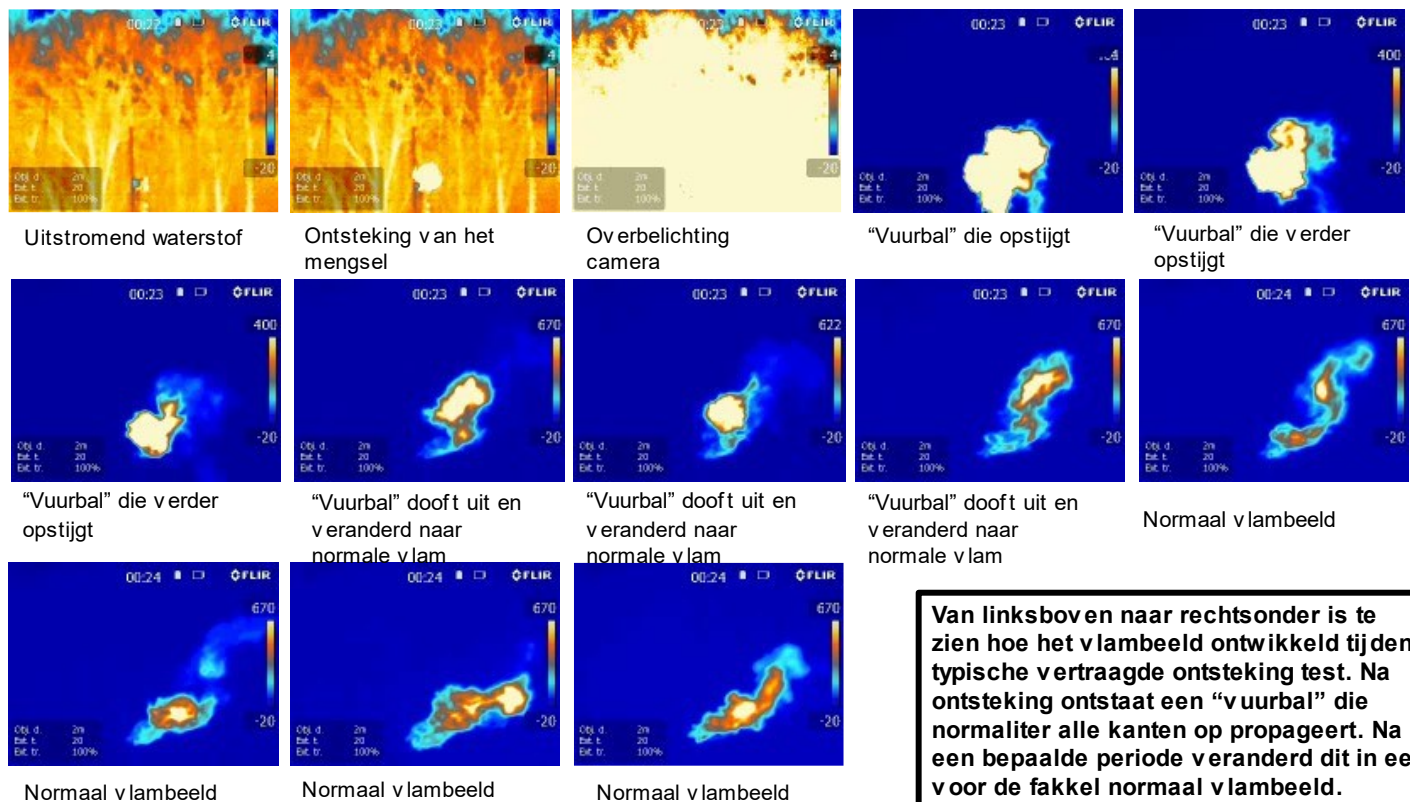
windsnelheid en de contouren van de vlam vastgelegd. Hieronder een overzicht van de uitgevoerde metingen.

Tabel 4 Uitgevoerde metingen vertraagde ontsteking

Serie	Debiet (globaal)	Moment van ontsteking	Druk in de buffer	Aantal individuele metingen	Opmerkingen
A	250	Vonk aanwezig voordat de gastoevoer werd geopend	4	6	Nulmetingen – Een grote variatie in het moment van ontsteken waargenomen. Soms 2 sec en soms 24 sec na openen gastoevoer.
B	250	10 s na openen gastoevoer	4	5	Wederom een grote variatie in het moment van ontsteken waargenomen. Soms 12 sec en soms 32 sec na openen gastoevoer.
C	250	20 s na openen gastoevoer	4	6	Wederom een grote variatie in het moment van ontsteken waargenomen. Soms 21 sec en soms 36 sec na openen gastoevoer.
D	3200	Vonk aanwezig voordat de gastoevoer werd geopend	8	7	Nulmetingen na aanpassing vonkontstekers
E	1900	5 s na openen gastoevoer	4	4	Binnen 1 seconden na aanbrengen vonk, de ontsteking v.h. gas
F	1900	10 s na openen gastoevoer	4	2	Binnen 1 seconden na aanbrengen vonk, de ontsteking v.h. gas
G	3200	5 s na openen gastoevoer	8	4	Binnen 1 seconden na aanbrengen vonk, de ontsteking v.h. gas

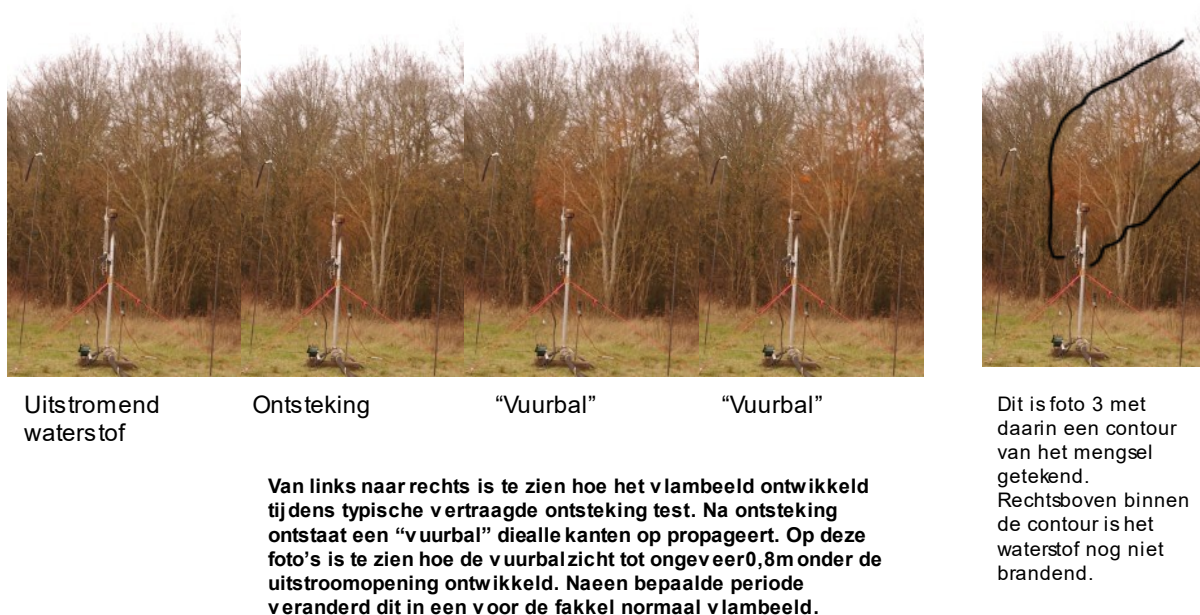
Op basis van de resultaten van meetserie A was de gedachte dat de aanwezige wind zorgde voor een tragere ontsteking. Na afronding van meetserie C is de vonkontsteker beoordeeld. Deze bleek minder krachtig te werken in vergelijking met de start van meetserie A. De bedrading is vervangen. Bij meetserie D is de vonk geactiveerd en daarna een groot debiet waterstof naar de fakkels gevoerd. Bij de eerste meting in die serie ontstak het waterstof direct. Daarna tot tweemaal toe niet. Waarschijnlijk doordat de vonkvorming haperde. Het wegblijven van de ontsteking werd in ieder geval niet veroorzaakt doordat het mengsel buiten de brandbaarheidsgrenzen lag. Dit omdat tijdens het dichtzetten van de gastoevoer er eveneens geen ontsteking plaats vond tijdens die individuele metingen. Vervolgens in dezelfde opstelling, met dezelfde ontstekers, zijn er wel weer een drietal ontstekingen van het waterstof waargenomen. Aan het eind van meetserie D (na de laatste individuele meting) bleek de vonkontsteker niet meer te werken. Daarna is de ontsteker vervangen. Met deze vonkontsteker en bedrading zijn meetseries E, F en G uitgevoerd. Tijdens de meetseries B, C, E en G is er een vonk geactiveerd nadat er enige tijd sprake was van uitstromen van onverbrand gas. Op basis van deze metingen blijkt dat het waterstof niet spontaan wordt ontstoken. Zie bijlage 9.2 voor een overzicht van de resultaten van alle individuele vertraagde ontstekingsproeven.

Het ontsteken van het waterstof in de meetseries E, F en G ging telkens direct (binnen 1 seconde) na het activeren van de vonkontsteker. De geluidspieken bij de vertraagde ontstekingen zijn hoger dan bij de directe ontstekingen (zie ook paragraaf 4.4). Dit zal veroorzaakt worden doordat er een grotere wolk onverbrand waterstof/lucht mengsel wordt ontstoken. Deze ontsteking wordt zichtbaar gemaakt via de beelden hieronder.



Figuur 12: Beelden van een thermische warmtebeeldcamera opname, van links naar rechts vertegenwoordigd oplopende tijd.

De beelden uit Figuur 12 zijn gemaakt bij een vertraagde ontstekingstest met een laag debiet ( $250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ). Wanneer dezelfde vertraagde ontsteking wordt gefilmd met een normale camera is er een stuk minder te zien (Figuur 13). Hierbij moet in acht genomen worden dat de vergelijking met de thermische warmtebeeld camera lastig te maken is omdat deze tijdens het opbouwen van de "vuurbal" overbelicht raakt en deze een lagere opslag snelheid (frames per seconde) heeft. Op de derde foto is echter een oranje gloed te zien rondom de fakkel. Dit is de "vuurbal" die net na de ontsteking alle kanten op propageert. Ter verduidelijking is helemaal rechts in Figuur 13 dezelfde foto nogmaals gebruikt, met daarin in zwart de contour van de "vuurbal" getekend. Het hele proces van ontsteking, ontstaan van de vuurbal tot en met het uitdoven van de vuurbal en de overgang naar een normaal vlambeeld duurt 10 frames wat overeenkomt met  $1/3^{\text{e}}$  seconde.



Figuur 13: Beelden van een video-opname van de vertraagde ontsteking.

#### 4.3 Maximaal debiet testen

Vanwege de beperkte hoeveelheid waterstof omdat deze met flessenpakketten aangevoerd moest worden, zijn er twee maximaal debiet testen gedaan. De test die als laatste gedaan was (9 februari rond 15:30) heeft het hoogste debiet gehaald.

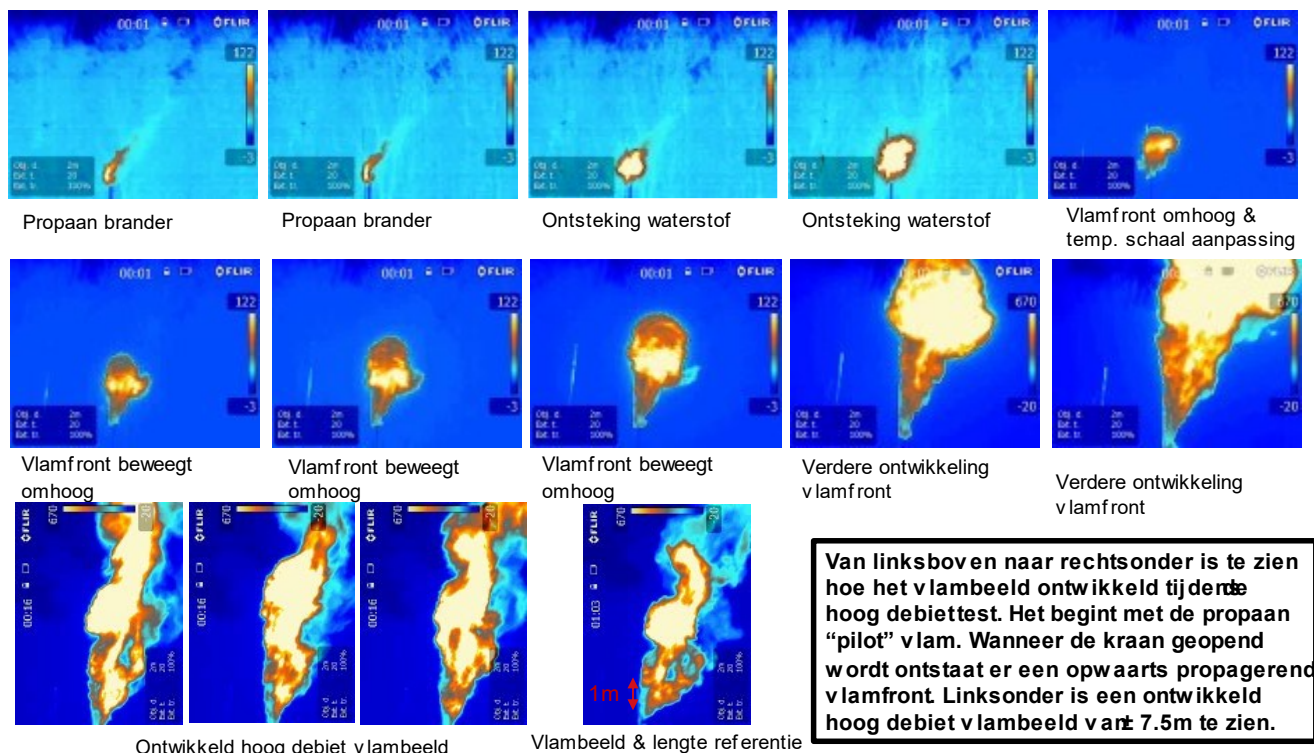
Het debiet als functie van de tijd is weergegeven in onderstaand figuur. Er is duidelijk te zien dat het debiet in het begin het hoogste is er daarna afneemt. De druk in de spool (leidingsectie die gebruikt wordt als buffer) is ongeveer 16 bar wanneer de afsluiter wordt geopend. De druk nabij de meter geeft vlak na opening een druk aan van 13 bar. 10 seconden later is dit al afgezakt naar 8 bar. Vanaf 30 s volgt een stabiele toestand tot een 70 seconden. In deze periode is de druk bij de meter tussen de 4 en 3.5 bar. Na 80 seconden is de hele meting voorbij.

Het hoogste berekende debiet was ongeveer 7000 Nm<sup>3</sup>/h, echter gezien de inloopverschijnselen van de gasmeter zou het in de eerste seconden nog wat hoger gelegen kunnen hebben. Daarnaast is er in de eerste seconden een relatief grote onnauwkeurigheid in het aflezen van de drukmeter, deze beweegt relatief tot de sluitertijd vrij snel. Door de metingen van de eerste 10 seconden te combineren en te middelen, kan er met grote zekerheid gesteld worden dat een debiet van 6200 Nm<sup>3</sup>/h gehaald is.

Tijdens het testen kon geobserveerd worden dat de vlam direct ontstoken werd door de propaanvlam. Dit terwijl de afsluiter binnen 10 seconden volledig werd geopend.

Omdat het een dynamisch proces is waarbij de buffer leeg loopt en daarna zo goed als mogelijk weer wordt bijgevuld door de (afkoelende) flessenpakketten liep het debiet na de eerste 10s gestaag omlaag. Hierna stabiliseerde het debiet zich rond de 2500 Nm<sup>3</sup>/h wat het maximum te leveren debiet lijkt van de drukregelaars bij deze omstandigheden.

Bij de hoog debiet metingen is er ook met de FLIR camera is gefilmd. Helaas zijn een aantal warmtebeeldcamera opnames niet gelukt. Hierdoor is alleen de eerste anderhalve minuut van meting 8 met de warmtebeeld camera gefilmd. Deze heeft een iets lager debiet dan meting 9, maar is in het begin wel vergelijkbaar omdat dezelfde 16 bar startdruk is gebruikt.



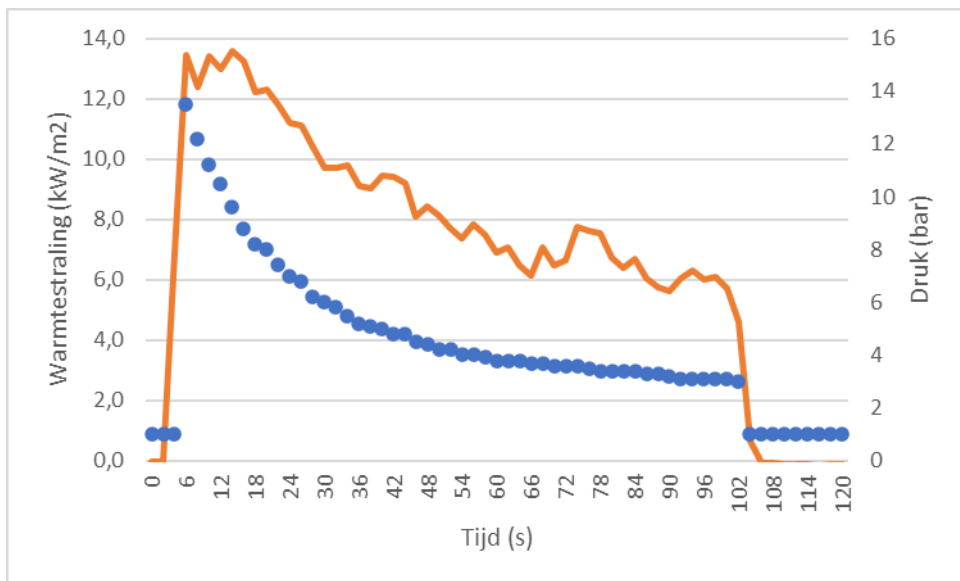
Figuur 14: Het verloop van een hoog debiet meting vastgelegd door een warmtebeeldcamera.

De tijdstippen bij bovenstaande beelden zijn als volgt;

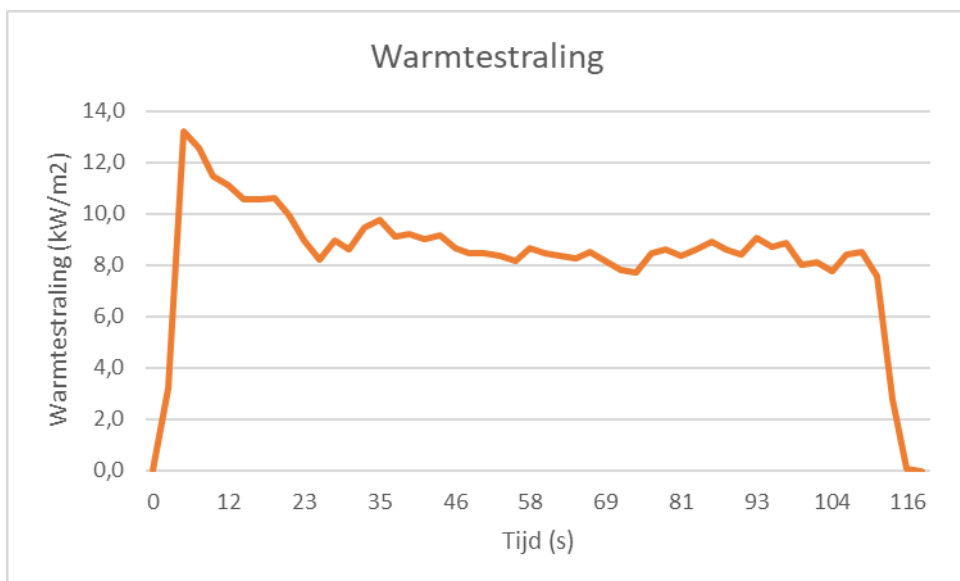
1s	1s	1s	1s	1s
1s	1s	1s	2s	3s
16s	16s	16s	63s	

In de eerste seconde (de eerste 8 beelden) van de opname is de propaanbrander duidelijk te zien (beeld 1 en 2). Daarmee wordt de waterstofvlam zichtbaar die vanaf beeld 3 zichtbaar is. Het vlamfront beweegt hierna opwaarts en wordt tevens breder. Hierna is de camera verschoven en een kwart slag gedraaid om een beter overzicht te hebben van de hele vlam. Linksonder zijn drie beelden te zien van een volledig ontwikkelde vlam bij 16 seconden. De vlamhoogte is hierbij ongeveer 7.5m. Dit is afgeleid van het laatste beeld (nummer 14), welke is gemaakt na 63 seconden. Hier is de vlam een stuk kleiner doordat de druk in de spool dan is afgenomen. In dit beeld is duidelijk de aanzuigbuis van de NO<sub>x</sub> sensor te zien (rode pijl). Deze is 1m lang, en kan vergeleken worden met de vlamlengte van de beelden 11, 12 en 13. In het experiment hierna (meting 9, 6200 Nm<sup>3</sup>/h) is deze buis naar de andere kant (rechts in Figuur 14) verschoven zodat deze meer verbrandingsgassen aanzuigt.

De warmtestraling bij de hoog debiet testen is weergegeven in Figuur 15 en Figuur 16. Hier is de correlatie te zien tussen de druk en de warmtestraling, waarbij de warmtestraling iets achter lijkt te lopen op de afnemende druk.



Figuur 15: De warmtestraling (rood) en druk bij de gasmeter (blauw) als functie van de tijd. (meting 10)



Figuur 16 De warmtestraling (rood) als functie van de tijd. (meting 9)

Bij deze metingen zijn het geluid en de NOx-emissies ook geregistreerd. Zie hiervoor paragraaf 4.4 en 4.5.



#### 4.4 Geluidsmetingen

Bij alle experimenten zijn geluidsmetingen uitgevoerd. In deze paragraaf worden deze toegelicht met een opsplitsing naar directe en vertraagde ontstekingen.

##### 4.4.1 Resultaten geluidsmetingen directe ontstekingen

De hoogste geluidsniveaus (gemeten op een afstand van 3 meter vanaf de fakkel en op een hoogte van 1,5 meter boven het maaiveld) treden op bij de ontsteking van het waterstof. Zoals gesteld in paragraaf 3.3.3 worden bij de LC peak waarden alle frequenties meegenomen. Bij de LAF max waarden wordt geen rekening gehouden met de laagste en hoogste frequenties. Deze frequenties zijn bij een geluidsniveau < 100 dB niet hoorbaar. Nadat het waterstof eenmaal is ontstoken daalt het geluidsniveau. Dit is te zien aan de waarde voor LA eq. Dit geeft een gemiddeld geluidsniveau over de gehele geluidsmeting weer. Hierbij moet opgemerkt worden dat de geluidsmeting doorgaans langer duurde dan de periode van ontsteking en verbranding van waterstof. De middeling in de vorm van LA eq bevat dus ook een periode waarin de fakkel niet brandde.

Op basis van de waarden LAF max bij metingen 1, 5, 7 en 10 valt te stellen dat het geluidsniveau van een brandende waterstoffakkel een geluidsniveau heeft dat lager is dan 100 dB. Het geluidsniveau van 100 dB is ter vergelijken met het geluid van een cirkelzaag.

De hoogste waarden voor LA eq zijn waargenomen bij metingen 2 en 4. Het verschil van de waarde LA eq tussen meting 2 (84,0 dBA) en meting 4 (85,1 dBA) is beperkt. Dit ondanks dat bij meting 4 gedurende de gehele geluidsmeting er sprake was van een aanwezige waterstofvlam en bij meting 2 slechts de helft van de geluidsmeting.

De hoogste waarden voor LC peak zijn waargenomen bij metingen 2 en 4 en niet bij de ontstekingen van het grootste debiet (meting 9 en 10). Bij metingen 2 en 4 is de gasconcentratie waterstof in de wolk met lucht kennelijk dichter bij de stoechiometrische verhouding (30%) dan bij de metingen met het maximaal haalbare debiet het geval.

Tabel 5 Resultaten geluidsmetingen directe ontsteking

Metingnr.	Omschrijving	Debiet - gem. (Nm <sup>3</sup> /h)	Geluid			tijd (sec)	
			LAF max (dBA)	LC peak (dB)	LA eq (dBA)	geluidsmeting	vlam
1	Beproeving met laag debiet	680	98,8	125,0	68,7	180	120
2	Beproeving met laag debiet	780	113,7	139,5	84,0	129	60
3	Buffer leegtrekken, beoordeling inslag	n.b.	106,8	131,9	77,9	130	90
4	Van volle spool naar langzaam leeg laten branden, eind is 2e meting mbt inslag	n.b.	116,3	142,1	85,1	180	480
5	Verhoging debiet, door verhoging spooldruk	2500	94,6	123,2	74,8	187	150
6	Verhoging debiet, onjuiste meting tbv debietbepaling	n.b.	97,6	121,7	76,6	180	90
7	Verhoging debiet, door verhoging spooldruk	3750	93,0	120,9	80,1	160	100
8	Van volle spool naar langzaam leeg laten branden, eind is 3e meting mbt inslag	n.b.	93,9	121,2	71,2	180	690
9	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	n.b.	96,9	126,1	81,0	180	90
10	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	6200	94,0	119,4	81,1	180	90

Alle bovengenoemde metingen met een propaanbrander die continue ingeschakeld was.

#### 4.4.2 Resultaten geluidsmetingen vertraagde ontstekingen

De volledige resultaten van de geluidsmetingen zijn opgenomen in Bijlage 8.2.

De geluidspieken bij de vertraagde ontstekingen van de hogere debieten (1900 en 3200 Nm<sup>3</sup>/h) zijn hoger dan bij de directe ontstekingen van de hogere debieten (2500, 3750 en 6200 Nm<sup>3</sup>/h). Dit zal veroorzaakt worden doordat er een grotere wolk onverbrand waterstof/lucht mengsel wordt ontstoken. De geluidspieken bij vertraagde ontstekingen van de lagere debieten (250 Nm<sup>3</sup>/h) liggen rond de 130 dB. Bij directe ontsteking van een debiet van 680 Nm<sup>3</sup>/h is een LC peak waarde gemeten van 125 dB en bij een debiet van 780 Nm<sup>3</sup>/h is een LC peak waarde gemeten van 139,5 dB. Doordat de lage debieten bij de vertraagde ontstekingen afwijken van de lage debieten zoals gemeten bij de vertraagde ontstekingen is een onderling vergelijk niet goed te maken.

Tabel 6 Maximale waarden voor LC peak bij vertraagde ontstekingen

Meetserie	Betreft individuele meting nr.	Q globaal (Nm <sup>3</sup> /h)	LC peak (dB)	Moment van bekrachtiging ontsteker
B	1	250	130,5	10 sec na openen gas / ontsteking 20 sec na vrijkomen gas
C	6	250	131,0	20 sec na openen gas / ontsteking 27 sec na vrijkomen gas
E	4	1900	139,8	5 sec na openen gas / ontsteking ~ 6 sec na vrijkomen gas
F	2	1900	>143,9*	10 sec na openen gas / ontsteking ~ 11 sec na vrijkomen gas
G	1 en 2	3200	>143,9*	5 sec na openen gas / ontsteking ~ 6 sec na vrijkomen gas
G	3 en 4	3200	137,4	5 sec na openen gas / ontsteking ~ 6 sec na vrijkomen gas

\*143,9 dB is het maximum van de meter. Bij meting 1 en 2 uit de serie G stond de geluidsmeter op 3 meter van de bron, bij meting 3 en 4 uit de serie G is de geluidsmeter op 6 meter afstand van de bron geplaatst.

#### 4.5 NOx-emissies metingen

Bij de directe ontstekingsproeven zijn de NOx-emissies gemeten. In dit paragraaf een weergave van de resultaten zoals verkregen bij de experimenten met directe ontsteking (paragraaf 4.1) en maximaal debiet (paragraaf 4.3).

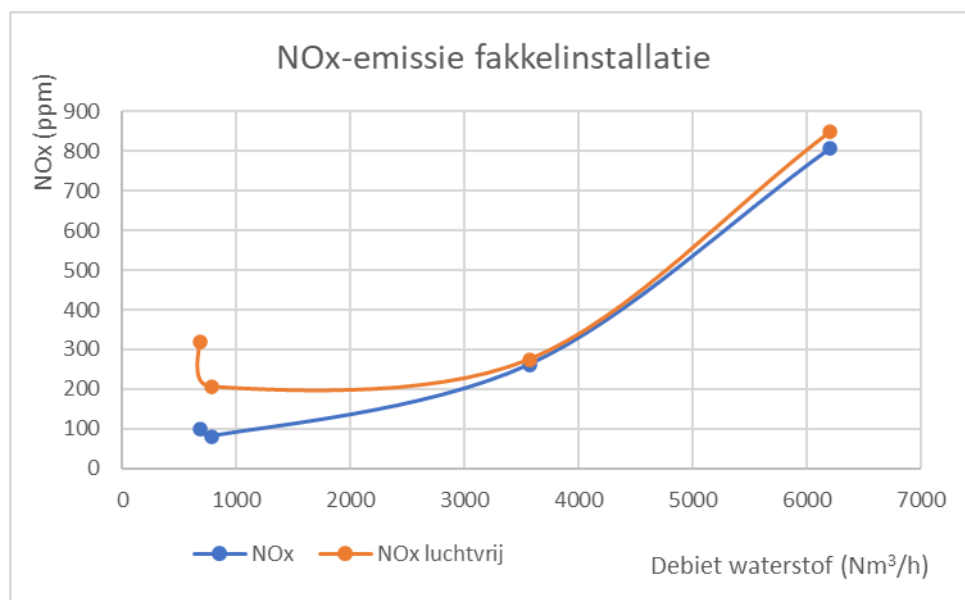
Zoals eerder benoemd is de aanzuigopening van rookgassen geplaatst op 1 meter boven de fakkel. Op het moment dat de propaanbrander is ontstoken bereiken de rookgassen van de propaanbrander de meetopening niet. Het is denkbaar dat de rookgassen van de propaanbrander worden meegenomen met de waterstofvlam. Het debiet rookgassen van de propaanbrander is van ondergeschikt belang vergeleken met het debiet rookgassen afkomstig van de waterstofvlam. Bij het ontsteken van het waterstof bevindt de aanzuigopening van het NOx-meetpunt zich in de waterstofvlam op het moment dat er sprake is van nagenoeg windstille condities. Zodra de wind toeneemt is de positie van de meetbuis ten opzichte van de kelk bepalend voor het wel of niet aanzuigen van rookgassen. Bij de debieten 680, 780, 3750 en 6200 Nm<sup>3</sup>/h, en de op dat moment heersende windcondities, konden de NOx-emissies worden vastgesteld. Deze zijn hieronder weergegeven.

Hierbij zijn de gemeten NO<sub>x</sub>-emissies weergegeven én de NO<sub>x</sub>-emissie luchtvrij. Deze laatste is berekend op basis van het eveneens in de grafiek weergegeven zuurstofgehalte. Door NO<sub>x</sub>-luchtvrij te benoemen wordt er gecorrigeerd voor de verdunning met lucht die plaats vindt.

Tabel 7 NO<sub>x</sub>-emissies gemeten bij verschillende debieten

Meting	Debiet (Nm <sup>3</sup> /h)	Windsnelheid (m/s)	NO <sub>x</sub> – max (ppm)	NO <sub>x</sub> – 0% O <sub>2</sub> max (ppm)	Tijdsduur Waterstof vlam (s)	Meetbuis in vlam
1	680	0,2	98	320	120	Ja, blok van 50 s
2	780	0,3	80	206	60	Alleen 0 tot 20 s
7	3750	0,6	262	275	100	Ja, blok van 60 s
10	6200	0,3	807	848	90	Ja

Op basis van dit beperkt aantal meetpunten is er wel een verband zichtbaar tussen de NO<sub>x</sub>-emissie en het waterstofdebiet.



Figuur 17 Stijging van NO<sub>x</sub> concentratie bij toenemend debiet waterstof

Bij de lagere debieten (kleiner dan 1000 Nm<sup>3</sup>/h) is het verschil tussen de gemeten NO<sub>x</sub>-emissie en de berekende NO<sub>x</sub>-emissie bij 0% zuurstof groot. Dit komt doordat bij deze debieten het zuurstofgehalte in de rookgassen hoog was (>9%).

In Bijlage 9.1 zijn de NO<sub>x</sub>-emissies gedurende het affakkelen tijdens metingen 1, 2, 7 en 10 grafisch weergegeven, waarbij de emissies fluctueren gedurende de looptijd van de meting. In die bijlage tevens de NO<sub>x</sub>-emissies van de overige metingen met directe ontsteking van de waterstofvlam.



#### 4.6 Conclusies van de experimentele onderzoeken

Met de gebruikte fakkelinstallatie, inclusief vlamdover, is het affakkelen van debieten in de orde grootte van 500, 2.500, 4.000 en 6.000 Nm<sup>3</sup>/h goed uitvoerbaar.

Bij een langzaam afnemend gasdebiet treedt er geen vlaminslag op. Of de vlamdover noodzakelijk was om dit te voorkomen is niet vastgesteld.

Er is geen sprake van overmatige geluidsproductie bij het regulier affakkelen, ook niet als de waterstofwolk vertraagd wordt ontstoken. Tijdens de beproevingen met het vertraagd ontsteken is er, uiteraard, sprake geweest van uitstroming van onverbrand waterstofgas. Deze debieten, te weten 250, 1900 en 3200 Nm<sup>3</sup>/h, zijn in de betreffende fakkelinstallatie niet spontaan ontstoken.

Bij een toenemend waterstofdebiet neemt de concentratie NO<sub>x</sub> in de rookgassen toe. Bij het laagst geteste debiet (700 Nm<sup>3</sup>/h) is de gemeten NO<sub>x</sub>-emissie ongeveer 100 ppm, bij het hoogst geteste debiet (6.000 Nm<sup>3</sup>/h) is de gemeten NO<sub>x</sub>-emissie 800 ppm. Bij de hogere waterstofdebieten zal het mengsel waterstof/lucht rijker zijn in vergelijking met de lagere waterstofdebieten. Dit is mogelijk de oorzaak geweest van de hogere NO<sub>x</sub>-emissies. De hogere NO<sub>x</sub>-emissies zijn mogelijk ook te verklaren doordat de wolk met rookgassen nu eenmaal groter was en daardoor minder verdund werd in vergelijking met de metingen bij lage debieten.

De contouren van de vlam zijn vastgelegd met een warmtebeeld camera zodat deze konden worden vergeleken met de modellen. Tevens is de warmtestraling van de vlam vastgelegd, deze piekte bij het hoogste debiet op 14 kW/m<sup>2</sup>, op een afstand van 2m van de vlam. Deze gegevens zijn bruikbaar bij het opstellen van de veiligheidsafstanden die gehanteerd moeten worden bij een dergelijke fakkelinstallatie.

Bij de directe en vertraagde ontstekingen zijn geen drukgolven waargenomen door de vier aanwezige personen.

## 5. Modelleren van het waterstof-fakkelen

### 5.1 Doelen van modelleren

Om een fakkelsysteem te analyseren, moeten de eigenschappen van het gas aan de fakkeltip bekend zijn. Met name de karakterisering van de straal is belangrijk. Het stroomprofiel in het volledige fakkelsysteem kan worden gebruikt om de experimentele opstelling veilig te ontwerpen.

Verskillende niveaus van simulatie kunnen worden gebruikt om de stroming van waterstof vanuit het waterstof systeem naar de uiteindelijke verbranding aan de fakkelmond te beschrijven.

Om het stroomprofiel van waterstof naar de fakkeltip te begrijpen, kunnen proces-simulaties worden uitgevoerd. Of het nu gaat om constante fakkelactiviteit of incidentele afblaasgebeurtenissen, proces-simulaties kunnen worden uitgevoerd om de eigenschappen van het gas en de capaciteit van het systeem op elk moment te monitoren. Enkele voorbeelden van dergelijke tools zijn Flarenet (Internationaal), Aspentech Flare System Analyzer, PROMAX, Schlumberger's Flaresim/Flaresim Green, of Schlumberger's OLGA.

De vrijgave van waterstof en de verbranding ervan kunnen worden gemodelleerd met behulp van dispersie- en vlammodellen. Deze zijn zeer rekentechnisch efficiënt en zijn gebaseerd op experimentele gegevens en bijbehorende theorie. Uit deze modellen kunnen de vorm van de vlam, de aerodynamische en temperatuurprofielen worden berekend. Hieruit kunnen andere afgeleide grootheden zoals warmtestraling en geluidscontouren worden afgeleid. De bovengenoemde tools omvatten doorgaans deze functionaliteit. Een voorbeeld daarvan is Sandia National Labs' HyRam+ [4]. HyRAM+ is een voortdurend uitbreidend gereedschap dat op handige wijze verschillende analytische modellen omvat en koppelt.

Computational Fluid Dynamics (CFD) kan worden gebruikt voor specifieke ontwerpen of omstandigheden die buiten het toepassingsgebied van meer conventionele modellen vallen, zoals hierboven beschreven. CFD-simulaties zijn echter zeer tijdrovend voor dergelijke toepassingen, aangezien de (i) behoudsvergelijkingen in hun volledige vorm moeten worden opgelost, (ii) rekening houdend met de verschillende moleculen die deelnemen aan het proces, een representatie van de verbrandingsreacties en (iii) een stralingsmodel voor nauwkeurigere voorspellingen. Volledige CFD-simulaties zijn niet in dit onderzoek overwogen.

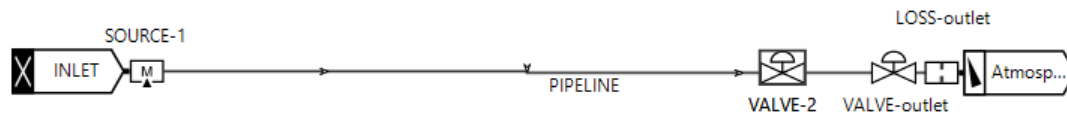
### 5.2 Toepassing op experimentele opstelling

#### 5.2.1 Stroomprofiel langs de leidingen

Zoals beschreven in paragraaf 3.2, bestaat de opstelling uit een waterstofcilinders en het buisleidingsegment als buffer, een overdrachtsslang, een verticale fakkelkolom met een vlamdover en de demper aan de tip. De fakkel is gemodelleerd in Schlumberger's OLGA (2021.1.2) als vier verschillende buiselementen, inclusief een horizontaal gedeelte (overdrachtsslang), twee verticale secties van 1,5 meter en één verticale sectie van 0,25 meter (diffusor/demper). De leidingen die waterstof naar de tip leiden, hebben een binnendiameter van 2" en de demper is gemodelleerd als een kort stuk met een binnendiameter van 4". Daarnaast zijn er enkele elementen geïntroduceerd:

- Een virtuele klep bij de overgang van de slang naar de demper. Dit is een 2" klep met een discharge coëfficiënt van 0,84. Deze klep is opgenomen om ervoor te zorgen dat *choking* kan optreden bij deze overgang als de drukverhouding dit vereist.
- Een drukval-element met een wrijvingscoëfficiënt van 1 bij de overgang van de fakkel naar de demper.

- Een drukval-element met een wrijvingscoëfficiënt van 1 bij de overgang van de demper naar de omgeving.
- Een virtuele klep op de positie van de vlamdover. Deze klep is opgenomen zodat kritische stroming (*choking*) kan optreden in de vlamdover. De grootte is aangepast om de gewenste drukval te verkrijgen zoals gespecificeerd door de fabrikant.



Figuur 18 Overzicht van het OLGA-model dat wordt gebruikt om de stromingsprofiel naar de fakkels te beschrijven in de experimentele opstelling.

Het modelleren van de vlamdover verdient speciale aandacht. De gebruikte component KITO® FS-Def0-IIC in de experimenten heeft wrijvings eigenschappen zoals weergegeven in Figuur 18. Zoals te zien is in de figuur, bereikt de maximale stroom die in deze specificatie voor de maat 2" wordt behandeld, een maximale capaciteit van 60 Nm<sup>3</sup>/h (1 Nm<sup>3</sup>/min) en een drukval van 100 mbar. Het is echter belangrijk op te merken dat deze waarden gelden voor lucht bij normale omstandigheden als het procesgas. Dit moet worden vertaald naar waterstof. De leverancier geeft aan dat, om deze grafiek voor waterstof te gebruiken, de waarden moet worden aangepast op basis van de volgende vergelijking:

$$Q' = Q \sqrt{\frac{\rho}{1.293}}$$

waarbij  $Q'$  de waarde is van het debiet [m<sup>3</sup>/min] die moet worden gebruikt,  $Q$  het werkelijke verwachte debiet is voor waterstof [m<sup>3</sup>/min] en  $\rho$  de dichtheid van waterstof bij een bepaalde druk. Hoewel dit voor de meeste gevallen geldig zal zijn, bevat het de impliciete veronderstelling dat het Reynolds-getal hoog genoeg is om geen tweede orde effecten te observeren, en dat de drukval matig is. In de gezochte experimentele omstandigheden wijken de dichtheid van waterstof en lucht echter aanzienlijk af, evenals de drukval over de vlamdover (met een limietwaarde van 16 bar in de drukregelaars, die aanzienlijk groter is dan de maximale waarde van 100 mbar die **Error! Reference source not found.** bestrijkt). Daarom wordt een alternatieve methode voorgesteld waarbij de drukval wordt geschaald volgens:

$$\Delta P_{H_2} = \Delta P_{air} \frac{\rho_{air}}{\rho_{H_2}} \frac{\rho_{(n),H_2}^2}{\rho_{(n),air}^2} \frac{Q_{(n),H_2}^2}{Q_{(n),air}^2}$$

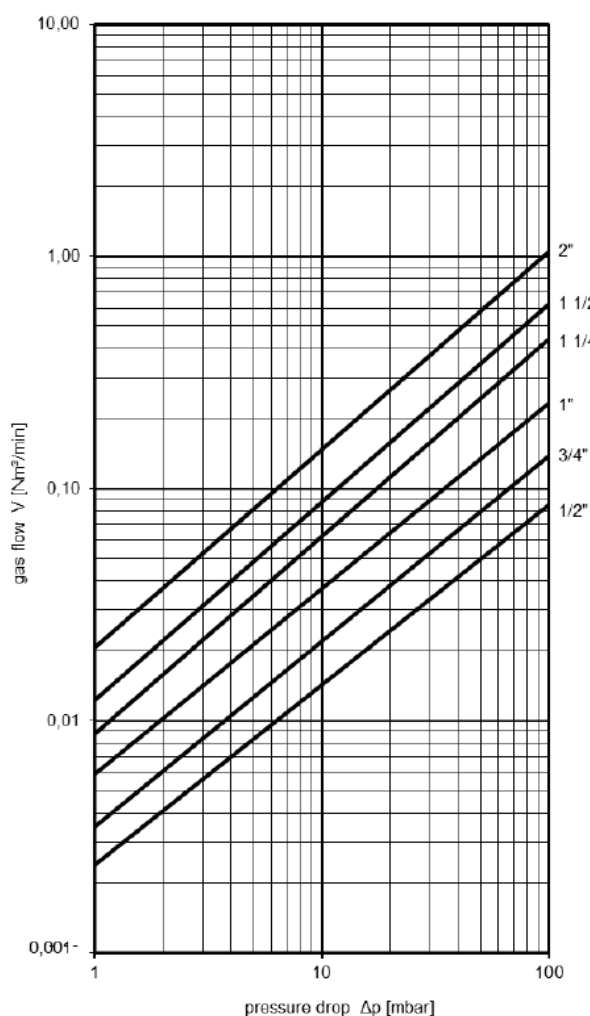
waarbij  $\Delta P$  de drukval voorstelt [mbar] en  $\rho$  is de gasdichtheid [kg/m<sup>3</sup>]. De tweede methode vereist eerst de berekening van de drukval voor de situatie met lucht, zodat de wrijvingscoëfficiënt bij het hoogste debiet kan worden gebruikt voor de waterstofsituatie.

De vergelijking tussen de twee methoden wordt gegeven in Tabel 8. Zoals verwacht wijken de methoden bij lage debieten nauwelijks af, maar naarmate de omstandigheden extremer worden, geeft de alternatieve methode aanzienlijk grotere drukval over de vlamdover aan<sup>3</sup>.

In de simulatieresultaten die in dit gedeelte worden gepresenteerd, wordt de alternatieve methode gevolgd.

Tabel 8. Drukval berekend bij de vlamdover voor 4 verschillende waterstofdebieten, volgens de vertaling zoals aangegeven door de leverancier of de alternatieve indirecte methode op basis van de gegevens verstrekt door de leverancier.

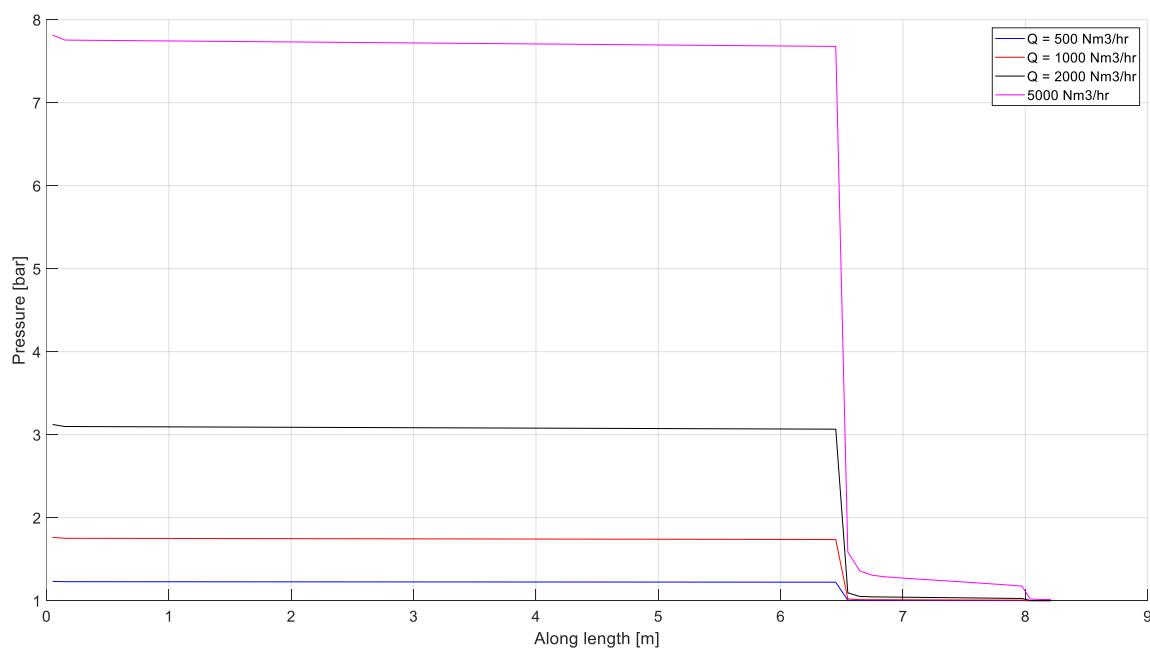
	Direct translation manufacturer	Scaling from manufacturer data
H <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /hr]	[pressure upstream [bara]	[pressure upstream [bara]
500	1.22	1.2
1000	1.44	1.7
2000	1.88	3.0
5000	3.21	7.0



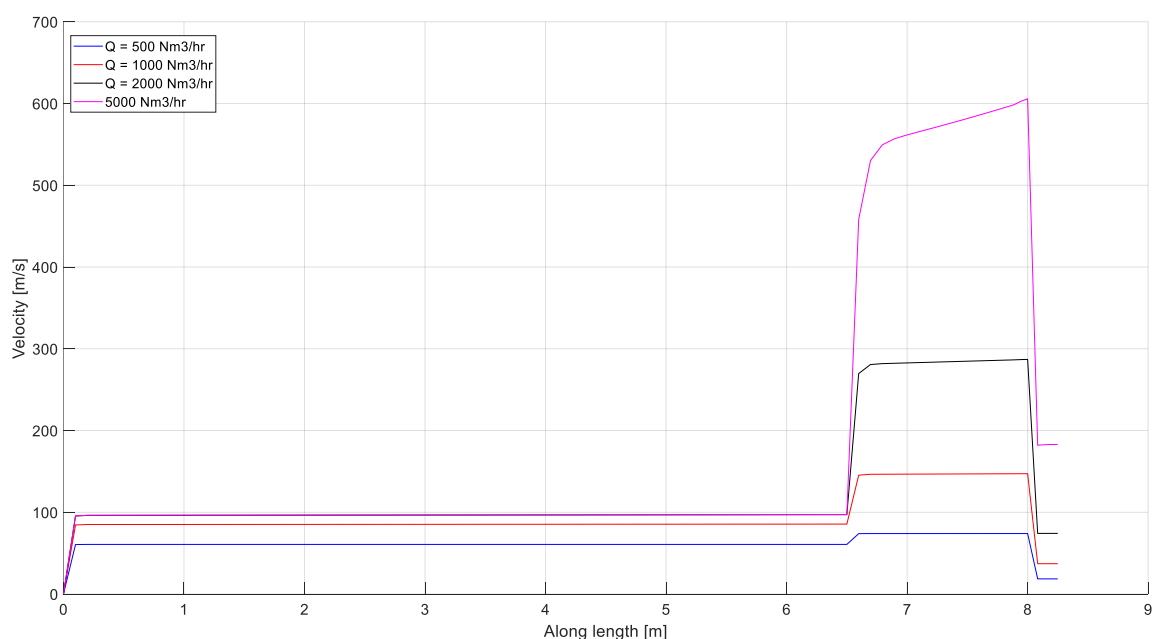
Figuur 19. Pressure drop specification for KITO® FS-Def0-IIC. Assumes air at normal conditions.

<sup>3</sup> De leverancier is rechtstreeks geraadpleegd over de dimensionering van de vlamdover voor de beoogde debieten, en heeft vastgesteld dat een component van 5" de optimale keuze zou zijn in plaats van 2". Dit betekent niet dat 2" niet mogelijk is, mits het systeem geschikt is voor de aanzienlijk hogere drukken die worden verwacht.

Het drukprofiel en het stroomsnelheidsprofiel langs de experimentele opstelling voor debieten variërend van 500 tot 5000 m<sup>3</sup>/h worden getoond in Figuur 20 en Figuur 21. Voor 5000 m<sup>3</sup>/h wordt de maximale druk stroomopwaarts berekend op ~7,7 bar(a) en wordt een pieksnelheid van 600 m/s berekend als de stroomsnelheid bij het binnengaan van de demper. In de experimenten worden drukwaarden rond 7 bar(g) (dwz ~8 bar(a)) geregistreerd. Dit geeft aan dat de drukval in de vlamdover beter overeenkomt met het voorgestelde alternatieve model en dat de simulaties voldoende betrouwbaar zijn voor alle metrische gegevens met betrekking tot de waterstofomstandigheden stroomopwaarts van de fakkeltip.



Figuur 20. Drukprofiel langs de buisleiding tot de fakkeltip.



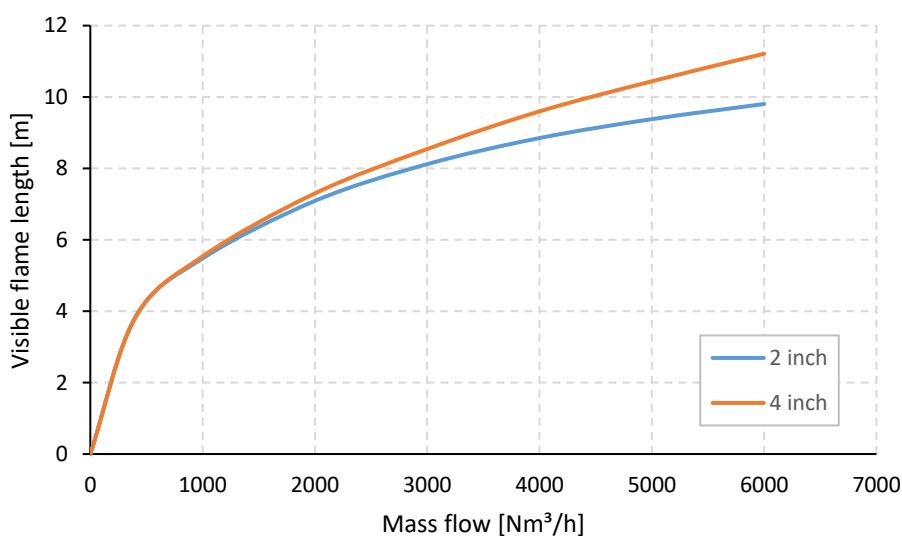
Figuur 21. Gassnelheid langs de buisleiding tot de fakkeltip.

### 5.2.2 Beschrijving van de vlam

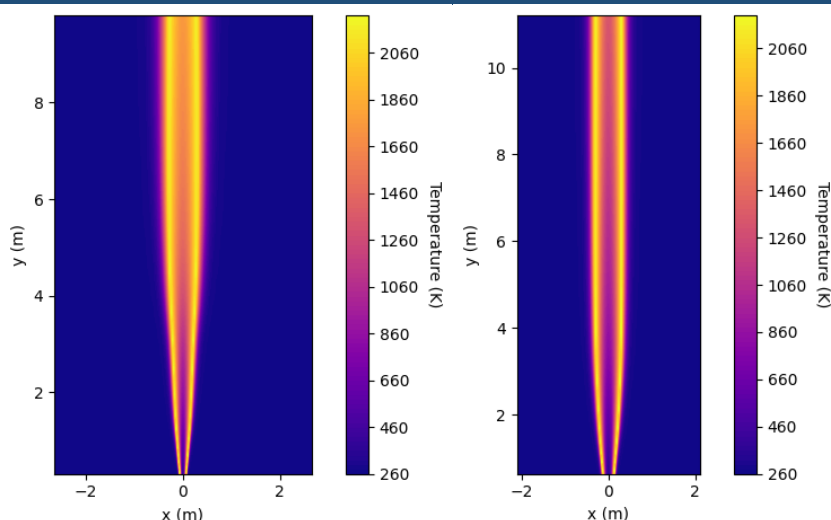
Het is belangrijk om te weten of de fakkeltip functioneert zoals bedoeld en er geen onontstoken waterstofwolken worden gevormd. Zoals is gebleken uit de experimenten, kan een waterstofvlam tijdens daglichtomstandigheden zeer moeilijk zichtbaar of zelfs onzichtbaar zijn. Analytische modellen geïmplementeerd in de HyRAM+ tool zijn gebruikt voor de uitgevoerde experimenten. HyRAM+ is een voortdurend uitbreidend gereedschap dat op handige wijze verschillende analytische modellen omvat en koppelt. De vlamkarakterisering geïmplementeerd in HyRAM+ is gebaseerd op het werk van Houf en Schefer [5] [5]. De volgende aannames zijn gedaan bij het gebruik van de tool:

- Waterstof wordt vrijgegeven vanaf de fakkeltip met een diameter van 2 inch en 4 inch, vanwege de aanwezigheid van de demper die het scenario onzekerder maakt.
- Er wordt geen extra ontladingscoëfficiënt (oppervlaktecorrectie) toegepast.
- Windcondities worden verwaarloosd.
- De debiet is afgestemd op een aantal experimentele waarden.

De berekende *zichtbare* vlamlengte wordt weergegeven in Figuur 22. Alleen bij grotere debieten zijn er enkele kleine verschillen in de zichtbare vlamlengte tussen de veronderstellingen van 2" en 4", als gevolg van een enigszins verschillend evenwicht tussen de impuls van de straal en de opwaartse kracht. Een voorbeeld van de vlamvorm bij 6000 Nm<sup>3</sup>/h (2") wordt getoond in Figuur 23. Het model geeft een zeer gladde, ongestoorde vlamgeometrie weer die geen rekening houdt met het genereren van turbulentie of windstoten die deze vorm verstoren.



Figuur 22. Berekende zichtbare vlamlengte als functie van massadebiet van waterstof van een fakkeltip van 2" of 4"..



Figuur 23. Berekende vlamgeometrie. Links: vrijgave met een 2" opening; rechts: vrijgave met een 4" opening.

### 5.2.3 Warmtestraling

De warmtestraling van een open vlam is zeer belangrijk voor de veiligheid van omstanders. Het stralingsvermogen dat wordt geproduceerd door een open vlam wordt (lineair) bepaald door de verbrandingswarmte van de brandstof en het massadebiet van de brandstof, gereguleerd door de stralingsfractie. De stralingsfractie is afhankelijk van waterstofgerelateerde eigenschappen en de beschrijving van de vlam. Hoewel de schade die door warmtestraling aan mensen wordt veroorzaakt afhankelijk is van zowel de grootte als de blootstellingstijd, wordt over het algemeen aangenomen dat een drempelwaarde van  $1,58 \text{ kW/m}^2$  veilig is <sup>4</sup>voor continue blootstelling.

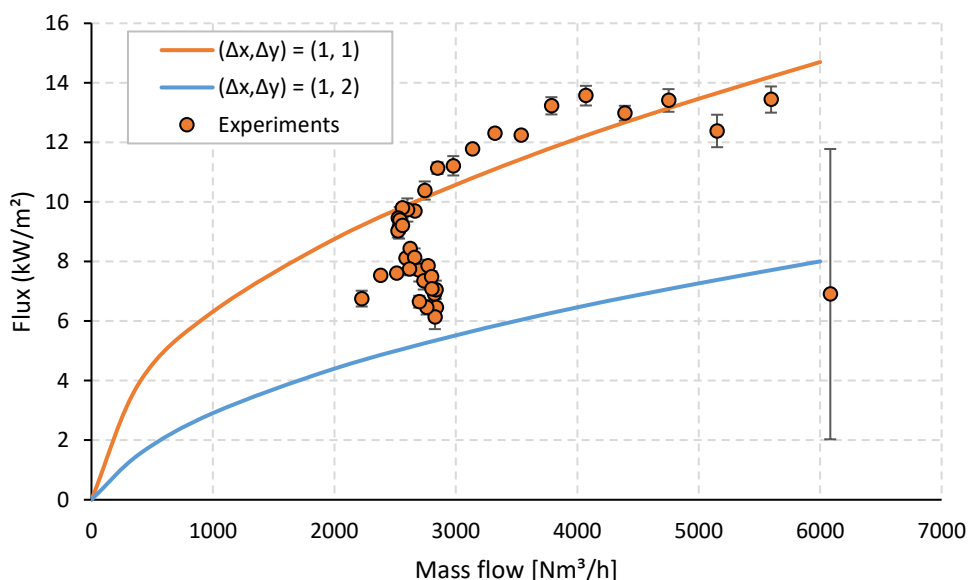
De warmtestralingscontouren zijn gekarakteriseerd voor de omstandigheden zoals gemeten in de experimenten om de haalbaarheid van het gebruik van dergelijke tools voor toepassing in grotere installaties te bepalen. Figuur 24 toont de berekende waarden in vergelijking met de gemeten waarden. De berekeningen worden uitgevoerd op twee radiale afstanden in het vlak 1 meter boven de opening van de fakkelmond: 1 meter en 2 meter. Het verschil in de berekende waarden laat de gevoeligheid zien van de relatieve positie tussen de ontvanger en de positie van de vlam. Windcondities worden niet meegenomen in de berekeningen.

De resultaten tonen een redelijke overeenkomst tussen de berekeningen op 1 meter afstand van de fakkelmond, met een maximale afwijking van 20%, vooral tijdens de debietswisseling. Bij debieten rond  $2000\text{--}3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  geven de metingen een breed scala aan stralingswarmtestromen tussen 6 en  $10 \text{ kW/m}^2$ , een variatie die wordt verondersteld te worden veroorzaakt door windstoten die de positie van de vlam veranderen en daarmee de straling op een vast punt. Het totale experiment duurt ongeveer 80 seconden, waarvan ongeveer 40 seconden in dit debietbereik, met een mogelijkheid voor wind om deze metingen te verstoren.

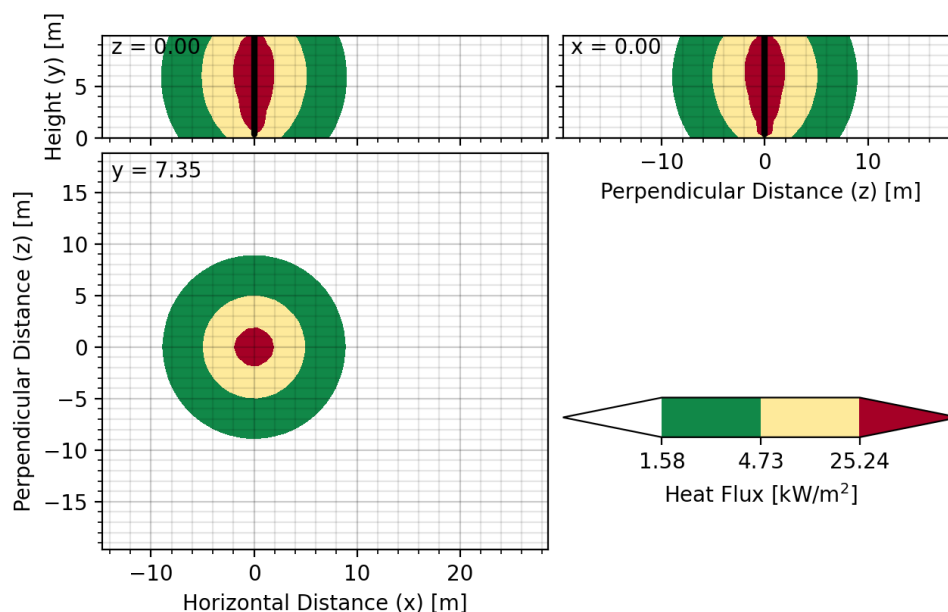
Bij het maximale debiet van  $6000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  wordt de veilige afstand van de fakkeltip weergegeven in Figuur 25. In deze grafiek is te zien dat een afstand van ongeveer 10 meter noodzakelijk is om onder de drempelwaarde van  $1,58 \text{ kW/m}^2$  te blijven. In de praktijk, omdat de stapel zich op een nominale hoogte van 1,5 meter boven de grond bevindt, kan de waarde worden verlaagd tot ongeveer 8 meter. Vanwege de windcondities wordt echter aanbevolen om op afstanden  $> 10$  meter te blijven.

<sup>4</sup> Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY) EIGA DOC 211/17 Table 3

Gezien de redelijke overeenstemming tussen de berekeningen en de experimenten kan worden gesteld dat de modellen die zijn ingebed in de HyRAM-tool nuttig kunnen zijn om de vlamkenmerken en veilige afstanden te bepalen bij het gebruik van daadwerkelijke mobiele fakkels om segmenten van het hogedruknetwerk te ontgassen.



Figuur 24. Berekende stralingswarmteflux [ $\text{kW/m}^2$ ] op twee relatieve posities vanaf de opening van de fakkeltip. De experimenteel geregistreerde waarden worden ter vergelijking gegeven.



Figuur 25. Veilige afstand berekend met behulp van de HyRAM-tool, waaruit blijkt dat een afstand van ongeveer 10 meter vanaf de verticale as van de fakkeltip noodzakelijk is bij debieten van  $6000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .



#### 5.2.4 Geluid

Het geluid van fakkelen wordt geproduceerd door verschillende mechanismen, het belangrijkste zijn:

- Verbrandingsgeluid
- Jet Turbulentie/menggeluid,

Ondanks de complexiteit van deze geluidsproducerende mechanismen, zijn er in de literatuur een aantal modellen beschikbaar die een schatting kunnen geven van het geluid geproduceerd door een fakkel aan de hand van een enkele vergelijking. De modellen worden kort beschreven in de volgende alinea. Modelvoorspellingen op basis van procesomstandigheden tijdens de fakkeltest worden onderzocht in volgende secties.

##### *Eenvoudige fakkelgeluid modellen*

Referentie [6] geeft een eerste overzicht van modellen die kunnen worden gebruikt voor het schatten van fakkelgeluid, hoewel er nog meer opties beschikbaar zijn.

De VDI 3272 [7] is de meest eenvoudige methode, en beschrijft het totale geluidsvermogensniveau voor een verhoogde (open) fakkel als

$$L_{WA} = 112 + 17 \log_{10} \left( \frac{Q}{Q_0} \right)$$

Het model gaat uit van een eenvoudige relatie tussen het geluidsvermogensniveau  $L_{WA}$  (in dBA) en de totale massastroom  $Q$  uitgedrukt in ton per uur (t/h). Parameter  $Q_0$  is een referentiewaarde van 1 t/h. Het door Mueller-BBM ontwikkelde model is iets verfijnder:

$$W_{AC} = TAE \cdot \alpha \cdot Q \cdot H$$

waarin

$W_{AC}$	Acoustic geluidsvermogen (W)
TAE	Thermo-akoestische efficiëntie (-)
$\alpha$	Conversion constante, 0.293 W.hr/Btu
H	Verwarmingswaarde (Btu/lb)
Q	Massastroom (lb/h)

Het BBM-Mueller model gaat ervan uit dat een constante fractie van de totale energie in de vlamzone wordt omgezet in geluid. Dit wordt de thermo-akoestische efficiëntie (TAE) genoemd. Er worden een breed scala aan mogelijke waarden gemeld voor koolwaterstoffakkels, variërend van  $10^{-6}$  tot  $10^{-9}$  [8].

De universiteit van Sabratha heeft een model ontwikkeld dat het geluidsvermogensniveau schat vanuit

$$W_{AC} = \frac{(K - 1)\gamma Q^2 U_{FLAME}^2 d/V}{4\pi\rho c}$$

waarin

$W_{AC}$	Acoustic geluidsvermogen (W)
K	Gas expansieverhouding (-)
G	Stoichiometrische lucht-brandstofverhouding (-)
Q	Massastroom (kg/s)

$U_{\text{FLAME}}$	Gemiddelde stroomsnelheid door het vlamgebied (m/s)
$d$	Diameter vlamgebied (m)
$V$	Volume van het vlamgebied (m <sup>3</sup> )
$\rho$	Dichtheid van lucht (kg/m <sup>3</sup> )
$c$	Snelheid van geluid in lucht (m/s)

#### Toepassing op de tests

De hierboven samengevatte modellen zijn gebruikt om een schatting te maken van de geluidsniveaus die ervaren zijn tijdens de fakkeltests. De volgende procesomstandigheden worden aangenomen als representatief voor die omstandigheden.

Tabel 9. Overview of relevant parameters for the noise prediction models.

Symbool	Beschrijving	Waarde	Eenheid
$r$	Afstand microfoon tot fakkel	6	m
$T_0$	Omgevingstemperatuur	288.15	K
$p_0$	Omgevingsdruk	1.015	bara
LHV	Onderste verwarmingswaarde van waterstof	120	MJ/kg
$K$	Expansieverhouding	848	-
$\gamma$	Stoichiometrische lucht-brandstofverhouding	0.029	-
$\rho_{\text{HN}}$	Dichtheid van waterstof onder normale omstandigheden	0.0899	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{AN}}$	Dichtheid van lucht onder normale omstandigheden	1.2	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	Snelheid van het geluid in lucht	340	m/s

Er is een veldtest georganiseerd waarin een vast en onder druk staand volume waterstof werd afgefakkeld naar de omgeving. Het proces kan worden voorgesteld als het legen van een ballon, waarbij de aandrijfdruk en uitstroomsnelheid geleidelijk afnemen naarmate het volume wordt geleegd. Omdat de stroomsnelheid in de loop van de tijd verandert (Figuur 11), is een directe vergelijking met geluidspredictiemodellen ingewikkelder. Informatie over procesomstandigheden en opgenomen geluid bij een bepaalde (constante) stroomsnelheid zou bekend moeten zijn, waarvoor de proces simulaties zijn uitgevoerd (paragraaf 5.2.1).

De op 9 februari om 15:20 uur opgenomen gegevens (meting 9 zoals beschreven in Tabel 3, label geluidsfile 20230209\_152057) zullen worden gebruikt voor de vergelijking. De volumestroomsnelheid tijdens dit experiment wordt gezien als afnemend van 7020 Nm<sup>3</sup>/h tot ongeveer 2350 Nm<sup>3</sup>/h binnen 94 seconden. Het geluid berekend bij 7000 Nm<sup>3</sup>/h en 2500 Nm<sup>3</sup>/h zal daarom worden berekend met behulp van de geluidsmodellen, met het doel een boven- en ondergrens te geven aan het verwachte geluid van de fakkel. Deze zullen dan worden vergeleken met het gemiddelde geluid gemeten tijdens de test.

Tijdens meting 9 was de afstand van de microfoon tot de fakkelininstallatie ingesteld op 6 meter. Het equivalent geluidsniveau  $L_{A,eq}$  werd gemeten als 81 dBA, hoewel de niveaus schommelden tussen een maximum van 96.9 dBA (grootste stroomsnelheid) en 64.2 dBA (waarschijnlijk gemeten wanneer er geen stroom meer is).

Tabel 10. Geluidspredicties volgens VDI 3272 voor een verhoogde fakkel.

Debiet [Nm <sup>3</sup> /h]	Geluidsdruk niveau op een afstand van 6m [dBA]
7000	82
2500	73.9

Ondanks de eenvoudige aanpak in de VDI 3272, zijn de geschatte geluidsdruk niveaus (in dBA) van de juiste grootteorde.

Tabel 11. Geluidspredicties volgens het Mueller-BBM model, gebruik makend van een gebied van thermo-akoestische efficiëntie.

Debiet [Nm <sup>3</sup> /h]	Aangenomen TAE (-)	Geluidsdruk niveau op een afstand van 6m [dBA]
2500	1e-4	62
	1e-5	52
	1e-6	42
7000	1e-4	67
	1e-5	57
	1e-6	47

Het Mueller-BBM geluidspredictiemodel is eenvoudig te gebruiken, omdat het een lineaire relatie veronderstelt tussen de massastroomsnelheid en het geluidsvermogen. Het Mueller-BBM model leunt echter sterk op een gegeven aanname voor de thermo-akoestische efficiëntie die voor de hele fakkel kan worden gebruikt. Dit is over het algemeen niet het geval; voor een gegeven massastroomsnelheid varieert de efficiëntie waarmee geluid wordt gecreëerd door het hele vlamgebied. Bovendien is de TAE afhankelijk van de massastroomsnelheid. Men vermoedt dat dit bijdraagt aan het verschil tussen het voorspelde geluidsniveau en het gemiddelde geluidsdruk niveau.

Tabel 12 Geluidspredicties van het model ontwikkeld door de Universiteit van Sabratha. Eigenschappen van het vlamgebied genomen uit HyRAM simulaties (4 inch).

Debiet (Nm <sup>3</sup> /h)	Flame height (m)	d (m)	U <sub>FLAME</sub> (m/s)	Sound pressure level at distance of 6m (dB)
2500	8	0.1016	85.7	81.0
7000	12	0.1016	239.8	94.1

Sommige resultaten van de in paragraaf 5.2.2 gerapporteerde HyRAM-berekeningen zijn gebruikt als input voor de berekeningen. Met name de hoogte van de fakkel bij de corresponderende stroomsnelheid wordt gebruikt om de gemiddelde stroomsnelheid door de verbrandingszone te berekenen via

$$U_{FLAME} = \frac{Q_m}{1/4 \pi d^2 \rho}$$

waarin  $Q_m$  de brandstofmassastroom (kg/s) is,  $d$  is de diameter van het stroomgebied dat het meeste waterstof bevat (m) en  $\rho$  is de dichtheid van waterstof onder de heersende omstandigheden. Als een eerste benadering wordt de waarde van  $d$  gelijk gesteld aan de uitlaatdiameter van 4 inch. Met deze benadering wordt aangetoond dat de voorspellingen van het model dat door de

universiteit van Sabratha is ontwikkeld redelijk overeenkomen met het gemeten gemiddelde equivalente geluidsniveau van 81 dBA.

Het is belangrijk om op te merken dat het niet mogelijk is om geluidsdruk niveaus uitgedrukt in dBA direct te vergelijken met niveaus uitgedrukt in dB. Geluidsdruk niveaus uitgedrukt in dBA zijn frequentiegewogen met behulp van een A-filter. A-weging is een procedure waarbij de frequentie-inhoud van een signaal wordt gewogen op basis van de waargenomen luidheid van geluiden die door het menselijk oor worden waargenomen. A-weging geeft meer gewicht aan frequenties in het middenbereik van het hoorbare bereik van de mens en minder waarde aan frequenties dicht bij de randen. Conversie van dBA naar lineaire dB en vice versa kan daarom niet worden gedaan zonder kennis van de spectrale inhoud (amplitude per frequentie bin) van het betreffende signaal. De waarden zullen over het algemeen overeenkomen als de meeste akoestische energie aanwezig is tussen 700 en 10 kHz.

## 6. Conclusie, discussie en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies experimenteel onderzoek

Met de gebruikte fakkelininstallatie is aangetoond dat het affakkelen van debieten in de ordegrootte van 500, 2.500, 4.000 en 6.000 Nm<sup>3</sup>/h mogelijk zijn. Bij een langzaam afnemend debiet treedt er geen vlaminslag op. Of de ingebouwde vlamdover noodzakelijk was om dit te voorkomen is niet vastgesteld.

Er is geen sprake van overmatige geluidsproductie of een voelbare drukgolf tijdens de experimenten met het fakkelen. Ook tijdens de vertraagde ontstekingstesten tot 8 bar zijn geen excessen in druk of geluid geconstateerd. Tijdens de beproevingen van het vertraagd ontsteken is er onverbrand waterstof uit de fakkel gestroomd met 250, 1.900 en 3.200 Nm<sup>3</sup>/h. Gedurende deze uitstroom is het waterstof niet spontaan ontstoken, maar was een externe bron nodig om de vlam te initiëren.

Uit te beperkte meetresultaten is gebleken dat bij een toenemend waterstofdebiet de concentratie NO<sub>x</sub> in de rookgassen toe neemt. Bij het laagst geteste debiet (700 Nm<sup>3</sup>/h) is de gemeten NO<sub>x</sub>-emissie ongeveer 100 ppm, bij het hoogst geteste debiet (6.000 Nm<sup>3</sup>/h) is de gemeten NO<sub>x</sub>-emissie 800 ppm.

De warmtestraling van de vlam is vastgelegd door een warmtestralingssensor, deze piekte bij het hoogste debiet op 14 kW/m<sup>2</sup> op een afstand van 2m van de vlam. Deze gegevens zijn bruikbaar bij het opstellen van de veiligheidsafstanden die gehanteerd moeten worden bij een dergelijke fakkelininstallatie. Daarnaast zijn de resultaten van de warmtestraling sensor, in combinatie met de vlamcontouren vastgelegd door een warmtebeeld camera, gebruikt om de modellen te toetsen aan de werkelijkheid.

### 6.2 Conclusies theoretisch onderzoek

Modelleringsactiviteiten zijn uitgevoerd om schattingen te maken van de stroomprofiel tijdens de tests en zo te begrijpen of de modellen kunnen worden gebruikt voor grootschalige toepassingen. Een model van de testopstelling is gebouwd in OLGA en de verbranding bij de fakkel is bestudeerd met HyRAM+. De volgende conclusies zijn verkregen:

- Feedback vanuit industrie geeft aan dat er voldoende kennis is om een fakkel te ontwerpen die geschikt is voor waterstof op grote schaal. Bestaande modellen of technische normen kunnen hiervoor worden gebruikt. Er kunnen mogelijkheden zijn om bestaande aardgasfakkels om te bouwen voor waterstof, hoewel hierover geen sterke verklaring is ontvangen. Er werd ook opgemerkt dat fakkelen de voorkeur heeft boven afblazen, om ongecontroleerde ontstekingen te voorkomen en om milieu redenen. Echter, geen van de geconsulteerde leveranciers had toepassingen van mobiele fakkels voor waterstofs-service.
- Waterstof zal sneller in een bepaald volume uitzetten in vergelijking met aardgas. Dit resulteert in een hogere vlam. Voor een bepaalde druk en brandergeometrie, zal de resulterende volumestroom ongeveer 3 keer groter zijn in vergelijking met die van aardgas.
- De vlamdover in de opstelling vormt een choking, dus de massastroomsnelheid is rechtstreeks gekoppeld aan de druk stroomopwaarts (het resultaat van de druk in de waterstofcilinder en de drukregelaarinstelpunten). De druk stijgt aanzienlijk bij het bereiken van hoge debieten van bijna 6000-7000 m<sup>3</sup>/h. Het model en de experimenten kwamen zeer goed overeen. Dit moet in overweging worden genomen bij het dimensioneren van grootschalige installaties.

- Uiteindelijke vlammen bij debieten van 6000 m<sup>3</sup>/h worden berekend op ongeveer 10 meter hoogte, met hot spot temperaturen van ongeveer 2000 K. Het totale uitgestraalde vermogen bij maximale stroomsnelheden is meer dan 1 MW, met waarden die veilige blootstellingsniveaus (< 1.58 kW/m<sup>2</sup>) bereiken op afstanden van ongeveer 10 meter. De berekende waarden komen goed overeen met de gemeten niveaus op de meetlocatie.
- Geluidsniveaus kunnen worden geschat met behulp van verschillende modellen die zijn gebaseerd op verschillende datasets. Er is redelijke overeenstemming gevonden tussen de modellen en de experimenten (ordegrootte 80 dBA op een afstand van 6 meter, met pieken boven 90 dBA bij maximale stroomsnelheden).

### 6.3 Discussies

Om in geval van werkzaamheden leidingdelen waterstofvrij te maken zal allereerst zo veel als mogelijk uitbufferen en hercompressie moeten plaats vinden om zodoende geen waterstof te verspillen en de impact op het milieu zo beperkt als mogelijk te houden. Als deze hercompressie heeft plaats gevonden, dan zal in geval van het landelijk netwerk de gasdruk nog ongeveer 7 barg bedragen. Dit restgas zal afgeblazen of afgefakkeld moeten worden.

De voordelen van affakelen zijn;

- Er kan geen ongewenste ontsteking buiten de fakkel meer optreden; de ontsteking vindt gecontroleerd plaats
- De wolk met waterstof is beperkt
- De impact van waterstof als broeikasgas is geëlimineerd.

De voordelen van afblazen zijn;

- Er treden geen NO<sub>x</sub>-emissies op
- De kans op vlaminslag is beperkter in vergelijking met affakkelen.
- Geen kans verbranding van componenten in de omgeving

Als de impact van NO<sub>x</sub>-emissies op het milieu beperkter zijn dan de impact van onverbrand waterstof dan gaat de voorkeur uit naar affakkelen.

En hoewel er tijdens de experimenten geen spontane ontsteking werd waargenomen, hebben verschillende partijen die zijn geraadpleegd unaniem en sterk aanbevolen om de vorming van een waterstofwolk te vermijden door af te fakkelen. Hiermee wordt het niet-verwaarloosbaar broeikasgaspotentieel ook voorkomen. Daarom wordt geconcludeerd dat affakkelen de voorkeur heeft boven afblazen. Een vlamdover bij het affakkelen in geval van het drukloos maken is theoretisch gezien niet nodig. Nadat de leidingsectie drukloos is gemaakt, zal de leidingsectie waterstofvrij gemaakt moeten worden. Dit moet gedaan worden met stikstof om zodoende te voorkomen dat er een brandbaar mengsel in de leidingsectie ontstaat. Nadat de werkzaamheden aan de leidingsectie zijn uitgevoerd zal het weer lucht vrij gemaakt moeten worden. Dit wederom door te spoelen met stikstof, waarbij wordt afgeblazen via de afblaas-/fakkelininstallatie. Bij een beperkte leidinginhoud is de hoeveelheid stikstof die daarna wordt meegevoerd met het waterstof mogelijk acceptabel. Als dat niet het geval is dan de nog afgesloten leidingsectie waterstofvoerend maken door te spoelen via de afblaas-/fakkelininstallatie totdat er voldoende waterstof wordt gemeten bij de afblaasopening of totdat het waterstof bij de fakkelininstallatie is ontstoken (continue bekrachtigde ontsteking). Voor het geval er onverhoopt toch lucht in de leidingsectie is achtergebleven is het raadzaam om voor de zekerheid een vlamdover in de fakkelininstallatie toe te passen.

Het is niet onderzocht in hoeverre de in dit onderzoek verkregen resultaten te extrapoleren zijn naar grotere debieten, diameters en drukken.

## 6.4 Aanbevelingen

In eerste instantie heeft het affakkelen na hercompressie de voorkeur boven afblazen na hercompressie. Zie ook paragraaf 6.3. In het kader van NOx-emissies is het wel raadzaam om opvolging te geven aan de volgende aanbevelingen.

- Nagaan in hoeverre emissies van NOx (orde grootte 0 tot 1000 ppm in het rookgasdebiet) bij affakkelen qua impact op het milieu in verhouding staan met de emissie van waterstof (100% van het debiet) bij afblazen.
- Aanvullend onderzoek uitvoeren naar NOx-emissies bij fakkelininstallaties bij toepassing van zowel aardgas als waterstof. Bij deze vergelijkingsmetingen zal met een grote meetspin zo veel als mogelijk de rookgassen bemeten dienen te worden.
- Zorg dat de markt fakkelininstallaties gaat ontwerpen die de NOx-emissies zo veel als mogelijk beperken. De metingen genoemd bij 2 kunnen hier ondersteunend bij zijn. Een beperkende factor op de vorming van NOx is mogelijk de beperking van het af te fakkelen debiet.

Het wordt aanbevolen om na te gaan in hoeverre de verkregen resultaten geëxtrapoleerd kunnen worden voor toepassing van affakkelen van grotere debieten en bij grotere diameters

In de interviews met industrie werd in het algemeen aangegeven dat het ontwerpen van fakkels die geschikt zijn voor waterstof mogelijk is zonder aanvullend onderzoek. Deze stand van kennis wordt ook bevestigd door de redelijke overeenstemming tussen bestaande (openlijk beschikbare) modellen en de uitgevoerde experimenten. Tegelijkertijd zijn mobiele fakkels voor waterstofs-service nog niet commercieel beschikbaar. Daarom wordt aanbevolen om een marktconsultatie te houden met gespecialiseerde leveranciers om de voorwaarden te creëren die nodig zijn voor de ontwikkeling van commerciële producten op middellange termijn.



## 7. Beantwoording van onderzoeksvragen

1. Welke (industriële) standaarden zijn er voor afblazen/affakkelen?  
Verschillende normen in zowel Amerika als Europa bevatten richtlijnen over hoe een systeem moet drukloos worden en zijn inclusief waterstofomstandigheden.
2. Zijn er waterstof fakkelininstallaties te koop?  
Ja, in Nederland worden deze o.a. geleverd door de firma Esders.
3. Wat zijn de verschillen met aardgas wat betreft afblazen en affakkelen?  
Verschillende eigenschappen die belangrijk zijn voor fakkelen verschillen tussen aardgas en waterstof. Over het algemeen zal de lage dichtheid van waterstof bij atmosferische omstandigheden, evenals de eigenschappen van de vlam, de vorm en instabiliteit van de vlam veranderen, met een verhoogd risico op flashback. Dit moet worden aangepakt (meestal) met een vlamdover. Waterstof zal in de meeste gevallen onzichtbaar branden, wat de noodzaak voor speciale vlammonitoringsapparaten vereist (zoals een IR-camera). Verwacht wordt ook dat waterstofvlammen meer geluid zullen maken. Waterstof is gevoeliger voor zelf ontsteking als gevolg van statische elektriciteit ontladingen bij vrijgave.
4. Wat zijn de uitgangspunten voor veiligheid?  
Om de werknemers en het publiek te beschermen tegen de aanwezigheid van de fakkel, moeten de risico's met betrekking tot blootstelling aan warmtestraling en geluid zorgvuldig worden overwogen. Exacte limieten worden bepaald door lokale regelgeving. Voor permanente fakkels worden over het algemeen gesloten ontwerpen als veiliger.
5. Wat is de warmtestraling van een fakkel voor waterstof?  
De warmtestraling van een fakkel kan worden geschat met behulp van bestaande modellen. Bij de uitgevoerde experimenten met de hoogste debieten ( $> 6000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) bedroeg de warmtestraling meer dan 1 MW.
6. Wat is de maximale druk in de fakkelininstallatie?  
De beproevingen zijn uitgevoerd met een maximale druk in het bufferleidingdeel van 16 bar. De druk bij de gasmeter was hierbij maximaal 13 bar. Aangezien er nog wat drukverlies is in de slang tussen de meter en de fakkel, zal de maximale druk bij de vlamdover rond de 13 bar geweest zijn.
7. Wat gebeurt er met de brander? Wat wordt de omvang van de vlam?  
Er is geen verandering waargenomen aan de buitenkant van de fakkelininstallatie. De omvang van de vlam is vastgelegd met een warmtebeeldcamera, de hoogte van de vlam was  $\pm 7.5$  meter bij  $6000 \text{ Nm}^3/\text{h}$
8. Kan waterstof ontstoken worden bij de verschillende debieten/uitstroomsnelheden?  
Het ontsteken van waterstof door middel van een propaanbrander bleek mogelijk te zijn bij debieten in de ordegrootte van 500, 2.500, 4.000 en  $6.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .  
Het ontsteken van waterstof door middel van een vonkontsteker bleek mogelijk te zijn bij debieten in de ordegrootte van 250, 2.000 en  $3.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

9. Wat is het effect van vertraagd ontsteken?  
Bij het vertraagd ontsteken tot 8 bar is er sprake van een iets hoger geluidsniveau in vergelijking met de directe ontsteking van waterstof. De geluidspieken bij directe ontsteking van debieten 1900 en 3200 Nm<sup>3</sup>/h zijn hoger dan de geluidspieken bij directe ontstekingen van 2500, 3750 en 6200 Nm<sup>3</sup>/h. Er is een duidelijkere knal hoorbaar en meetbaar. Bij vertraagd ontsteken is er sprake van een grotere wolk onverbrand waterstof/luchtmengsel in vergelijking met een directe ontsteking van een gelijk debiet. Die grotere wolk verbrand na ontsteking in korte tijd, wat zorgt voor een grotere drukgolf. De ontstane vlam bij vertraagde ontsteking propageert niet alleen naar boven maar ook iets naar beneden.
10. Kan detonatie optreden bij vertraagde ontsteking? (theoretische beschouwing)  
Bij detonatie stijgt de vlamsnelheid boven de geluidsnelheid. Dit gaat gepaard met grote drukgolven. Bij de hoeveelheid, mengverhouding en ontstekingsenergie toegepast tijdens het regulier affakkelen is het optreden van detonatie onwaarschijnlijk, ref [10].
11. Kan bij het afblazen ongewenste ontsteking ontstaan? (bijv. door elektrische ontlading of wrijving door de hoge snelheden)  
Bij de experimentele beproevingen is er onverbrand waterstof door de fakkelininstallatie gestroomd met debieten van 250, 1900 en 3200 Nm<sup>3</sup>/h. Gedurende deze metingen is er geen spontane ontsteking ontstaan. Mocht dit onverhoopt wel gebeuren dan zal deze (vertraagde) ontsteking leiden tot het ontstaan van een vuurbal die langzaam overgaat in een brandende fakkel. Dit wordt gesteld op basis van de resultaten zoals beschreven in 4.2.
12. Wat zijn de effecten van het affakkelen indien de leiding bijna leeg is?  
De fakkelininstallatie, inclusief de vlamdover, dooft rustig. Er zijn geen afwijkende verschijnselen waargenomen.
13. Welke NO<sub>x</sub>-emissies treden op?  
Bij debieten van 700 tot 6.000 Nm<sup>3</sup>/h treedt er een NO<sub>x</sub>-emissies (lucht vrij) op van 200 tot 850 ppm.  
Op dit moment worden er in Nederland geen eisen gesteld aan NO<sub>x</sub>-emissies bij fakkels die worden gestookt op aardgas of op waterstof. Enerzijds omdat het een fakkelininstallatie is en anderzijds omdat het gas dat verstoekt wordt van schone kwaliteit is.  
Hoewel het aantal bedrijfsuren niet van invloed is op het wel of niet van toepassing van NO<sub>x</sub>-eisen, is het aannemelijk dat fakkelininstallaties zoals gebruikt door de nationale netbeheerder en de regionale netbeheerders per installatie minder dan 500 uur per jaar in bedrijf zijn. Om deze reden is het stellen van criteria aan NO<sub>x</sub>-emissie minder voor de hand liggend. Het is wel zinvol om na te gaan welke NO<sub>x</sub>-emissies optreden bij fakkelininstallaties die worden gestookt om aardgas. De 800 ppm NO<sub>x</sub> is wel aan de forse kant. Om die reden is het zinvol om na te gaan op welke wijze de NO<sub>x</sub>-emissies gereduceerd kunnen worden.

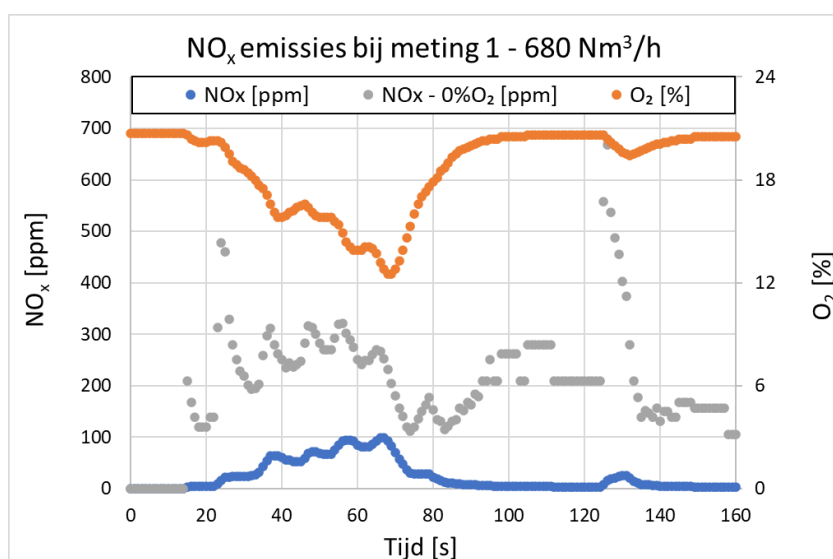
## 8. Literatuur

- [1] R. Bruschi, D. Ercolani and E. Donati, "Long Distance Transport of Natural Gas by High Pressure Pipelines," in *16th World Petroleum Congress*, Calgary, 2000.
- [2] R. G. Derwent, "Global warming potential (GWP) for hydrogen: Sensitivities, uncertainties and meta-analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 22, pp. 8328-8341, 2023.
- [3] S. Guidard, W. Kindzierski and N. Harper, "Heat Radiation from Flares," Science and Technology Branch Alberta Environment, ISBN 0-7785-1188-X, Edmonton, Alberta., 2000.
- [4] S. Gersen, "Literature research on low NOx hydrogen burners and developing design rules for low NOx burners," HyDelta, 2023.
- [5] B. D. Ehrhart, C. Sims, E. S. Hecht, B. B. Schroeder, K. M. Groth, J. T. Reynolds and G. W. Walkup, *HyRAM+ (Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models), Version 4.1*, Sandia National Labs, 2022.
- [6] W. Houf and R. Schefer, "Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 136-151, 2007.
- [7] C.-C. a. E. S. Hantschk, "Prediction of noise emissions from industrial flares," *Journal of the Acoustical Society of America* 123, no. 5: 3692, 2008.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI 3732, Standard noise levels of technical sound sources – Flares," 1992.
- [9] C.-C. a. E. S. Hantschk, "Flares–noise prediction and thermo-acoustic efficiency," in *AFRC-JFRC 2004 Joint International Combustion Symposium*, 2004.
- [10] S. Tretsiakova, "Dealing with hydrogen explosions," HyResponse.
- [11] A. Arrigoni and L. Bravo-Diaz, "Hydrogen emissions from a hydrogen economy and their potential global warming impact," Joint Research Centre, European Commission, 2022.
- [12] A. Abusaloua, S. Ruqaia, A. Abdulbasit and Z. Waleed, "Environmental Study of Gas Flare System".

## 9. Bijlagen

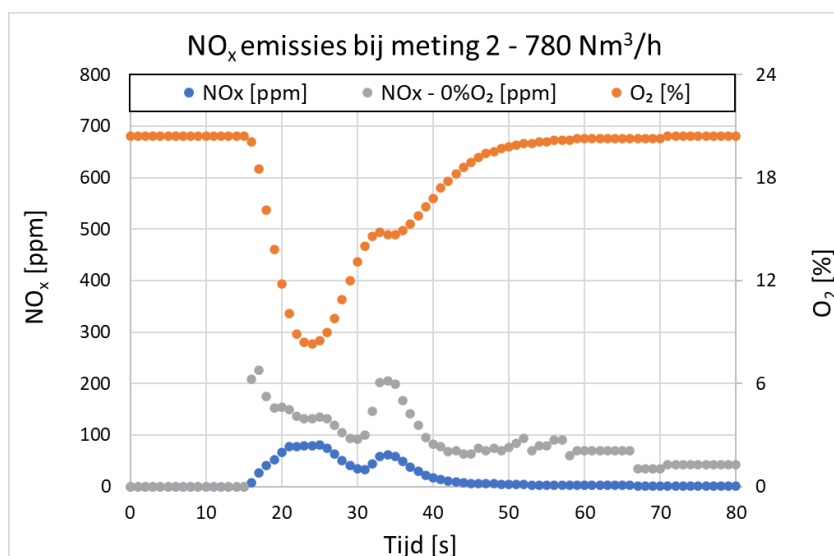
### 9.1 Grafieken NO<sub>x</sub>-emissies en overige NO<sub>x</sub>-meetresultaten

Hieronder de grafieken van de NO<sub>x</sub>-emissies bij verschillende debieten waarbij over een langere periode de meetbuis zich in de rookgassen bevond. Hierbij zijn de gemeten NO<sub>x</sub>-emissies weergegeven én de NO<sub>x</sub>-emissie luchtvrij. Deze laatste is berekend op basis van het eveneens in de grafiek weergegeven zuurstofgehalte. Door NO<sub>x</sub>-luchtvrij te benoemen wordt er gecorrigeerd voor de verdunning met lucht die plaats vindt.



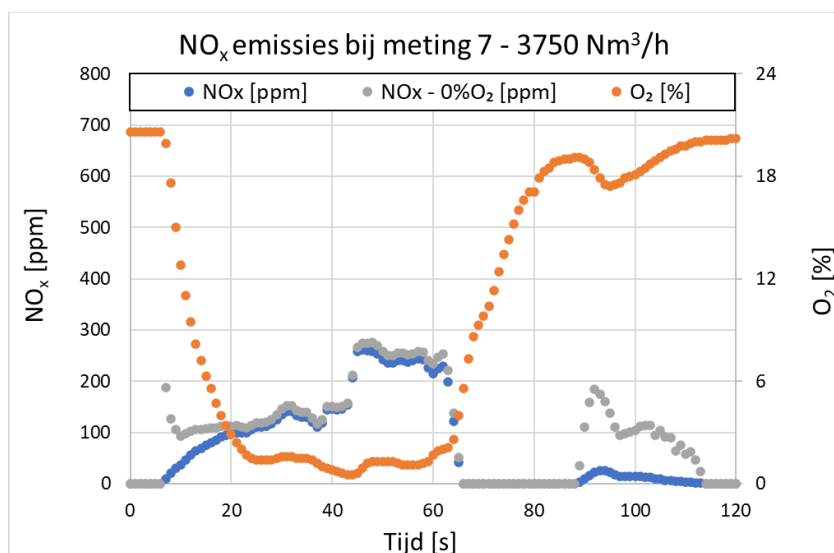
Figuur 26

De tijdsduur van de waterstofvlam bij meting 1 was ongeveer 120 seconden. Over een periode van 50 seconden bevond de aanzuigopening van het meetpunt zich in de vlam. Daar waar de NO<sub>x</sub>-emissie laag was (< 30 ppm) en het zuurstofgehalte nog hoog (>18%) is de berekende NO<sub>x</sub>-waarde bij 0%O<sub>2</sub> buiten beschouwing gelaten. Het verschil in reactiesnelheid van NO sensoren en O<sub>2</sub> sensoren zorgt voor een te grote onzekerheid in de berekende meetwaarde.



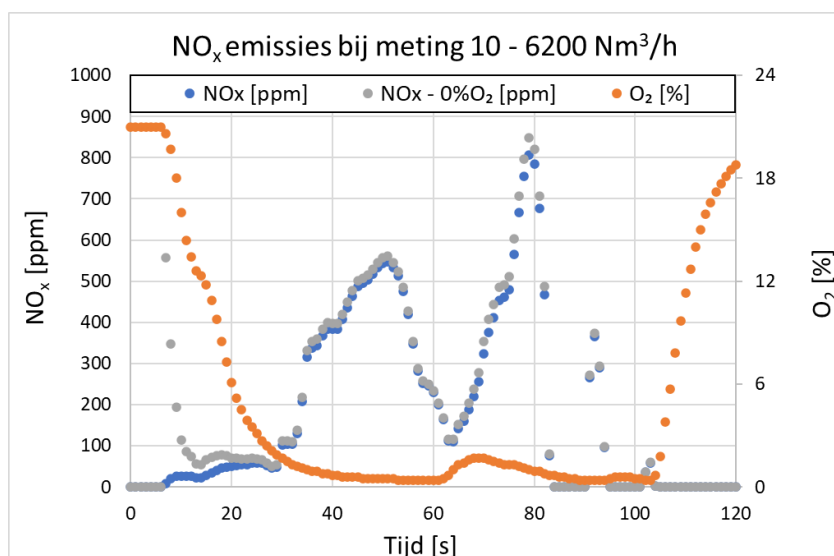
Figuur 27

De tijdsduur van de waterstofvlam bij meting 2 was ongeveer 70 seconden. Alleen tijdens het eerste deel van de meting bevond de aanzuigopening van het meetpunt zich in de vlam. Daar waar de NOx-emissie laag was (< 30 ppm) en het zuurstofgehalte nog hoog (>18%) is de berekende NOx-waarde bij 0%O<sub>2</sub> buiten beschouwing gelaten. Het verschil in reactiesnelheid van NO sensoren en O<sub>2</sub> sensoren zorgt voor een te grote onzekerheid in de berekende meetwaarde.



Figuur 28

De tijdsduur van de waterstofvlam bij meting 7 was ongeveer 100 seconden. Over een periode van 60 seconden bevond de aanzuigopening van het meetpunt zich in de vlam.



Figuur 29

De tijdsduur van de waterstofvlam bij meting 10 was ongeveer 90 seconden. Nagenoeg de gehele periode bevond de aanzuigopening van het meetpunt zich in de vlam.

Omdat bij sommige metingen de meetleiding zich niet of grotendeels niet in de vlam bevond zijn niet alle metingen bruikbaar. De niet bruikbare meetresultaten zijn oranje gearceerd.

Tabel 13 Overzicht van NOx-metingen bij de beproevingen met directe ontsteking

Metingnr.	Datum	Omschrijving	Debiet - gem. (Nm3/h)	Windsnelheid (m/s)	NOx - max (ppm)	NOx - 0%O <sub>2</sub> - max (ppm)	Meetpijp NOx in vlam?
1	06/02/2023	Beproeving met laag debiet	680	0,2	98	320	ja, blok van 50 sec
2	06/02/2023	Beproeving met laag debiet	780	0,3	80	206	ja, eerste 20 seconden wel
3	07/02/2023	Buffer leegtrekken, beoordeling inslag	n.b.	0,4	30	n.t.b.	grotendeels niet
4	07/02/2023	Van volle spool naar langzaam leeg laten branden, eind is 2e meting mbt inslag	n.b.	0,4	52	n.t.b.	grotendeels niet
5	07/02/2023	Verhoging debiet, door verhoging spooldruk	2500	0,8	0	n.t.b.	nee
6	07/02/2023	Verhoging debiet, onjuiste meting tbv debietbepaling	n.b.	0,3	0	n.t.b.	nee
7	07/02/2023	Verhoging debiet, door verhoging spooldruk	3750	0,6	262	275	ja, blok van 60 sec
8	07/02/2023	Van volle spool naar langzaam leeg laten branden, eind is 3e meting mbt inslag	n.b.	0,5	23	n.t.b.	nee
9	09/02/2023	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	n.b.	0,6	2	n.t.b.	nee
10	09/02/2023	Maximaal haalbare debiet in deze opstelling	6200	0,3	807	848	ja (meetbuis 180° verplaatst)
Alle bovengenoemde metingen met een propaanbrander die continue ingeschakeld was.					n.t.b. = niet te bepalen		

## 9.2 Momenten van ontsteking en geluidspieken vertraagde ontsteking

In onderstaande tabel zijn voor de verschillende meetseries, zoals uitgevoerd bij de vertraagde ontstekingen, het moment van ontsteken van de waterstofwolken weergegeven net als piekwaarden voor het geluid en de omstandigheden waarbij deze metingen zijn uitgevoerd (debiet en windsnelheid).

Tabel 14 Uitgevoerde meetseries en metingen in het kader van vertraagde ontstekingen

Meetserie	Nr	Druk in leidingbuffer (bar)	Q globaal m <sup>3</sup> n/h	Bekrachtiging ontsteker	Tijd tot ontsteking na openen gas (s)	LC peak (dB)	V wind (m/s)
A	1	4	250	Voorafgaand aan openen gas	1,4	-	1,8
A	2	4	250	Voorafgaand aan openen gas	24,0	-	1,7
A	3	4	250	Voorafgaand aan openen gas	2,6	131,0	0,9
A	4	4	250	Voorafgaand aan openen gas	13,4	130,3	1,6
A	5	4	250	Voorafgaand aan openen gas	1,8	132,3	0,5
A	6	4	250	Voorafgaand aan openen gas	2,1	128,5	1,2
<i>Grote variatie in moment van ontsteking</i>							
B	1	4	250	10 sec na openen gas	20,2	130,5	0,5
B	2	4	250	10 sec na openen gas	12,1	125,9	2,0
B	3	4	250	10 sec na openen gas	11,6	128,1	1,3
B	4	4	250	10 sec na openen gas	32,0	128,3	1,4
B	5	4	250	10 sec na openen gas	19,6	125,2	2,0
<i>Grote variatie in moment van ontsteking</i>							
C	1	4	250	20 sec na openen gas	31,5	122,3	1,7
C	2	4	250	20 sec na openen gas	34,2	129,1	1,1
C	3	4	250	20 sec na openen gas	20,9	<129,1	1,4
C	4	4	250	20 sec na openen gas	32,0	<129,1	0,9
C	5	4	250	20 sec na openen gas	35,5	129,5	1,3
C	6	4	250	20 sec na openen gas	27,0	131,0	1,0
<i>Grote variatie in moment van ontsteking. Bedrading van de vonkontsteker vervangen.</i>							
D	1	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	<1	141	1,2
D	2	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	geen		
D	3	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	geen		
D	4	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	<1	129,1	1,4
D	5	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	<1	>143,9	
D	6	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	<1	>143,9	1,3
D	7	8	3200	Voorafgaand aan openen gas	geen		
<i>Na 7) vonkontsteker tikt wel, maar vonkt niet. Daarna is de vonkontsteker vervangen.</i>							
E	1	4	1900	5 sec na openen gas	~ 6	139,4	0,6
E	2	4	1900	10 sec na openen gas	~11	136,6	0,0
E	3	4	1900	5 sec na openen gas	~ 6	132,9	0,6
E	4	4	1900	5 sec na openen gas	~ 6	139,8	0,9
F	1	4	1900	10 sec na openen gas	~11	140,6	1,8
F	2	4	1900	10 sec na openen gas	~11	>143,9	1,2
G	1	8	3200	5 sec na openen gas	~ 6	>143,9	1,0
G	2	8	3200	5 sec na openen gas	~ 6	>143,9	1,0
G	3	8	3200	5 sec na openen gas	~ 6	137,4	1,0
G	4	8	3200	5 sec na openen gas	~ 6	137,4	1,0
<i>Na meting G2 de geluidsmeter verzet van 3 meter naar 6 meter vanaf de fakkelt</i>							
de maximale waarde LC peak zoals weer te geven door de geluidsmeter is 143,9 dB							