

HyDelta

WP 1B Gasstations

D1B.3b vraagnummer 212 – Explosie (werkplan)

Status: final

Document samenvatting

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur(s)	Suzanne van Greuningen (MSc) Michiel van der Laan (MSc) Sander van Woudenberg (MSc)
Verbonden aan	KIWA Technology BV
Email adres	Suzanne.van.greuningen@kiwa.com Michiel.van.der.laan@kiwa.com sander.van.woudenberg@kiwa.com

Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzingen
1	09-02-2022	Sander van Woudenberg	KIWA Technology BV	Eerste versie; concept
2	02-03-2022	Sander van Woudenberg	KIWA Technology BV	Tweede versie; verwerking commentaar
3	11-04-2022	Sander van Woudenberg	KIWA Technology BV	Derde versie; verwerking commentaar

Verspreidingsniveau

Verspreidingsniveau		
PU	Public	X
R1	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> - Partners inclusief Expert Assessment Group - Andere deelnemers aan het project inclusief Sounding Board - Externe entiteit gespecificeerd door het consortium (please specify) 	
R2	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> - Partners inclusief Expert Assessment Group - Andere deelnemers aan het project inclusief Sounding Board 	
R3	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> - Partners inclusief Expert Assessment Group 	

Document beoordeling

Partner	Naam
Kiwa Technology BV	Rob van Aerde/ Sander van Woudenberg
Enexis	Raymond van Hooijdonk/ John Voogt
Rendo	Johan Jonkman
Alliander	Peter Verstegen
Stedin	Ricardo Verhoeve
Gasunie	Steffen Elgersma
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC	HyDelta Supervisory Group

Executive summary

A leading principle in the transition from natural gas to hydrogen, is that distribution and use of hydrogen should be at least equally safe as it currently is for natural gas. In this document, a literature review is described examining realistic scenario's for the occurrence of flammable gas mixtures in gas stations. After that, it has been examined how these scenarios can be further detailed and expanded to get a better view on the change of the occurrence of flammable gas mixtures (in stations) and the hazardous situations that arise from that. This document is partly a report of literature research (chapter 4) and partly a research proposal (chapters 5 and beyond). The first three chapters are meant as introduction for both the research as the research proposal.

This process aims the answer the question: "What is the change that an explosion can occur in or near a gas station? Broadly speaking, this implies the change of ignition and the hazardous situation that follows (flash fire, fire or explosion). The end goal is to reach recommendations for further actions, such as further research or changes in standards.

The objective of this research is gain understanding on the spread of natural gas and hydrogen at leakages in gas stations and to gain understanding on the risk (change and effect) of adding an ignition source with ample ignition energy. This goal will be achieved by answering the following questions;

1. Which scenario's where and ignitable mixture occurs in a gas station are realistic? ¹
2. Which effects need to be taken into account in these scenarios? ²

An inventory of the available (inter)national research on explosions of gas cabinets and research on ignition sources has been made. This inventory shows that much research has been done on the topics of explosion behavior of gas stations and ignition potential of common equipment. However, the parameters used in the explosion behavior studies are not a reflection of parameters in realistic scenario's. The leak sizes in most previously performed studies were chosen with the aim to facilitate an explosive gas/air mixture in order to study the effects of explosions of gas cabinets. Focus was not put on proving that these leak sizes are in fact realistic or performing tests with realistic leak sizes. Furthermore, the research to ignition sources most often did not involve likely ignition sources to be expected near gas stations (e.g. a hairdryer or a toaster). Based on the useful information of these studies, this proposal was drafted. The results of this literature study is described in chapter 3.

¹ In chapter 6.2 the relevant parameters are described.

² The aim of the research as described in the research proposal is describe these effects qualitatively. The information generated in the research should be ample to make a quantitative analyses (including calculations on issues such as pressure waves and heat radiation) in follow-up research, if required.

The research as described in this proposal consists of three steps:

1. Determine the realistic scenario's in which ignition/ explosion in or near gas stations/ gas cabinets can occur

This will be done by organizing an expert meeting during which all relevant parameters will be discussed. These parameters include, among others, plausible leaks sizes, weather conditions and potential sources of ignition.

2. Execution of CFD (Computational Fluid Dynamics) calculations

In this step, leakages in gas stations/ gas cabinets will be modelled based on the scenario's determined in step 1. For each scenario, it will be calculated where and if a ignitable mixture will emerge. One of the benefits of using CFD calculations compared to experiments, is that one will be able to dictate specific scenario's with the advantage to manipulate the input parameters to compare specific interests (like for instance wind speed and direction). This will generate a short-list of worst case (or most probable case) scenario's which can be tested. Furthermore, CFD calculations ensure that difficult to control parameters during testing, such as wind speed and wind direction, can remain stable. That gives more certainty to the outcome of the results, especially the change on the occurrence of an ignitable mixture. Also, this method will allow the viewer to study the buildup of gas concentration in and around a gas station/ gas cabinet.

3. Experiments

A shortlist of the results of the CFD calculations, including worst case scenario, will be verified by simulating the modelled conditions in a controlled experiment. An ignition source with sufficient ignition energy will be added to gain insights in whether these situations indeed lead to ignition and to which consequences this might have.

Samenvatting

Bij de overschakeling van aardgas naar waterstof is het uitgangspunt dat distributie en gebruik van waterstof tenminste net zo veilig moet zijn als aardgas. In dit document is het literatuuronderzoek naar realistische scenario's voor het ontstaan van brandbare gasmengsels in en rond gasstations beschreven. Vervolgens is bekeken hoe beter inzicht kan worden verkregen in de realistische scenario's alsmede de kans op het ontstaan van brandbare gasmengsels (in gasstations) en daarmee gepaard gaande gevaarlijke situaties. Dit document is deels een onderzoeksrapport (hoofdstuk 4, literatuurstudie) en deels een onderzoeksvoorstel (hoofdstuk 5 en verder). De eerste drie hoofdstukken zijn algemeen en gelden als inleiding voor zowel het onderzoek als het onderzoeksvoorstel.

Dit proces streeft antwoord te geven op de vraag: 'Wat is de kans op het ontstaan van een explosie in of dichtbij een gasstation?'. In bredere zin spreken we hier over kans op ontsteking en het daardoor ontstaan van een potentieel gevaarlijke situatie (steekvlam, brand of explosie). Het einddoel is om te komen tot aanbevelingen met betrekking tot vervolgacties, zoals vervolgonderzoek of aanpassingen aan normen.

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in het verspreidingspatroon van aardgas en waterstof bij een lekkage in gasstations en inzicht in het risico (kans en effect) bij het toevoegen van een ontstekingsbron met voldoende ontsteekenergie. Dit doel wordt bereikt door antwoord te geven op onderstaande deelvragen;

1. Welke scenario's waarin een brandbaar mengsel in een gasstations ontstaat zijn realistisch? ³
2. Met welke effecten moet rekening worden gehouden bij deze scenario's? ⁴

Aan de hand van beschikbare (internationale)onderzoeken naar explosie van gasstations voor aardgas en waterstof en onderzoeken naar ontstekingsbronnen, is een inventarisatie gemaakt van de beschikbare informatie. Daaruit blijkt dat er veel onderzoeken gedaan zijn naar explosiegedrag van gasstations, echter komt niet helder in beeld hoe dit valt te herleiden naar realistische scenario's. De nadruk bij studies die de gevolgen van explosies bestuderen, lag op het creëren van een explosief aardgas/lucht mengsel, waarbij bij het tot stand brengen geen rekening is gehouden met realistische, in de praktijk voorkomende, situaties. De gekozen lekgroottes bijvoorbeeld zijn geen weerspiegeling van realistische waarden, maar van gekozen waardes. Daarnaast zijn er in de onderzoeken naar potentiële ontstekingsbronnen vaak apparaten geselecteerd die niet nabij gasstations zijn te verwachten (bijvoorbeeld een haardroger of een broodrooster). Op basis van de bruikbare informatie uit deze onderzoeken is dit voorstel geschreven. Het, reeds uitgevoerde, literatuuronderzoek is verwoord in hoofdstuk 3.

³ In hoofdstuk 6.2 wordt beschreven welke parameters relevant zijn

⁴ Het voornemen in het onderzoeksvoorstel is om deze effecten kwalitatief te beschrijven. De opgeleverde gegevens moeten voldoende zijn om een kwantitatieve beschrijving (met berekening over bijvoorbeeld drukgolven en warmtestraling) indien gewenst in een later onderzoek te bepalen.

Het voorstel voor het nog uit te voeren onderzoek bestaat uit drie stappen:

1. Het vaststellen van realistische scenario's waarbij mogelijk ontsteking/explosie voorkomt bij gasstations.

Dit zal worden gedaan door een workshop met experts voor te bereiden en te organiseren waar alle relevante parameters worden besproken. Voorbeelden van deze parameters zijn realistisch optredende lekgroottes, weersomstandigheden en potentiële ontstekingsbronnen.

2. Uitvoeren van CFD (Computational Fluid Dynamics) berekeningen.

In deze stap worden lekken in gasstations gemodelleerd, op basis van de in stap 1 bepaalde scenario's. Per scenario zal worden berekend of en waar een ontsteekbaar gasmengsel ontstaat. Het voordeel van CFD berekeningen vergeleken bij praktijktesten, is dat er meer scenario's met kleine verschillen in parameters kunnen worden getest. Zo kan een shortlist worden verkregen van worst case (of waarschijnlijke) scenario's welke vervolgens in de praktijk vergeleken kunnen worden. Daarnaast kan door middel van CFD worden verzekerd dat, uit eerder onderzoek cruciaal gebleken, parameters zoals windsnelheid en richting stabiel gehouden kunnen worden. Daardoor heeft de uitkomst van deze berekeningen, in het bijzonder de kans op ontstaan van een brandbaar mengsel, meer zekerheid. Daarnaast kan met behulp van deze methode tevens gedetailleerde informatie verkregen worden over de opbouw van aardgas/ waterstof concentraties in en rond een gasstation.

3. Praktijkonderzoek

Een shortlist van uitkomsten van de CFD berekeningen, inclusief worst case scenario, zullen worden geverifieerd door de gemodelleerde omstandigheden in de praktijk na te bootsen. De praktijkproeven zijn daarmee duidelijk afgebakend op basis van de uitkomsten van de CFD berekeningen, waarmee wordt voorkomen dat nodeloos veel stations (destructief) beproefd moeten worden. Een ontsteekbron met voldoende ontsteekenergie wordt toegevoegd om inzicht te krijgen of in deze situaties het mengsel daadwerkelijk ontsteekt en wat de gevolgen daarvan zijn.

1 Table of contents

Document samenvatting	2
Executive summary	3
Samenvatting.....	5
1. Achtergrond.....	8
2. Inleiding	9
3. Doelstelling.....	10
4. Literatuuronderzoek.....	11
4.1 Onderzoek naar de kans op explosie/ ontsteking	11
4.2 Onderzoek naar de gevolgen van explosie/ ontsteking	14
4.3 Onderzoek naar relevante variabelen	16
4.4 Conclusies literatuuronderzoek	17
5. Suggesties voor onderzoek.....	18
5.1 Opties	18
5.1.1 Optie A: Modeleren van de gasuitstroom (CFD)	18
5.1.2 Optie B: Aanpassen ontwerp gasstation	18
5.1.3 Optie C: Praktijktesten.....	19
5.2 Aanbeveling	19
6. Voorstel voor onderzoeksopzet	20
6.1 Doelstelling.....	20
6.2 Aanpak.....	20
6.3 Op te leveren resultaat.....	24
6.4 Planning	24
7 Referenties	25

1. Achtergrond

Als onderdeel van onderzoeksvraag 212, is binnen HyDelta gekeken naar ventilatie en explosie van behuizingen voor gasregelstations. In een vroeg stadium is gekozen om het onderdeel ventilatie en het onderdeel explosie apart te behandelen. Voor het onderdeel ventilatie zijn metingen uitgevoerd aan een 1/2m³ kast en een 4m³ kaststation om in kaart te brengen hoe de ventilatie van deze behuizingen functioneert met aardgas en waterstof bij verschillende lekkages. Voor het onderdeel explosie was het oorspronkelijke plan om één behuizing te selecteren, in deze behuizing een representatieve lekkage aan te brengen en te onderzoeken of deze lekkage tot een ontsteking/explosie zou kunnen leiden.

Deze aanpak levert niet het gewenste inzicht. De manieren waarop dit plaats kan vinden en het effect is van veel afhankelijk. Met deze reden is in samenspraak met de stuurgroep besloten om allereerst te onderzoeken in hoeverre explosie van behuizingen voor toepassing in de gasdistributie reeds onderzocht is in andere onderzoeksprogramma's. Met deze informatie en een literatuurstudie is in kaart gebracht wat specifiek van belang is voor een onderzoek naar explosie. Vervolgens is een werkplan geschreven met een plan van aanpak om explosie verder te onderzoeken. Hierbij zijn verschillende opties aangedragen waaronder het onderzoeken van de gasuitstroom met behulp van eindige elementen methoden (CFD), het aanpassen van het ontwerp van de behuizing (om opbouw van gasconcentratie in de kast te elimineren) en het doen van praktijktesten.

In dit document is het literatuuronderzoek naar realistische scenario's voor het ontstaan van een brandbare gasmengsels in en rond stations beschreven. Vervolgens is bekeken hoe beter inzicht kan worden verkregen in de realistische scenario's alsmede de kans op het ontstaan van brandbare gasmengsels (in stations) en daarmee gepaard gaande gevaarlijke situaties. Dit document is daarmee deels een onderzoeksrapport (hoofdstuk 4, literatuurstudie) en deels een onderzoeksvoorstel (hoofdstuk 5 en verder). De eerste drie hoofdstukken zijn algemeen en gelden als inleiding voor zowel het onderzoek als het onderzoeksvoorstel.

2. Inleiding

Bij de overschakeling van aardgas naar waterstof is het uitgangspunt, dat distributie en gebruik van waterstof ten minste net zo veilig moet zijn als aardgas.

Met het onderzoek wordt ernaar gestreefd antwoord te geven op de vraag: 'Wat is de kans op het ontstaan van een explosie?'. In bredere zin wordt hier gesproken over kans op ontsteking en daardoor ontstaan van een gevaarlijke situatie (steekvlam, brand of explosie). Voor het ontstaan van een ontsteekbaar gas/lucht mengsel is een voldoende grote lekkage nodig. De lekkage kan zorgen voor een opbouw van gasconcentratie in de behuizing en kan bij aanwezigheid van een ontstekingsbron ontbranding/ontsteking tot gevolg hebben. De ontsteking van een mengsel kan leiden tot een steekvlam, brand of zelfs een explosie .

De aanwezigheid van een ontsteekbaar mengsel en een effectieve ontstekingsbron zijn de twee randvoorwaarden voor het kunnen ontstaan van een gevaarlijke situatie. De ontstekingsbron moet voldoende ontstekingsenergie bevatten en zich bevinden in het gebied waar het ontsteekbare mengsel zich bevindt, om daadwerkelijk ontsteking te kunnen realiseren. Of een ontsteekbaar mengsel zich kan vormen, is afhankelijk is van een veelvoud aan factoren: het type gas, kastconfiguratie (vorm en inhoud), kast locatie, gasdruk, ventilatie (oppervlak en locatie), lek (oppervlakte gat, debiet, geometrie), oriëntatie kast ten opzichte van windrichting en weersomstandigheden zoals temperatuur, windrichting en -snelheid. Al deze factoren beïnvloeden de kans op het vormen van een ontsteekbaar mengsel. Hier komt bij, dat het verloop van de ontstekingsreactie (explosie, steekvlam of brand) niet te beheersen, ofwel te controleren is. Naast het beheersen van de factoren, staat de grootte van deze input-parameters ter discussie.

3. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in het verspreidingspatroon van aardgas en waterstof bij een lekkage in gasstations en inzicht in het risico (kans en effect) bij het toevoegen van een ontstekingsbron met voldoende ontsteekenergie.

Deze inzichten dienen te resulteren in een risicoanalyse waarbij een vergelijking gemaakt wordt tussen de situatie voor aardgas en waterstof. Dit doel wordt bereikt door antwoord te geven op onderstaande deelvragen.

1. Welke scenario's waarin een brandbaar mengsel in een gasstations ontstaat zijn realistisch?
2. Met welke effecten moet rekening worden gehouden bij deze scenario's?

Het einddoel is om te komen tot aanbevelingen over vervolgacties, zoals vervolgonderzoek of aanpassingen aan normen.

4. Literatuuronderzoek

In het verleden is door Kiwa onderzoek gedaan naar ATEX zonerings van gasstations voor aardgas. Deze onderzoeken hadden tot doel om te kijken naar de effecten van ventilatie en de indicatie wanneer ontsteking plaatsvindt. Daarnaast zijn in de Engelse nationale onderzoekprogramma's Hy4heat en H21 onderzoeken naar explosies met waterstof opgenomen. De rapporten die (enigszins) relevante informatie bevatten staan hieronder opgesomd. Deze zijn vervolgens gecategoriseerd in onderzoeken naar de gevolgen van explosie/ ontsteking, onderzoeken naar de kans op explosie/ ontsteking, en onderzoeken naar relevante variabelen.

Normen

- NEN 1059; 2019

Hy4heat

- Gas Ignition and Explosion Data Analysis (2021) [1]
- Ignition Potential Testing with Hydrogen and Methane (2021) [2]

H21

- WBS3 Ignition Potential Testing (2021) [3]
- WBS4 Explosion Severity (2021) [4]

Kiwa

- Zonerings gasstations bij bovenventilatie, Van der Laan en Pulles (2016) [5]
- Zonerings van gasstations, fase 2, Van der Laan en Pulles (2017) [6]
- Ontsteekbaarheid waterstof-luchtmengsels (2020) – Liander
- 1000 stations – NEN
- Methaanemissie – Netbeheer Nederland

De inhoud van bovenstaande onderzoeken zullen in de volgende paragrafen kort besproken worden.

4.1 Onderzoek naar de kans op explosie/ ontsteking

NEN 1059

In de NEN1059, de norm van gasstations, wordt een paragraaf (7.3.7) gewijd aan het onderwerp ventilatie. Ventilatie van de opstellingsruimte dient om mogelijk lekgas uit de ruimte te verdunnen en te verwijderen en daarmee personen die het station betreden te beschermen en het explosierisico van het station te beperken.

In de norm wordt onder andere beschreven dat de ventilatieopeningen beschermd moeten worden tegen verstoppingen en het inbrengen van voorwerpen. Dat kan worden bereikt door de openingen als een labrynt uit te voeren, of ze af te schermen door dubbele beplating of dubbele roosters met wederzijds verspringende openingen. De spleetbreedte van deze openingen mag niet kleiner zijn dan 1 cm en niet groter zijn dan 2 cm.

Zonering en ontstekingsbronnen wordt indirect behandeld in paragraaf 7.3.11. Daarin staat:

- “De opstellingsruimte van de gasdrukregelininstallatie wordt geclassificeerd als gevarezone 1, of als gevarezone 2 indien kan worden aangetoond dat het ventilatievoud van de opstellingsruimte groter is dan 5 h^{-1} (classificatie volgens NEN-EN-IEC 60079-10-1).
- Een opstellingsruimte mag als niet-gevaarlijk gebied (NGG) worden geclassificeerd als een gaslek met een opening van maximaal 1 mm^2 bij de onder normale bedrijfsomstandigheden heersende druk, geen gevaarlijke hoeveelheid explosief gas-luchtmengsel kan opleveren. Zie bijlage E.”

In bijlage E van de NEN 1059 (2019) wordt aangegeven wanneer een opstellingsruimte als een niet-gevaarlijk gebied mag worden beschouwd. Daarin staat:

- “Een opstellingsruimte mag als niet-gevaarlijk gebied (NGG) worden geclassificeerd, indien een gaslek uit een lekgatgrootte van maximaal 1 mm^2 bij de onder normale bedrijfsomstandigheden heersende druk geen gevaarlijke hoeveelheid explosief gas/luchtmengsel kan opleveren.”
- “Indien wordt voldaan aan de benodigde totale oppervlakte van de ventilatieopeningen vermeld in E.3, mag de opstellingsruimte worden beschouwd als niet-gevaarlijk gebied (NGG).”

Zonering gasstations bij bovenventilatie & Zonering van gasstations – fase 2

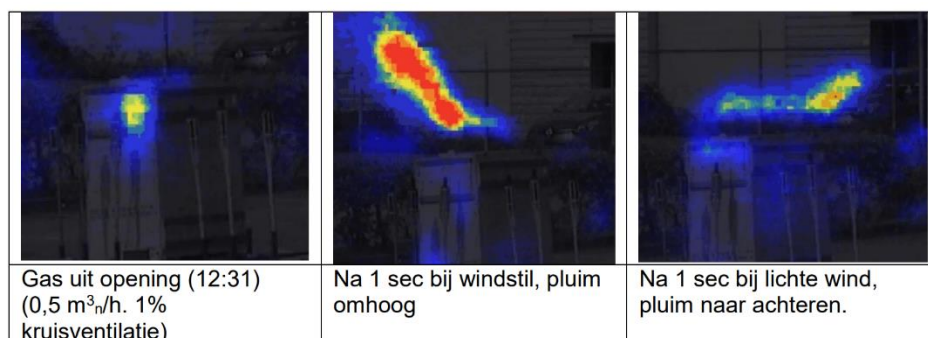
De focus van de onderzoeken uitgevoerd door Kiwa ten behoeve van de NEN1059, in opdracht van Gasunie, ligt op het vaststellen van de effectiviteit van bovenventilatie en kruisventilatie in niet-betreedbare kaststations en kasten [5] [6].

Hiertoe zijn praktijkproeven uitgevoerd in de open lucht met kaststations van $\frac{1}{2} \text{ m}^3$ en 2 m^3 . In beide onderzoeken is aandacht besteed aan lek-grootte. Bij het onderzoek uit 2016 is uitgegaan van een lekopening van 1 mm^2 bij een voordruk van 4 bar en 6 bar. Dat resulteerde in lekken van respectievelijk $3 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ en $4,6 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$. Door het variëren van de ventilatie (boven, boven & onder) alsmede de oriëntatie ten opzichte van de windrichting ($+90^\circ$, $+45^\circ$, 0° , -45° , $+90^\circ$) is gekeken wanneer een zekere ontstekingsbron (in de vorm van fakkels rond de kast) leidt tot het ontsteken van gas. Alle zijn testen uitgevoerd met een lek-grootte van 1 mm^2 , windsnelheden lager dan 2 m/s (komt overeen met windkracht 2), en een buitentemperatuur tussen de 5°C en de 20°C .

Uit de proeven uit 2016 (fase 1) bleek dat zowel bij kruisventilatie als bij alleen bovenventilatie brand en explosies kunnen optreden bij ventilatieopeningen die voldoen aan de norm en lekkages zoals die zijn voorzien in de norm. Bij vrijwel alle proeven was het lek zodanig groot, dat de gasconcentratie binnen de behuizing hoger was dan de bovenste explosiegrens (UFL, circa 15 vol% aardgas in lucht).

Deze resultaten zijn besproken in de normcommissie. Hierop is nader onderzoek gedaan naar de lekkages die daadwerkelijk optreden bij gasstations. Er zijn meetgegevens aangedragen om na te gaan wat de maximale grootte is van lekken die worden aangetroffen. Daaruit bleek dat de lekken gebruikt in het onderzoek van 2016 ($3 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ en $4,6 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$) in de praktijk niet voorkomen. $0,6 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ blijkt het maximum lek te zijn dat betrouwbaar gemeten is. In 2017 zijn om die reden aanvullende metingen uitgevoerd met lekkages van $0,5 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ en $1 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{h}$, dat is onderzoeksfase 2. Hoewel bij deze proeven meerdere malen ontbrandbare (100% LFL) gasmengels zijn gemeten bij de ventilatieopeningen, hebben bij deze proeven geen branden of explosies plaatsgevonden.

Uit deze onderzoeken kwam ook naar voren, dat temperatuur, windrichting en –snelheid grote invloed hebben op het verspreidingsgedrag van het gas. Zelfs bij lage windsnelheid is de verspreiding chaotisch (zie figuur 1). Bij deze testopstelling was controleren van deze weersinvloeden niet mogelijk.



Figuur 1. Non-uniforme verspreiding van gas rondom de kast en het kaststation.

1000 stations

Op het moment van schrijven van deze rapportage (januari 2022), vindt onderzoek plaats in opdracht van de normcommissie NEN 1059 naar gasconcentraties (aardgas) bij gasstations. Hierbij wordt aan duizend districtstations in het veld de maximale concentratie bij de ventilatieopening gemeten. Resultaten van dit onderzoek worden verwacht in later dit jaar.

Methaanemissie

Vanuit het oogpunt van methaanemissies wordt in opdracht van Netbeheer Nederland ook gezocht naar kentallen voor de gemiddelde gaslekage bij gasstations. Het Europese kental dat nu wordt gebruikt is 924 m³ aardgas (dat is 751 m³ methaan) per station per jaar, oftewel 105 liter aardgas per uur. [7] Dit kental is gebaseerd op een kleine en verouderde set metingen aan een aantal Duitse districtstations. Voorbereidingen zijn gaande voor nader onderzoek voor betrouwbare Nederlandse emissiefactors, ook voor stations. Het vaststellen van een gemiddelde lekkage is zinvol om de methaanemissie in te schatten. Een gemiddelde geeft daarentegen geen informatie over het grootste waarschijnlijk optredende lek. Wel is het mogelijk dat voor de bepaling van het gemiddelde lek en het grootste waarschijnlijke lek deels dezelfde informatiebronnen kunnen worden gebruikt.

4.2 Onderzoek naar de gevolgen van explosie/ ontsteking

Gas ignition and explosion analysis (Hy4Heat, 2021) - literatuuronderzoek

Het doel van dit onderzoek was om, aan de hand van literatuuronderzoek, factoren te identificeren die de gevolgen van een ontsteking van (0-25vol%) aardgas en waterstof beïnvloeden. De resultaten van dit onderzoek zijn vervolgens gebruikt om te kijken of de bestudeerde situaties te relateren zijn aan situaties in de gebouwde omgeving.

De explosietesten van de bestudeerde literatuur zijn uitgevoerd in uiteenlopende ruimtes. Voorbeelden hiervan zijn: een Fire Investigation Box, een garage, of een 25m³ behuizing waarbij zowel de inhoud als de ventilatie variabel zijn. Verder worden van de geëvalueerde explosietesten geen variabelen als gasdruk, weersomstandigheden en lekgroottes genoemd.

In ruimtes wordt bewust een explosief mengsel gecreëerd en ontstoken, waarna overdrukken worden gemeten en gevolgen geanalyseerd. In deze onderzoeken is doelbewust een explosieve omgeving gecreëerd. Het lag buiten de scope van dit onderzoek in hoeverre het onderzochte explosieve mengsel ook daadwerkelijk (in de praktijk) kan optreden. De realistisch optredende parameters (voor o.a. lekdebiet) die bepaald moeten worden in het vervolgonderzoek dat in dit document wordt beschreven, zijn daarmee niet uit dit Engelse onderzoek te herleiden. Daarnaast zijn met factoren zoals windsnelheid en temperatuur geen rekening gehouden.



Figuur 2. Een behuizing uit Hy4Heat rapport 'Gas ignition and explosion analysis' (2021).

WBS4 Explosion Severity (H21, 2021)

In dit onderzoek ligt de focus op het analyseren van de gevolgen van explosies van verschillende gasstations voor waterstof. Het verloop van de drukgolven en schade ten gevolge van explosies staat hierbij vooral centraal. Aan de hand van praktijkproeven in de buitenlucht, wordt de impact van explosies getest op gasstation van verschillende groottes voorkomend in Engeland.

In deze onderzoeken is doelbewust een explosieve omgeving gecreëerd. De lekken die voor deze explosietesten zijn gesimuleerd, hebben een diameter van 3-13mm waardoor zeer grote lekdebieten worden gegenereerd. Dit leidt tot hoge concentraties waterstof en de zekerheid van een explosief mengsel in de kasten. De omgevingsvariabelen temperatuur, windrichting en -snelheid zijn gemeten, maar niet meegenomen in de analyse van de resultaten. Het lag buiten de scope van dit onderzoek in hoeverre het onderzochte explosieve mengsel ook daadwerkelijk (in de praktijk) kan optreden. De realistisch optredende parameters (voor o.a. lekdebiet) die bepaald moeten worden in het vervolgonderzoek dat in dit document wordt beschreven, zijn daarmee niet uit dit Engelse onderzoek te herleiden.



30



Figuur 3. Exploderend kaststation uit H21 rapport 'Evaluation of Experimental Data from Phase 1B – WBS4 Explosion Severity' (2021).

4.3 Onderzoek naar relevante variabelen

Ontsteekbaarheid waterstof-luchtmengsels (2020) – i.o.v. Liander

In dit onderzoek is ~~zijn~~ de ontsteekbaarheid van waterstof/luchtmengsels bij verschillende ontstekingsbronnen en verschillende gas concentraties in beeld gebracht met behulp van de-schlierentechniek. Waterstofconcentraties van 4 vol%, 6 vol%, 8 vol% en 10 vol% zijn blootgesteld aan een gloeiplug, een piëzo-elektrisch element, een lichtschakelaar, een deurbel en een sigaret.

Het verloop van de verbranding bleek onafhankelijk van de gebruikte ontstekingsbronnen, maar wordt bepaald door de concentratie (4-6 vol% niks, 8 vol% rustig, naar boven gericht; 10 vol% sneller, turbulent, alle richtingen). De ontstekingsenergie van een brandende sigaret is onvoldoende om een mengsel van 10 vol% waterstof te ontsteken.

Ignition Potential Testing with Hydrogen and Methane (Hy4Heat, 2021)

De kans op ontsteking van waterstof/lucht mengsels met huishoudelijke apparaten is hier onderzocht en vergeleken met kans op ontsteking van methaan/lucht mengsels. Ontsteking is geprobeerd te realiseren met bronnen zoals een haardroger, magnetron, verschillende typen lampen, ventilator bij waterstof en methaan concentraties van 5,90 vol%, 8,9 vol%, 17,8 vol%, 26,6 vol% en 29,6 vol%.

Dit resulteert in een tabel met huishoudelijke apparaten die wel of niet tot ontsteking van specifieke gas/lucht mengsels kunnen leiden. Bijna alle waterstof ontstekingen vonden al plaats bij de laagste concentraties. Ontsteking liet af en toe op zich wachten. Vermoedelijk is het diffunderen van het gas/luchtmengsel in het apparaat hier de controlerende factor.

WBS3 Ignition Potential Testing (H21, 2021)

Dit is een zelfde type onderzoek als in het Hy4Heat programma [2], echter zijn andere ontstekingsbronnen getest. Waterstof en methaan in concentraties van 5,9 vol%, 8,9 vol%, 17,8 vol%, 26,6 vol% en 29,6 vol% zijn blootgesteld aan ontstekingsbron als een mobiele telefoon, sigaretten, statische elektriciteit, vonk van slijpgereedschap, en een startmotor.

Dit resulteert in een tabel met apparaten die wel/ niet ontsteking tot gevolg hebben bij verschillende gas/ lucht mengsels. Afgezien van de motor vond bij alle apparaten: (1) ontsteking plaats bij de laagste concentraties óf (2) ontstak geen van alle mengsels. Het bereiken van de ontstekingsbron in het apparaat voegt een tijdsafhankelijkheid toe aan de ontsteking. De motor gaf wisselende resultaten die waarschijnlijk toe te schrijven zijn aan het analoge karakter van de motor en de tijd die het mengsel nodig heeft om bij de motor te komen

4.4 Conclusies literatuuronderzoek

Samenvattend zijn veel onderzoeken gedaan naar ontsteekgedrag van aardgas en waterstof met al dan niet een explosie tot gevolg, echter wordt in deze onderzoeken niet onderbouwt hoe groot de kans is dat de situatie waarin een ontsteking op kan treden daadwerkelijk voorkomt-. De lekgroottes uit studies die de gevolgen van explosies bestuderen, zijn geen weerspiegeling van realistische praktijkwaarden. In de studies voor de zonering van kaststations en kasten is de lekgrootte van 1mm^2 aangehouden zoals gespecificeerd in de NEN-1059:2019. Hiervan kan eveneens worden afgevraagd of dit een representatieve grootte is. Aanvullende meetgegevens van lekdebieten uit de praktijk die in het 1000 stations onderzoek zullen worden uitgevoerd zijn richtinggevend.

De onderzoeken “Zonering gasstations bij bovenventilatie” en “Zonering van gasstations, fase 2” geven invulling aan verspreidingsgedrag van gas ten gevolge van een gaslek dat enigszins realistisch gedefinieerd is. De grote invloed van voornamelijk windsnelheid en richting wordt duidelijk. Dit zijn factoren die zich niet of moeilijk laten beheersen. Het is belangrijk hier goede keuzes in te maken bij de voorgestelde praktijktesten om een realistisch beeld te geven.

Van de geteste ontstekingsbronnen is een brandende sigaret wellicht de meest realistische. Echter om de kans op ontsteking te beproeven zoals beoogd, zal de ontstekingsbron een trefzekere, vaste variabele zijn zoals de fakkels die zijn gebruikt in de onderzoeken voor zonering van gasstations [5] [6].

5. Suggesties voor onderzoek

De eerste uitdaging rondom testen naar explosies/ ontsteking van gasstations is het komen tot realistische waarden voor input-parameters: lekdebiet, windsnelheid en -richting en temperatuur. Daarnaast is het zaak (praktijk)testen te ontwerpen waarbij de weersinvloeden goed kunnen worden gecontroleerd. De volgende drie testen zijn suggesties voor onderzoek en hebben ieder hun eigen methode, voor- en nadelen.

5.1 Opties

5.1.1 Optie A: Modeleren van de gasuitstroom (CFD)

Het verspreidingsgedrag van gas modeleren met behulp van eindige elementen methoden. Hiervoor kan bijvoorbeeld simulatiesoftware zoals Ansys of Start CCM+ gebruikt worden. Het doel is het bouwen van een wiskundig model van een gasdrukregelstation en de omgeving. Het gasstation is een gedetailleerd model van de behuizing met de ventilatiekanalen en de inhoud van het station: de omtrek van de onderdelen zoals het filterhuis, de regelaar en het verbindend leidingwerk. Rondom het station wordt de omgeving gemodelleerd als een raster waarvandaan frisse lucht (wind) wordt aangevoerd en waar het lekgas naartoe kan verspreiden. Bij CFD berekeningen kunnen de temperatuur van de omgeving alsmede de windrichting en -snelheid worden ingesteld. In de behuizing wordt vervolgens via een lekkage, een hoeveelheid gas (aardgas of waterstof) geïnjecteerd. Zo kunnen de volgende aspecten inzichtelijk gemaakt worden:

1. Het ontstaan van (ontsteekbaar) gas/ lucht mengsel.
2. De verspreiding van het gas/ lucht mengsel in en rond het kaststation

Bij CFD berekeningen kunnen de temperatuur van de omgeving alsmede de windrichting en -snelheid worden ingesteld. Zo kan een testmatrix met verschillende variabelen worden gemodelleerd. Die kan vervolgens gebruikt worden om tot een shortlist van realistische en kritieke waarden als input voor praktijktesten te komen.

Met behulp van CFD kan, op basis van benodigd energieniveau van ontstekingsbron, gemodelleerd worden wat het verspreidingspatroon is van het gas/ luchtmengels in de behuizing en buiten de behuizing. Deze verspreidingspatronen kunnen worden weergegeven door middel van iso-contouren, in de gebruikte software zitten veel verschillende visualisatie mogelijkheden. Daarmee wordt bij elke set van inputparameters inzichtelijk gemaakt waar er gasmengsels ontstaan bij een concentratie van, bijvoorbeeld, 10% LEL, 100% LEL en stoichiometrische gas/ luchtmengels.

Het is niet voorzien om de effecten (zoals drukgolven en hitte-intensiteit) van een eventuele ontsteking te modelleren. Dat is een afzonderlijke berekening. Wel kunnen de gegevens worden gebruikt om in een eventueel vervolgonderzoek deze berekening alsnog te doen.

5.1.2 Optie B: Aanpassen ontwerp gasstation

Met het aanpassen van het ontwerp van gasstations is het de bedoeling dat de mogelijkheid van ontsteking wordt weggenomen door het gasuitstroompunt te beïnvloeden (bijv. door een hoge pijp op de behuizing te plaatsen). De effectiviteit van de nieuwe of aangepaste ontwerpen zou vervolgens in de praktijk kunnen worden getest.

In deze benadering wordt de kans op ontsteking weggenomen waardoor temperatuur, windrichting en -snelheid geen cruciale beïnvloedende rol meer spelen. Er wordt geadviseerd om deze optie niet verder te onderzoeken met reden dat het onderzoek zich richt op bestaande (dus niet aangepaste)

gasstations. Het aanpassen van het ontwerp kan wel het gevolg zijn, wanneer uit dit onderzoek blijkt dat de stations niet geschikt zijn.

5.1.3 Optie C: Praktijktesten

Een onderzoek gelijk aan de praktijktesten die zijn gedaan voor de onderzoeken naar zonering van gasstations voor aardgas. Temperatuur, windrichting en -snelheid kunnen hierbij echter niet worden gecontroleerd, maar door middel van afscherming kan invloed wellicht geminimaliseerd worden. Een tracer voor waterstof voor visualiseren met een camera is nog niet gevonden.

5.2 Aanbeveling

Op basis van bovenstaande voor- en nadelen wordt geadviseerd te starten met onderzoek A: het modelleren van situaties om zo tot een shortlist van waardes voor de praktijktesten te komen. Zo kan inzichtelijk gemaakt worden welke scenario's in de praktijk getest zouden moeten worden. Tevens kan een gevoel verkregen worden voor de invloed van de significante variabelen. Op basis van deze data kan gericht gekozen worden voor een gelimiteerde hoeveelheid testen. Deze testen zouden in de praktijk uitgevoerd kunnen worden (optie C) om te ondervinden of de praktijk ook daadwerkelijk de theorie ondersteunt. Voorafgaand aan het modelleren of de praktijktesten zullen allereerst de inputparameters voor realistische scenario's moeten worden gedefinieerd. Hieronder is een suggestie voor onderzoekopzet uitgewerkt.

6. Voorstel voor onderzoeksopzet

6.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen in het verspreidingspatroon van aardgas en waterstof bij een lekkage in gasstations en inzicht in het risico (kans en effect) bij het toevoegen van een ontstekingsbron met voldoende ontsteekenergie. Deze inzichten dienen te resulteren in een risicoanalyse waarbij een vergelijking gemaakt wordt tussen de situatie voor aardgas en waterstof.

6.2 Aanpak

Bij de uitvoering van het onderzoek wordt voorgesteld om een combinatie te maken van optie A (modelleren) en optie C (praktijktesten). Daarnaast worden activiteiten gepland om de noodzakelijk inputparameters te bepalen. In hoofdlijnen heeft het voorgestelde onderzoek de volgende fasering:

Fase 1. Vaststellen realistische scenario's waarbij mogelijk ontsteking/explosie voorkomt.

Uit de in dit document aangehaalde onderzoeken kan geen volledige lijst met realistische en gevaarlijke scenario's worden herleidt. Het blijkt dat dit een lastige opgave is. Wanneer een opgave te groot lijkt te worden, helpt het vaak om de opgave in kleinere stukken te verdelen. Ook helpt het om de samenwerking te zoeken om zoveel mogelijk van elkaars kennis te kunnen gebruiken.

Om die redenen wordt voorgesteld om een workshop te organiseren waarin met experts mogelijke realistische scenario's per parameter worden besproken. Daarbij komen de volgende vragen aan bod:

- Wat bedoelen we met een "realistisch" scenario?
 - o Waar is dit tussen "het is nog nooit gebeurd, maar we kunnen het ons voorstellen" en "dit gebeurt dagelijks"? Ter voorbereiding van de workshop zal Kiwa een analyse uitvoeren op basis van Nestor om inzicht te verkrijgen in de incidenten met gasuitstroming bij gasstations.
 - o Is de term "realistisch" te vervangen door een kwantitatief risico bijvoorbeeld d.m.v. een eis uit een norm of risicomatrices van de netbeheerders?
 - o Wat zijn de risico's en beheersmaatregelen rondom gasuitstroming bij gasstations? Hiervoor zal tijdens de workshop de bow-tie gasstations als leidraad worden gebruikt.
- Parameters van de scenario's:
 - o Wat is een "realistische" lekgrootte? (bijv. 1mm² gatgrootte (NEN 1059), 1 m³/h (fase 2 onderzoek NEN/Kiwa), andere inzichten?) Hoe vaak komt dit voor? (uur/jaar/station)
 - o Wat is de meest ongunstige voorkomende weerssituatie? Hoe vaak komt dit voor? (uur/jaar/station). Ter voorbereiding op de workshop zal Kiwa nagaan welke aannames rondom weersituaties in bestaande rekenmethode worden aangehouden.
 - o Wat is de meest ongunstige (slechtst ventilerende) behuizing? Welke stationstypes worden er gebruikt bij de netbeheerders en hoe groot is de populatie per type?
 - o Wat is de meest realistische ontsteekbron? (suggestie: een brandende sigaret) Hoe vaak zou deze in de buurt van de ventilatieopening van een station komen? (uur/jaar/station)
 - o Wat is de meest realistische ontsteekbron met een ontstekingsenergie die voldoende is om een waterstofmengsel tot ontbranding te brengen? (suggestie: hangjongeren)

- of hooligans met vuurwerk). Hoe vaak zou deze in de buurt van de ventilatieopening van een station komen? (uur/jaar/station)
- Welke scenario's worden gekozen om nader te onderzoeken met CFD berekeningen of praktijkonderzoek? (doel: gedegen onderzoek met aandacht voor het kostenaspect)
- Overige vragen:
 - Hoe gaat de risico-analyse vorm krijgen en welk detailniveau wordt nagestreefd?
 - Welke mogelijkheden zijn er om de effecten van een brand of explosie te reduceren (bijvoorbeeld extra ventilatie of een explosieluik) en hoe haalbaar lijken deze te zijn in de praktijk? (noot: deze informatie is niet nodig voor de modellen en de praktijkproef, wel kan het nuttige informatie opleveren voor latere aanbevelingen).

Het is aan te raden dat, voorafgaand aan deze workshop, een discussiedocument wordt opgesteld waar de bovengenoemde parameters worden besproken. Dit discussiestuk heeft als doel om het gesprek tijdens de workshop te ondersteunen. Hierin staan bijvoorbeeld aannames over weersituaties in bestaande rekenmodellen en illustraties van bestaande ventilatiekanalen van stations. Wanneer tussen het schrijven van dit document en de daadwerkelijk uitvoering van de workshop nieuwe informatie naar boven komt over realistische lekgroottes in stations, is het logisch om deze ook mee te nemen in dit discussiestuk.

Het is niet de verwachting dat na deze workshop alle onzekerheden zijn weggenomen. Van veel vragen is het de verwachting dat het antwoord niet meer zal worden dan een schatting. Wel is het de verwachting dat na deze workshop scenario's kunnen worden gedefinieerd. De uitkomsten van de workshop zullen worden gerapporteerd.

Fase 2 – modelleren (eerder genoemd: optie A)

Hierbij worden de scenario's zoals gedefinieerd in fase 1 gemodelleerd met CFD berekeningen. Het is op dit moment nog niet in te schatten hoeveel scenario's er zullen zijn en in hoeverre het mogelijk is alle scenario's te modelleren en door te rekenen. Daarbij speelt mee, dat voor één scenario mogelijk meerdere berekeningen nodig zijn. Dat kan bijvoorbeeld zijn wanneer de windrichting of de exacte locatie van het lek in het station niet vooraf bepaald kan worden en modellering uit moet wijzen in welke detail-gevallen wel of niet een ontsteekbaar mengsel ontstaat. Het aantal door te rekenen scenario's zal in overleg met de begeleidingsgroep worden bepaald. Per scenario worden modellen/berekeningen gemaakt met als doel om de volgende vragen beantwoorden:

- Ontstaat in dit scenario een ontsteekbaar mengsel (buiten de behuizing) en wat zijn de contouren van dit mengsel?? Of: onder welke detail-omstandigheden ontstaat in dit scenario een ontsteekbaar mengsel?
- Wat zijn de gevolgen van ontsteking (hoe groot is de drukgolf)?
- Met welke aanpassingen aan dit scenario is niet meer sprake van een ontsteekbaar mengsel? (bijvoorbeeld: lek is factor x kleiner dan aangenomen lek. Dit kan waardevolle input zijn voor een eventuele normering.)

Fase 3. Praktijkonderzoek

Zowel CFD berekeningen als praktijktesten hebben hun sterke en hun zwakke kanten. CFD heeft als voordeel dat gemakkelijk (veel) verschillende scenario's kunnen worden berekend. Daarnaast moet er eerst begrepen worden welke processen en parameters een rol spelen, voordat er goed

gemodelleerd kan worden. Deze twee factoren zorgen ervoor dat berekening veel inzicht kunnen verschaffen.

Praktijktesten hebben als voordeel dat ze minder last hebben van zogeheten “unknown-unknowns”. Een onbekend fenomeen of schijnbaar onbelangrijke parameter die geen onderdeel uitmaakt van een CFD model blijft in de praktijk wel aanwezig. Daarom zijn praktijktesten een nauwkeuriger benadering van de werkelijkheid. Nadelen van (destructieve) praktijktest is de beperkte mogelijkheid om verschillende parameters te testen. Daarnaast hebben praktijktesten ook praktische uitdagingen (veiligheid, beheersing, logistiek, meetnauwkeurigheid, timing, etc.).

Het doel van de praktijktest is het valideren of aanpassen van de uitkomsten van de CFD-modellering en -berekeningen. Wij stellen de volgende set van parameters voor:

- Stations: $\frac{1}{2}$ m³ kast. Type volgens scenario (“de slechtst ventilerende veelgebruikte”)
- Locatie lek in de kast: worst case volgens CFD
- Lekgrootte: opbouwen.
 - o Eerste test lekgrootte die volgens berekening veilig is. Geen explosie dan:
 - o Lekgrootte volgens gedefinieerd scenario. Geen explosie dan:
 - o Stapsgewijs verhogen met 25%
- Ontsteekbronnen: ontsteekbron met voldoende ontsteekenergie (trefzekere ontsteekbron)
- Windsnelheid: moet beheerst worden, maar is nauwelijks te beheersen in een buitenomgeving. Opties:
 - o Zo goed mogelijk testlocatie afschermen tegen de wind (bijv. zeecontainers waarmee een windluwe omgeving gecreëerd kan).
 - o Wind accepteren als een gegeven. Windrichting en snelheid meten en na testen als input gebruiken in de CFD modellen ter controle.
- De volgende zaken moeten gemeten worden:
 - o Flow waterstof
 - o Windsnelheid en richting
 - o Druk golf explosie
 - o Video (visueel en gascamera)

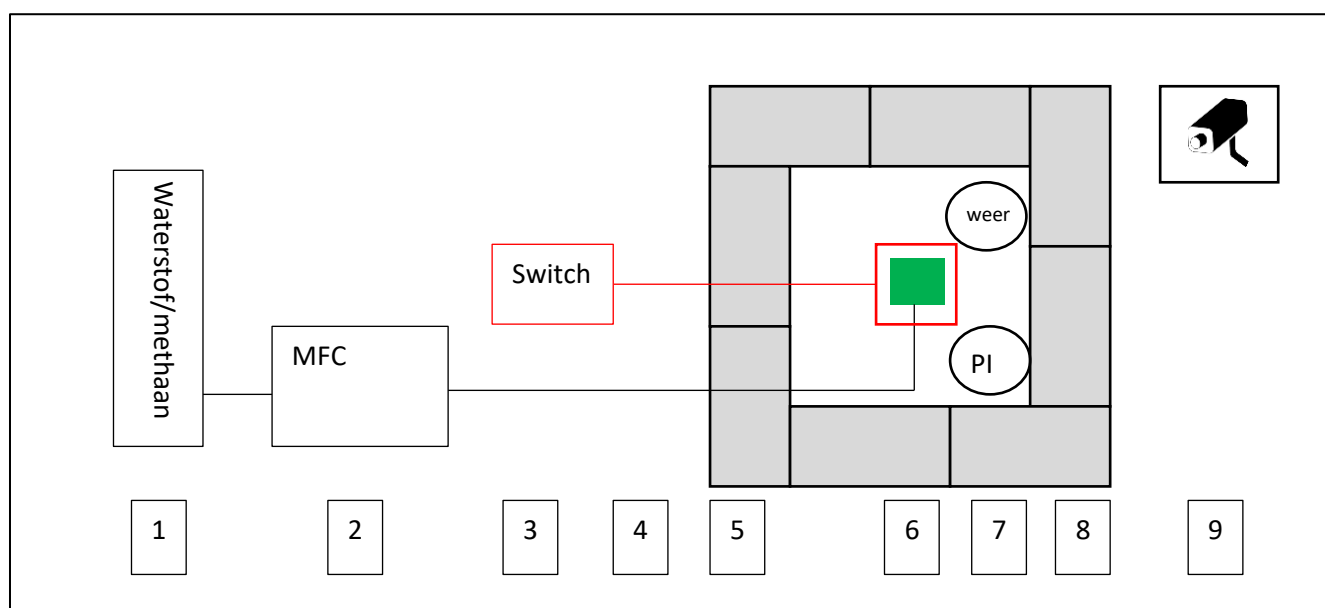
Bij elk test wordt genoteerd en beschreven wat de gevolgen zijn (bijvoorbeeld: geen ontsteking, brand explosie).

Als locatie lijkt de Twente Safety Campus het meest geschikt.

Schematische weergave opstelling

In figuur 2 is de opstelling schematisch uitgewerkt. Opstelling bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Gasflessen met waterstof en methaan
2. Een Mass Flow Controller (MFC) om een lekkage met een gecontroleerd debiet te realiseren
3. Een schakelaar op afstand naar gloeipluggen / ontstekbronnen rondom het gasstation
4. De gas slang vanaf de gasflessen, via de MFC, onder/door de container naar de een lek in de binnenzijde van het gasstation
5. Zeecontainers rondom het station om windinvloed te vermijden en om de risico's voor de omgeving te beheersen
6. Het gasstation met daarin een lek
7. Een weerstation voor de wind en temperatuur binnen de containers (na elke explosie te vervangen)
8. PI. Drukindicator tbv registreren schokgolf (in bezit van de Twente Safety Campus)
9. Videocamera en gascam om verhoogd plateau buiten de containers.



Figuur 2. Schematische weergave testopstelling (bovenaanzicht)

6.3 Op te leveren resultaat

Het rapport dat wordt opgeleverd, zal de volgende onderdelen bevatten:

1. Een beschrijving van de realistisch optredende scenario's met lekkage in gasstations, inclusief kwantitatieve parameters die gebruikt worden als input voor de CFD berekeningen.
2. Een rapportage van de CFD berekeningen met de uitgangspunten, figuren en conclusies.
3. Rapportage over de praktijkproeven
4. Conclusies waarbij de risico's worden beschreven en een vergelijking wordt gemaakt tussen de risico's van lekkage bij aardgas en waterstof (risico analyse).
5. Aanbeveling over vervolgacties, zoals vervolgonderzoek of aanpassingen aan normen.

6.4 Planning

De uitvoering van deze onderzoeken A en C zullen in zijn totaliteit naar verwachting 32-36 weken in beslag nemen, afhankelijk van de verschillende stappen en de overlegstructuur. Ver

7 Referenties

- [1] N. Hardy, P. McLaughlin, J. Thomas en G. Orr, „Gas Ignition and Explosion Data Analysis,” Hy4Heat, Kiwa Gastec, 2021.
- [2] R. C. RobCrewe, M. Johnson en D. Allason, „Ignition Potential Testing with Hydrogen and Methane,” Hy4Heat, GL Industrial Services UK Ltd., 2020.
- [3] C. Waghorn, A. Phillips en M. Acton, „Evaluation of Experimental Data from Phase 1B Data from Phase 1B – WBS3 Ignition Potential,” Northern Gas Networks, H21, Northern Gas Networks, 2020.
- [4] C. Robinson, M. Johnson en M. Acton, „Evaluation of Experimental Data from Phase 1B – WBS4 Explosion Severity,” DNV GL Oil & Gas, H21, Northern Gas Networks, 2020.
- [5] K. Pulles en M. van der Laan, „Zonering gasstations bij bovenventilatie GT-160124,” Kiwa Technology, 2016.
- [6] K. Pulles en M. van der Laan, „Zonering van gasstations, fase 2 - GT 170233,” Kiwa Technology, 2017.
- [7] DBI, „Methane Emission Estimation Method for the Gas Distribution Grid (MEEM),” DBI, 2018.