

# HyDelta 2

## **WP6B – Veiligheid – Gasstations**

D6B.1A & D6B.1B – Inventarisatie, modellering en experimenten met betrekking tot ventilatie in verschillende typen gasdrukregelstations in het distributie (lagedruk)net in Nederland met aardgas en waterstof

Status: definitief

## Document samenvatting

### Corresponderende auteur

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Corresponderende auteur</b> | Ir. Sander van Woudenberg<br>Michiel van der Laan, MSc.  |
| <b>Verbonden aan</b>           | Kiwa Technology BV   |
| <b>E-mail adres</b>            | <a href="mailto:sander.van.woudenberg@kiwa.com">sander.van.woudenberg@kiwa.com</a><br><a href="mailto:michiel.van.der.laan@kiwa.com">michiel.van.der.laan@kiwa.com</a> |

### Document historie

| Versie | Datum       | Auteur  | Verbonden aan             | Samenvatting van de wijzigingen                   |
|--------|-------------|---|---------------------------|---|
| 1      | 14-Mrt-2023 | Sander van Woudenberg/Michiel van der Laan<br>Néstor González Díez/ Aris Twerda | Kiwa Technology BV<br>TNO | Eerste versie; concept EAG                        |
| 2      | 24-Apr-2023 | Sander van Woudenberg/Michiel van der Laan<br>Néstor González Díez/ Aris Twerda | Kiwa Technology BV<br>TNO | Tweede versie; commentaren EAG verwerkt           |
| 3      | 16-Jun-2023 | Sander van Woudenberg/Michiel van der Laan<br>Néstor González Díez/ Aris Twerda | Kiwa Technology BV<br>TNO | Derde versie; commentaren sparringsgroep verwerkt |
| 4      | 27-Jun-2023 | Sander van Woudenberg/Michiel van der Laan<br>Néstor González Díez/ Aris Twerda | Kiwa Technology BV<br>TNO | Vierde versie; concept supervisory group          |
| 5      | 19-Jul-2023 | Sander van Woudenberg/Michiel van der Laan<br>Néstor González Díez/ Aris Twerda | Kiwa Technology BV<br>TNO | Vijfde versie; definitieve versie                 |

### 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                              |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Kiwa Technology BV                    | Rob van Aerde                     |
| Westland                              | Rick den Hartog                   |
| Alliander                             | Peter Verstegen, Rob Nispeling    |
| Stedin                                | Ricardo Verhoeve                  |
| Rendo                                 | Johan Jonkman                     |
| Coteq                                 | Jerry Palmers                     |
| Enexis                                | John Voogt, Raymond van Hooijdonk |
| NBNL, Gasunie, Kiwa,<br>DNV, TNO, NEC | HyDelta Supervisory Group         |

## Executive summary

This research report is a follow-up to the gas stations work package from Hydelta 1.0. That study showed that for various types of gas cabinets, hydrogen more often leads to a combustible mixture at the ventilation openings than natural gas, assuming the leakage flow rates chosen in that study. This led to the recommendation to carry out additional research to identify the effects of smaller, more common leakage flow rates. It was also recommended to investigate which types of different gas cabinets are frequently used in the Netherlands. This report further develops these recommendations.

This follow-up research is important because ventilation is an important measure in the event of an unintentional gas leak. Ventilation dilutes the gas and minimizes the risk of ignition or explosion. For the transition to hydrogen, it is important to know whether these gas pressure regulating stations with the same types of gas cabinets carry the same risk with the hydrogen of application.

The aim of this study is to gain further insight into how hydrogen behaves in existing gas cabinets compared to natural gas. That insight was obtained by looking at the issue from different angles: experiments as well as simulations using finite element method (CFD). This provided interesting insights that will help policymakers determine whether, and if so what, further measures can be taken.

### 1<sup>o</sup> step: Inventory common types of gas cabinets

Some 55,000 gas stations are operated by district system operators (DSOs) in the Netherlands. An inventory of gas cabinets used in the Netherlands was carried out. It focused on cabinets installed by DSOs in the last 10 years, because conversion of installations to hydrogen will initially take place with relatively new cabinets and these installations are designed in accordance with NEN1059. This does not mean they are exactly the same, but they are designed with the same minimum functional requirements. Three types of gas cabinets comprise a substantial part of the total population. These are mini-gas cabinets with a volume < 0.5 m<sup>3</sup> (these are mostly used for a high-pressure delivery station), ½ m<sup>3</sup> gas cabinets and 4 m<sup>3</sup> gas cabinet stations.

### What is a realistic leakage size?

There has been a lot of focus in this study on which leakage is representative in (normal) operation and for which leakage rate ventilation should be effective. Different sources use different assumptions to determine the expected leakage rate. This is not surprising, as leakage rates can differ due to operational pressures, maintenance or environmental factors.

This study tested both with the highest leakage rate from a recent field study (40 l/h) of more than 700 gas stations. Also, leakage flow rates were based on leakage openings in other standards (0.025 mm<sup>2</sup> and 0.25 mm<sup>2</sup>). This is still a wide range of leakages where, especially for the larger leaks, it is expected to be noticed by the public coincidentally in close proximity of the gas cabinet with a leak. The leaks measured the field study of more than 700 stations are considered realistic, with the largest measured leak being 40 liters per hour.

### 2<sup>o</sup> step: Measurements

An extensive test program was carried out with a ½ m<sup>3</sup> cabinet and a 4 m<sup>3</sup> cabinet station. With a mini-cabinet, some indicative measurements were performed to get a first impression. This was done by positioning a reference leak in the center of the cabinet during the experiments. From this, gas (hydrogen or natural gas) flows at a known flow rate controlled by a Mass Flow Controller. The gas concentration was then measured at various points in the gas cabinet, directly at the vent openings outside the gas cabinet and at a distance of about 0.5 meter away from the gas cabinet. The smallest leak selected has a flow rate of 40 l/h of natural gas (125 l/h for hydrogen). The largest leak is based on a leak opening of 0.25 mm<sup>2</sup> at a pressure of 8 bar (that is: 1.8 m<sup>3</sup><sub>n</sub> /h natural gas or 5.6 m<sup>3</sup><sub>n</sub> /h hydrogen). Between these extremes, several other leakage flow rates were chosen.

Key data from the experiments are shown in the three graphs below for the ½ m<sup>3</sup> cabinet, the 4 m<sup>3</sup> cabinet station and the mini-cabinet where the leakage rate on the x-axis decreases in size. The first dataset on the x-axis represents both 1.8 m<sup>3</sup><sub>n</sub> /h natural gas and 5.6 m<sup>3</sup><sub>n</sub> /h hydrogen. This reasoning also applies to the other, smaller leakage flow rates.



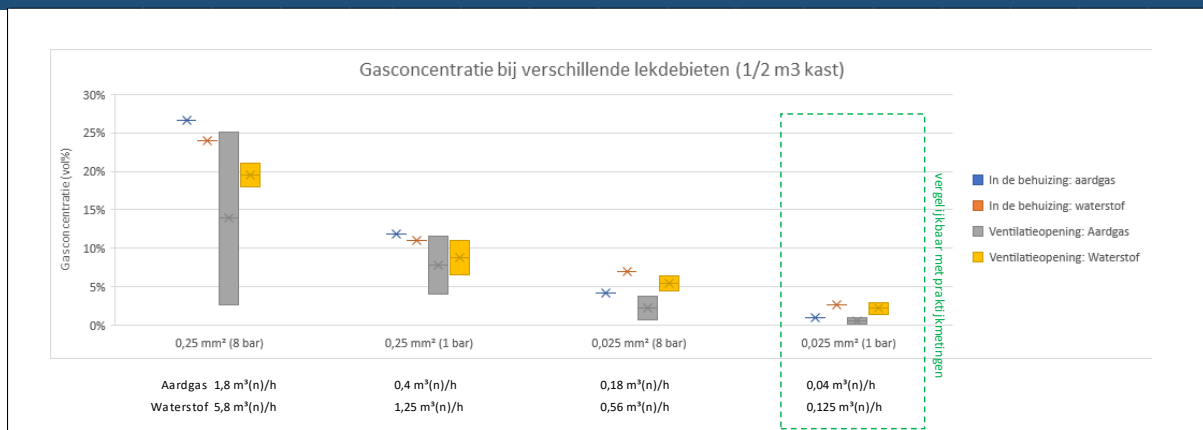


Figure 1; Gas concentration (vol%) at different leakage rates natural gas and hydrogen in a ½ m³ cabinet

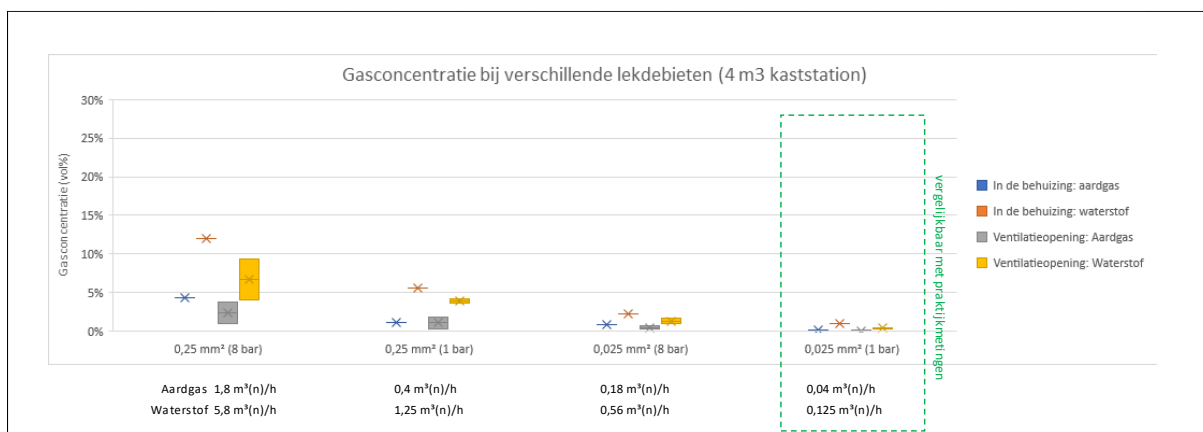


Figure 2; Gas concentration (vol%) at different leakage rates of natural gas and hydrogen at the 4 m³ cabinet station

In the case of the mini-cabinet, some indicative measurements were done to check for leakages at a leakage opening of 0.025 mm² at 8 bar pressure (i.e. 0.18 m³<sub>n</sub>/h natural gas or 0.56 m³<sub>n</sub>/h hydrogen) and 1 bar pressure (i.e. 40 l/h natural gas or 125 l/h hydrogen).

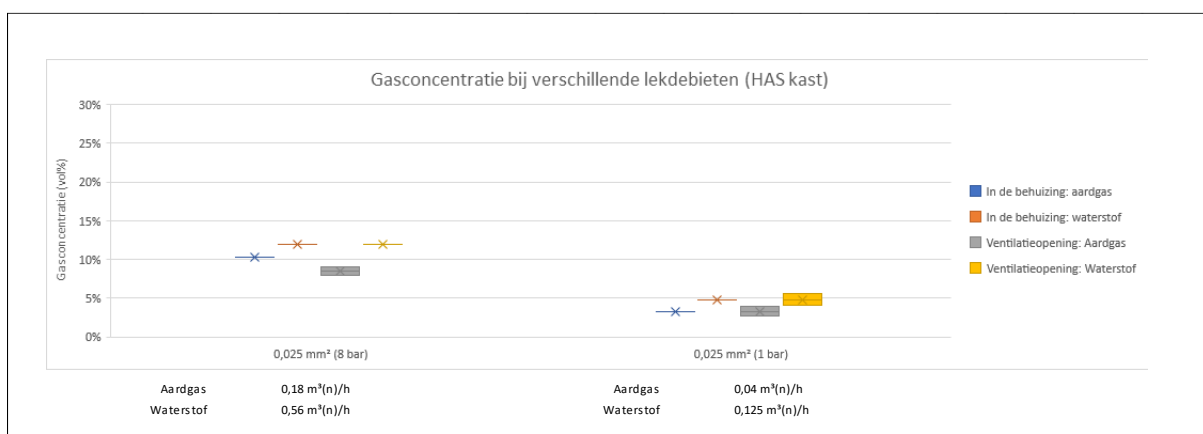


Figure 3; Gas concentration (vol%) at different leakage rates natural gas and hydrogen in a mini-cabinet

When the measurements are examined more closely, the following can be concluded:

*Measurement results ½ m<sup>3</sup> cabinet*

- For a 40l/h natural gas leak, the maximum gas concentration in a ½ m<sup>3</sup> cabinet is about 1 vol%, a mixture below the lower flammability limit<sup>1</sup>. For a similar leak for hydrogen (125l/h), the concentration rises to 2.7 vol%, which is also below the lower flammability limit. Directly at the vent openings, similar concentrations are measured, with 3.2 vol% as a local, time-dependent outlier. Half a meter away from the gas cabinet, the concentration is well below the lower flammability limit in all cases.
- Measurements with leakage openings of 0.25 mm<sup>2</sup> and 0.025 mm<sup>2</sup> measured flammable mixtures with both natural gas and hydrogen.

*Measurement results 4 m<sup>3</sup> cabinet station*

- For both natural gas (40l/h) and hydrogen (125 l/h), the concentration remains well below the lower flammability limit. The measured concentrations with hydrogen are higher, but in all cases below the limit of a combustible mixture.
- In measurements with leak openings of 0.25 mm<sup>2</sup> and 0.025 mm<sup>2</sup>, no combustible mixture was measured with natural gas. In the case of hydrogen, a combustible mixture was measured at leak openings of 0.25 mm<sup>2</sup>.

*Measurement results mini-cabinet*

- Some measurements were carried out at the mini-cabinet. These aimed to provide input to any follow-up research and are too limited to draw firm conclusions.
- An actual observation is that no combustible mixture was measured with natural gas (40l/h), while it was measured with hydrogen (125l/h).

**3° step: verification with CFD calculations**

As verification and to make measurements visual, CFD calculations were carried out. The aim of these modelling activities is to understand the factors affecting the flow phenomena of hydrogen gas in gas stations. Measurement data from Hydelta 1.0 were used as a reference for the mathematical models. The quality of the CFD validation is not (yet) so high that the results can be used independently of the field measurements. This is therefore an additional tool. Several reasons can be given, such as the effect of wind (variable wind) or differences in temperature (in different experiments).

The main lesson to be drawn from the CFD calculations is the influence of the roof configuration. The ventilation path is important and should facilitate the upward flow of hydrogen driven by the buoyancy. For the modelled gas cabinet with the overhanging roof lid, it can be seen that mainly hydrogen is limited to escape from the gas cabinet by a "siphon" effect. The buoyancy of hydrogen is insufficient to overcome the hydraulic resistance. An alternative CFD geometry where the overhang of the gas cabinet lid is eliminated confirms a significant improvement in ventilation.

---

<sup>1</sup> With definition as added in the glossary

### Insights gained:

If hydrogen is transported using gas pressure regulating stations and the existing gas cabinets, it is expected that in case of a leakage, the concentrations in the gas cabinet will be higher than with natural gas. This study also looked at possible modifications and their effect. These are modifications that can, in principle, be carried out in the field with the existing gas cabinets. For instance, under-ventilation can be added by lifting the casing a few centimeters from its base, creating a slot at the bottom. In addition, it is possible to raise the roof edge a few millimeters by unscrewing it and replacing it with longer bolts with thicker spacers (o-rings). The effects of these practical, applicable modifications were examined. This revealed the following:

|   | Natural gas                                    | Hydrogen  |
|---|--|---|
| Distribution of concentrations in case of leakage             | The medium mixes throughout the cabinet        | There is a "blanket" effect. Concentrations are higher at the top than at the bottom. |
| Increase top ventilation                                      | Lowering concentrations throughout the housing | The high concentration at the top remains high, but the blanket becomes thinner.      |
| Effect of under-ventilation                                   | Little effect                                  | The thickness of the blanket decreases.   |
| Increase top ventilation (up to 4%) + bottom ventilation (2%) | Best effect                                    | Best effect, but less than expected. Flammable mixtures are still possible.           |
| Adding additional ventilation effect on LEL/LFL limits        | Lowering effect on all measurements            | Lowering effect, but some leakage rates exceed flammability limit.                    |

### Recommendations:

The following recommendations emerge from this study:

- Consider incorporating concentration measurements into standard operating procedures by recording them for research and monitoring over longer periods. This can provide interesting insights into how populations of gas pressure regulating stations evolve.
- Consider adapting work instructions so that, when working on gas stations, technicians take a gas concentration measurement in the vent opening before opening the cabinet itself. By recording the measured gas concentration, network operators will gain more insight into actual frequency of occurrence of larger leaks with limited extra effort. In addition, leaks found can then be repaired, reducing the population of stations with leaks.
- The application of hydrogen at gas stations seems to require additional precautions to achieve the same level of safety as for natural gas. For the 4 m<sup>3</sup> cabinet station, this difference is more evident than for the ½ m<sup>3</sup> cabinet. Based on the precautionary principle, for both the ½ m<sup>3</sup> and the 4 m<sup>3</sup> cabinet station, additional precautionary measures are sensible. There are several possibilities here, such as further increasing the ventilation area of the gas cabinet, modifying the gas cabinet, placing fencing around at least one meter away from the gas cabinet or more intensive monitoring for leaks than is usual for natural gas stations.
- Further research on HAS cabinets (mini-cabinets) is recommended before HAS cabinets are converted to hydrogen. Until such research is conducted, it is advisable to apply additional precautions when distributing hydrogen.
- It is important that the standards committee of NEN 1059 makes a statement for which leakage flow rates ventilation should be an effective measure under which specific circumstances. Leakage openings and practical measurements still seem to be far apart.

## Samenvatting

Dit onderzoeksrapport is een vervolg op het werkpakket gasstations uit Hydeltta 1.0. Uit dat onderzoek bleek dat bij diverse typen behuizingen waterstof vaker leidt tot een brandbaar mengsel bij de ventilatieopeningen dan aardgas, uitgaande van de in dat onderzoek gekozen lekdebieten. Hieruit volgde de aanbeveling om aanvullend onderzoek uit te voeren om de effecten van kleinere, meer in de praktijk voorkomende lekdebieten in kaart te brengen. Daarnaast werd aanbevolen om na te gaan welke types verschillende behuizingen veelvuldig in Nederland worden toegepast. In dit rapport wordt verder invulling gegeven aan deze aanbevelingen.

Dit vervolgonderzoek is belangrijk omdat de ventilatie een belangrijke maatregel is bij een onbedoelde gaslekage. Ventilatie zorgt ervoor dat het gas wordt verdund en de kans op ontbranding of explosie wordt geminimaliseerd. Voor transitie naar waterstof, is het van belang om te weten of deze gasdrukregelstations met dezelfde typen behuizingen ook met toepassing van waterstof hetzelfde risico draagt.

Het doel van dit onderzoek is om verder inzicht te verkrijgen hoe waterstof zich gedraagt in bestaande behuizingen t.o.v. aardgas. Dat inzicht is verkregen door het vraagstuk vanuit verschillende invalshoeken te bekijken: praktijkmetingen en simulaties middels eindige elementen methode (CFD). Dit leverde interessante inzichten op die beleidsmakers helpen vast te stellen of, en welke maatregelen er verder genomen kunnen worden.

### 1<sup>e</sup> stap: Inventarisatie veelvoorkomende typen behuizingen

In Nederland worden er door de regionale netbeheerders zo'n 55.000 gasstations beheerd. Er is een inventarisatie uitgevoerd van de in Nederland toegepaste behuizingen. Daarbij is gefocust op behuizingen die in de laatste 10 jaar door RNB's zijn geplaatst, omdat omzetting van installaties naar waterstof in eerste instantie zal plaatsvinden met relatief nieuwe behuizingen en deze installaties conform de NEN1059 zijn ontworpen. Dit betekent niet dat ze exact hetzelfde zijn, maar wel met dezelfde minimale functionele eisen zijn ontworpen. Drie types behuizingen omvatten een substantieel deel van de totale populatie. Dat zijn mini-kasten met een inhoud  $< 0,5 \text{ m}^3$  (deze worden veelal gebruikt voor een hogedrukafleverstation),  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kasten en  $4 \text{ m}^3$  kaststations.

### Wat is een reële lek grootte?

Er is in dit onderzoek veel aandacht geweest welke lekkage representatief is bij (normale) bedrijfsvoering en voor welk lekdebiet de ventilatie effectief moet zijn. Verschillende bronnen gebruiken verschillende uitgangspunten om het te verwachten lekdebiet te bepalen. Dit is ook niet vreemd, omdat de lekdebieten kunnen verschillen door operationele druk, onderhoud of omgevingsfactoren.

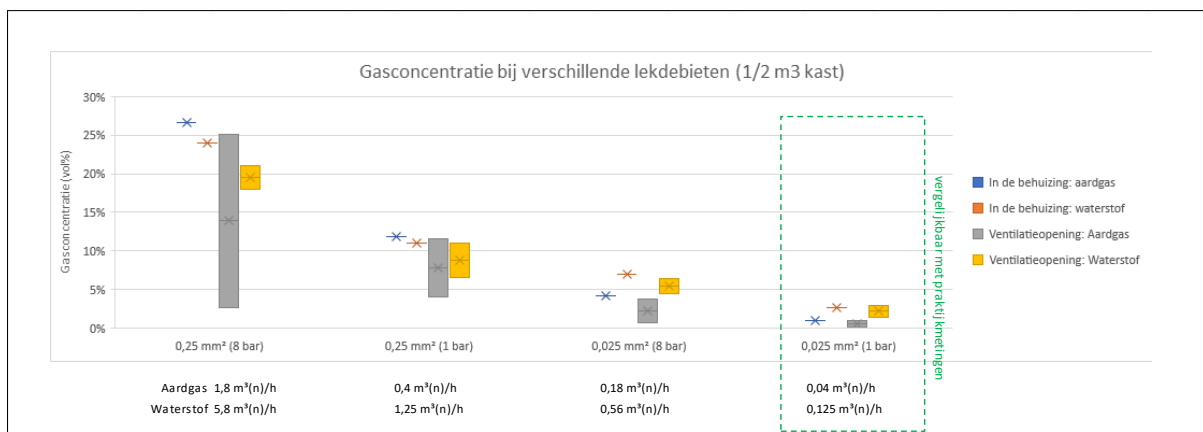
In dit onderzoek is zowel getoetst met het hoogste lekdebiet uit een recent praktijkonderzoek (40 l/u) van meer dan 700 gasstations. Tevens zijn lekdebieten gebaseerd op lekopeningen in andere normen ( $0,025 \text{ mm}^2$  en  $0,25 \text{ mm}^2$ ). Dit is nog steeds een breed spectrum aan lekkages waarbij, zeker bij de grotere lekken, de verwachting is dat deze door de omgeving zullen worden opgemerkt. De lekkages die zijn gemeten bij praktijkmetingen bij meer dan 700 stations worden als realistisch beschouwd, het grootste gemeten lek hierbij was 40 l/u.

### 2<sup>e</sup> stap: Metingen

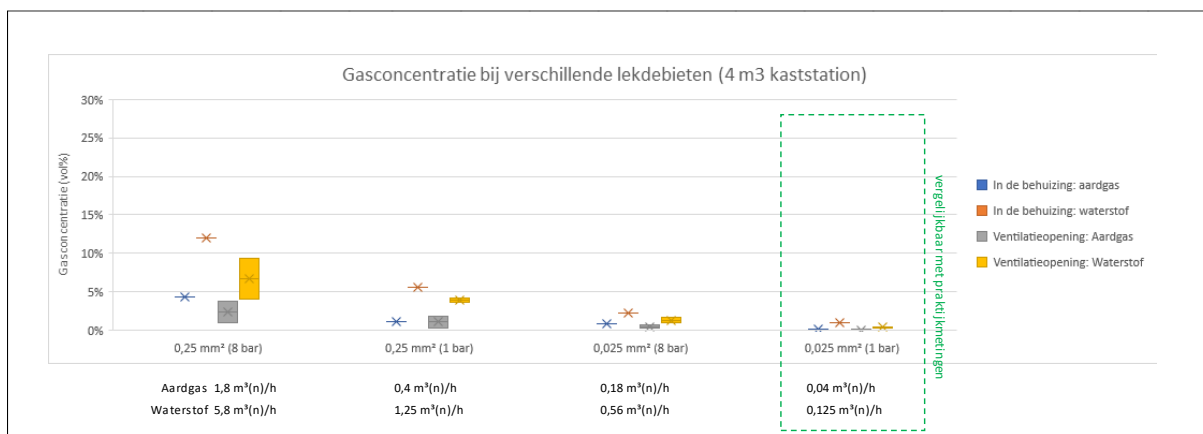
Een uitgebreid testprogramma is uitgevoerd met een  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast en een  $4 \text{ m}^3$  kaststation. Met een mini-kast zijn enkele indicatieve metingen uitgevoerd om een eerste indruk te krijgen. Dit gebeurde door bij de experimenten een referentielek in het midden van de behuizing te positioneren. Hieruit stroomt gas (waterstof of aardgas) met een bekend debiet dat geregeld is door een Mass Flow Controller. Vervolgens is de gasconcentratie gemeten op verschillende plekken in de behuizing, direct bij de ventilatieopeningen buiten de behuizing en op een afstand van een 0,5 meter buiten de behuizing. Het kleinst gekozen lek heeft een debiet van 40 l/u aardgas (125 l/u voor waterstof). Het grootste lek is op basis van een lekopening van  $0,25 \text{ mm}^2$  bij een voordruk van 8 bar (dat is:  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  aardgas of  $5,6 \text{ m}^3/\text{h}$  waterstof). Tussen deze uitersten zijn diverse andere lekdebieten gekozen.

De belangrijkste gegevens van de experimenten zijn weergegeven in de drie onderstaande grafieken voor de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast, het  $4 \text{ m}^3$  kaststation en de mini-kast waarbij het lekdebiet op de x-as afneemt in

grootte. De eerste dataset op de x-as is een weergave van zowel 1,8 m<sup>3</sup>/h aardgas en 5,6 m<sup>3</sup>/h waterstof. Deze redenatie geldt ook voor de andere, kleinere lekdebieten.

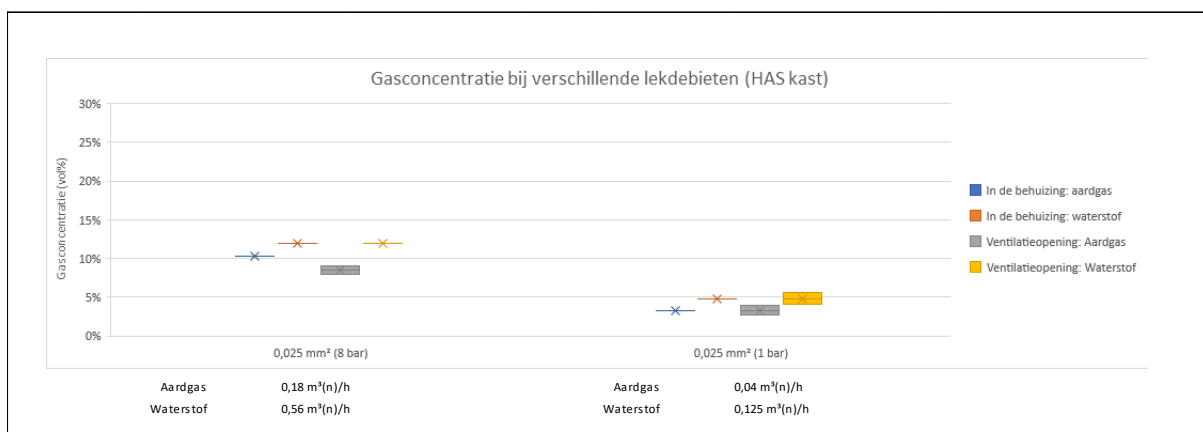


Figuur 4; Gasconcentratie (vol%) bij verschillende lekdebieten aardgas en waterstof in een ½ m<sup>3</sup> kast



Figuur 5; Gasconcentratie (vol%) bij verschillende lekdebieten aardgas en waterstof in het 4 m<sup>3</sup> kaststation

In het geval van de mini-kast is middels enkele indicatieve metingen gekeken naar lekkages bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> bij 8 bar voordruk (dat is: 0,18 m<sup>3</sup>/h aardgas of 0,56 m<sup>3</sup>/h waterstof) en 1 bar voordruk (dat is: 40 l/u aardgas of 125 l/u waterstof).



Figuur 6; Gasconcentratie (vol%) bij verschillende lekdebieten aardgas en waterstof in een mini-kast

Wanneer de metingen nader worden bestudeerd, kan het volgende worden geconcludeerd:

*Meetresultaten ½ m³ kast*

- Bij een lek van 40l/u aardgas is de maximum gasconcentratie in een ½ m³ kast ongeveer 1 vol%, een mengsel onder de onderste brandbaarheidsgrens<sup>2</sup>. Bij een vergelijkbaar lek voor waterstof (125 l/u), loopt de concentratie op tot 2,7 vol%, ook dat is onder de onderste brandbaarheidsgrens. Direct bij de ventilatieopeningen worden vergelijkbare concentraties gemeten, met 3,2 vol% als lokale, tijdsafhankelijke uitschieter. Op een halve meter afstand van de behuizing is de concentratie in alle gevallen ver onder de brandbaarheidsgrens.
- Bij metingen met lekopeningen van 0,25 mm² en 0,025 mm² zijn brandbare mengsels gemeten bij zowel aardgas als waterstof.

*Meetresultaten 4 m³ kast*

- Bij zowel aardgas (40l/u) als waterstof (125 l/u) blijft de concentratie ver onder de onderste brandbaarheidsgrenzen. De gemeten concentraties bij waterstof zijn wel hoger, maar in alle gevallen onder de grens van een brandbaar mengsel
- Bij metingen met lekopeningen van 0,25 mm² en 0,025 mm² zijn geen brandbare mengsels gemeten bij aardgas. Bij waterstof is een brandbaar mengsel gemeten bij een lekopening van 0,25 mm².

*Meetresultaten mini-kast*

- Er zijn enkele metingen uitgevoerd bij de mini-kast. Deze hadden als doel om input te geven aan eventueel vervolgonderzoek en zijn te beperkt om harde conclusies aan te verbinden.
- Een feitelijke waarneming is dat bij aardgas (40l/u) geen brandbare mengsel is gemeten, bij waterstof (125 l/u) wel.

**3<sup>e</sup> stap: verificatie met CFD berekeningen**

Als verificatie en om alle metingen visueel te maken zijn er CFD berekeningen uitgevoerd. Het doel van deze modelleringsactiviteiten is om te begrijpen welke factoren de verspreiding van waterstofgas in gasstations beïnvloeden. De gegevens van de metingen uit Hydelta 1.0 zijn gebruikt als referentie voor de modellen. De kwaliteit van de CFD-validatie is (nog) niet zo hoog dat de resultaten onafhankelijk van de praktijkmetingen kunnen worden gebruikt. Dit is dus een extra hulpmiddel. Verschillende redenen zijn aan te dragen, zoals het effect van wind (variabele wind) of verschillen in temperatuur (bij verschillende experimenten).

De belangrijkste les die te trekken valt uit de CFD berekeningen, is de invloed van de overhang van de dakrand. De ventilatieroute is belangrijk en zou de stijgende stroom van waterstof gedreven door de opwaartse kracht moeten vergemakkelijken. Voor de gemodelleerde behuizing met de overhangende dakrand is te zien dat vooral waterstof wordt gelimiteerd om uit de behuizing te ontsnappen door een “sifon” effect. De opwaartse kracht van waterstof is onvoldoende in staat om de hydraulische weerstand te overbruggen. Een alternatieve CFD geometrie waarbij de overhang van het kastdeksel is geëlimineerd, bevestigt een significante verbetering van de ventilatie.

---

<sup>2</sup> Met definitie zoals toegevoegd in begrippenlijst

### Opgedane inzichten:

Als waterstof met gasdrukregelstations en de bestaande behuizingen wordt getransporteerd, dan is de verwachting dat bij een lekkage de concentraties in de behuizing hoger zijn dan met aardgas. In dit onderzoek is ook gekeken naar mogelijke aanpassingen en het effect ervan. Dat zijn aanpassingen die in principe in het veld uitgevoerd kunnen worden met de bestaande kasten. Zo kan onderventilatie worden toegevoegd door de behuizing enkele centimeters van de basis te lichten waardoor een sleuf aan de onderkant ontstaat. Daarnaast is het mogelijk om de dakrand enkele millimeters te verhogen door deze los te schroeven en terug te plaatsen met langere bouten met dikkere afstandhouders (o-ringen). Met deze praktisch, toepasbare modificaties is gekeken naar de effecten van deze ingrepen. Hieruit bleek het volgende:

|   | Aardgas   | Waterstof  |
|---|---|--|
| <b>Verdeling van concentraties bij lekkage</b>            | Het medium vermengt zich in de hele kast            | Er is een “deken”-effect. De concentraties zijn bovenin hoger dan beneden.         |
| Vergroten bovenventilatie                                 | Verlaging van de concentraties in de hele behuizing | De hoge concentratie bovenin blijft hoog, maar de deken wordt dunner.              |
| Effect onderventilatie                                    | Weinig effect                                       | De dikte van de deken neemt af.  |
| Vergroten bovenventilatie (tot 4%) + onderventilatie (2%) | Beste effect  | Beste effect, maar minder dan verwacht. Er blijven brandbare mengsels ontstaan.    |
| Toevoegen extra ventilatie effect op LEL/LFL grenzen      | Verlagend effect op alle metingen                   | Verlagend effect, maar sommige lekdebieten komen boven de brandbaarheidsgrens uit. |

### Aanbevelingen:

Uit dit onderzoek komen de volgende aanbevelingen:

- Overweeg om concentratiemetingen in de standaard werkwijze op te nemen door deze te registreren voor onderzoek en monitoring over langere periode. Dit kan interessante inzichten geven in hoe populaties gasdrukregelstations zich ontwikkelen.
- Overweeg om de werkinstructies aan te passen zodat monteurs bij werkzaamheden aan gasstations een gasconcentratiemeting in de ventilatieopening uitvoeren voordat ze de kast openen. Door de gemeten gasconcentratie te registreren krijgen de netbeheerders met een beperkte extra inspanning meer inzicht in daadwerkelijk frequentie van het optreden van grotere lekken. Daarnaast kunnen aangetroffen lekken vervolgens worden gerepareerd, waardoor de populatie van stations met lekkage kleiner wordt.
- Voor toepassing van waterstof in gasstations lijken aanvullende voorzorgsmaatregelen nodig te zijn om hetzelfde veiligheidsniveau te bereiken als voor aardgas. Bij het 4 m<sup>3</sup> kaststation is dit verschil duidelijker dan bij de ½ m<sup>3</sup> kast. Uitgaande van het voorzorgsprincipe, zijn voor zowel de ½ m<sup>3</sup> als de 4 m<sup>3</sup> kast aanvullende voorzorgsmaatregelen verstandig. Hier zijn verschillende mogelijkheden, zoals het verder vergroten van het ventilatieoppervlakte van de behuizing, het aanpassen van de behuizing, het plaatsen van hekwerk rondom minimaal een meter afstand van de behuizing of intensievere controle op lekken dan gebruikelijk is voor stations op aardgas.
- Nader onderzoek op het gebied van HAS-kasten is aan te raden voordat HAS-kasten omgezet worden naar waterstof. Zolang dat onderzoek nog niet is uitgevoerd, is het bij distributie van waterstof raadzaam om aanvullende voorzorgsmaatregelen toe te passen.
- Het is belangrijk dat de normcommissie van de NEN 1059 een uitspraak doet voor welke lekdebieten de ventilatie een effectieve maatregel moet zijn voor specifieke situaties. Lekopeningen en praktijkmetingen lijken nog factoren van elkaar af te staan.



## Begrippenlijst

|   |   |
|---|---|
| Behuizing   | opstellingsruimte voor een gasdrukregel- en/of meetinstallatie  |
| Gasdrukregel- en meetstation  | geheel van gasdrukregel- en/of meetinstallatie, behuizing, locatie en bijbehorende (elektrische) voorzieningen, begrensd door en inclusief de scheidingsafsluiters.   |
| Kast  | behuizing met een inhoud (Ir) kleiner dan of gelijk aan 0,5 m <sup>3</sup><br>Opmerking 1 bij de term: De kast wordt bij definitie als niet-betreedbaar beschouwd.  |
| Kaststation   | behuizing met een inhoud (Ir) groter dan 0,5 m <sup>3</sup> en kleiner dan 15 m <sup>3</sup><br>Opmerking 1 bij de term: Een kaststation kan wel- of niet-betreedbaar zijn.   |
| Mini-kast   | behuizing met een inhoud (Ir) kleiner dan of gelijk aan 0,1 m <sup>3</sup><br>Opmerking 1 bij de term: De kast wordt bij definitie als niet-betreedbaar beschouwd.  |
| Veiligheidsafstand  | te hanteren minimumafstand tussen de behuizing van een opstelling of bovengrondse componenten van een open opstelling en andere objecten.   |
| Aansluitleiding   | leiding vanaf de hoofdleiding naar het punt van levering ten behoeve van de eindverbruiker.   |
| Districtstation (DS)  | gasdrukregel- en meetstation voor gasdrukregeling van gas uit hogedrukdistributienet naar een lagedrukdistributienet.   |
| Gasdrukregelinstallatie   | inrichting, bevattend alle componenten, inclusief in- en uitlaatleiding tot en met de scheidingsafsluiters, die samen functioneren als gasdrukregeling en/of drukbeveiliging.   |
| Hogedrukafleverstation (HAS)  | een gasdrukregel- en/of meetstation, uitpandig opgesteld, van de categorie A7, A8 of A9 volgens de NEN-1059 (2019).   |
| m <sup>3</sup> bij normaal condities (m <sup>3</sup> <sub>n</sub> ) | hoeveelheid gas die in droge toestand en bij een druk van 101 325 Pa en bij een temperatuur van 273,15 K (0 °C) een volume van 1 m <sup>3</sup> bezit.  |
| Ontvangstation (OS)   | gasdrukregelstation waar gas in druk wordt verlaagd.  |
| Drukregelsysteem  | systeem dat ervoor zorg draagt dat de druk in de uitlaatleiding wordt gehandhaafd binnen de vereiste grenzen.   |
| Netto inhoud (Ir)   | inhoud van de opstellingsruimte minus de inhoud van de installatie.   |
| Bovenventilatie/<br>onderventilatie/<br>kruisventilatie             | Bij het toepassen van bovenventilatie zijn aan de bovenzijde van een behuizing ventilatieopeningen gemaakt waardoor natuurlijke ventilatie kan plaatsvinden. De inhoud van de behuizing kan zo ververst worden. In het geval van onderventilatie zijn aan de onderzijde van de behuizing ventilatieopeningen aangebracht. In het geval van kruisventilatie zijn zowel aan de boven- als onderzijde ventilatieopeningen aangebracht. |
| ATEX  | De ATEX richtlijn 153 (1999/92/EG en voorheen ATEX 137) beschrijft de veiligheidseisen die werkgevers of eigenaren van ATEX-installaties verplicht  |



moeten treffen zodat medewerkers veilig en gezond kunnen werken in omgevingen met explosiegevaar.

|                        |   |
|------------------------|---|
| Niet gevaarlijk gebied | Een opstellingsruimte mag als niet-gevaarlijk gebied (NGG) worden geclassificeerd als een gaslek met een opening van maximaal 1 mm <sup>2</sup> bij de onder normale bedrijfsomstandigheden heersende druk, geen gevaarlijke hoeveelheid explosief gas-luchtmengsel kan opleveren volgens de NEN-1059 (2019).   |
| Secundaire gevarenbron | Een secundaire gevarenbron is een gevarenbron van waaruit het vrijkomen van een brandbare stof onder normaal bedrijf niet waarschijnlijk is, en indien dit wel gebeurt, niet frequent en slechts gedurende korte perioden” (zie par 5.5.2 van de NPR7910-1 (2021)).   |
| Ventilatievoud (Vv)    | Het aantal malen dat de lucht van een ruimte wordt ververs.   |
| Ventilatiecapaciteit   | Een eenheid waarmee aangegeven wordt wat de verhouding is tussen de verversing van lucht in een ruimte en het volume van deze ruimte bij het beschouwde lekdebiet van de in de ruimte aanwezige gevarenbron.  |
| Druk                   | Een kracht per oppervlakte eenheid waarbij in het SI systeem wordt gesproken van Pa of bar. Relatieve druk is altijd een gemeten waarde ten opzichte van een referentiewaarde, meestal ten opzichte van de luchtdruk. De relatieve druk kan hoger of lager zijn dan die referentiewaarde, respectievelijk over- en onderdruk. Om het verschil aan te geven wordt wel de letter g (gauge) of a (absolute) achter de eenheid geplaatst, zodat bijvoorbeeld 2 bara overeenkomt met 1 barg. |
| LEL/ LFL               | Met LEL wordt de onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Onder de onderste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende brandstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met LEL en LFL wordt dezelfde onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de LEL/LFL 4 vol% waterstof in lucht, voor aardgas is de LEL/LFL 5 vol% aardgas in lucht.  |
| UEL/ UFL               | Met UEL wordt de bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Boven de bovenste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende zuurstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met UEL en UFL wordt dezelfde bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de UEL/UFL 75 vol% waterstof in lucht, voor aardgas is de UEL/UFL 15 vol% aardgas in lucht.   |
| Mediaan                | De mediaan is de middelste waarde van een groep getallen die gerangschikt wordt volgens grootte. Het is het getal dat exact in het midden ligt zodat 50% van de gerangschikte getallen boven 50% ligt en 50% onder de mediaan.  |
| Enhanced Tightness     | Volledige toelichting van dit begrip wordt gegeven in NEN-EN1127-1:2019. Bij componenten met “enhanced tightness” kan er van worden uitgegaan dat er geen lekkage plaats kan vinden. Deze componenten zijn hier specifiek voor ontworpen en er worden permanent gemonitord op afwijkingen middels gedocumenteerd periodiek onderhoud.   |
| Behuizingen            | Klein type: behuizingen t.b.v. HAS installatie zijn meestal gesitueerd met een inhoud $\leq 0,25 \text{ m}^3$ . Medium type: behuizingen t.b.v. DS/AS stations vaak gesitueerd met een inhoud $\leq 0,5 \text{ m}^3$ . Groot type behuizingen t.b.v. grotere DS/OS stations vaak gesitueerd met een inhoud $\leq 4 \text{ m}^3$ .   |

## Inhoud

|   |    |
|---|----|
| Document samenvatting .....   | 2  |
| Executive summary .....   | 4  |
| Samenvatting.....   | 8  |
| Begrippenlijst.....   | 12 |
| 1. Aanleiding.....  | 17 |
| 2. Inventarisatie.....  | 19 |
| 2.1 Behuizingen voor gasdrukregelstations in Nederland .....  | 20 |
| De behuizing en het gasstation .....  | 20 |
| Meest voorkomende typen, naar functie en inlaatdruk .....   | 20 |
| Veel voorkomende afmetingen.....  | 21 |
| 2.2 Belangrijkste typen van behuizingen laatste 10 jaar.....  | 22 |
| 2.3 Expert opinion voor de hand liggende behuizingen.....   | 23 |
| Veel voorkomende maatvoeringen.....   | 23 |
| Principe van ventilatie .....   | 24 |
| Groter dan $\frac{1}{2} \text{ m}^3$ .....  | 27 |
| 2.4 Interpretatie van de inventarisatie .....   | 29 |
| 2.5 Selectie van behuizingen en de mate waarin deze representatief zijn (beantwoording<br>deelvraag 1)..... | 30 |
| 3. Beschouwing lekopening en relevante normen.....  | 32 |
| 3.1 Terugblik op onderzoek HyDelta 1.0 (werkpakket D1B.3A).....   | 32 |
| 3.2 Beschikbare informatie over lekkages .....  | 33 |
| 3.3 Gekozen lekopening .....  | 36 |
| 3.4 Lekopeningen en eerdere experimenten.....   | 37 |
| 3.5 Waarom ATEX?.....   | 39 |
| 3.6 ATEX zone bepaling volgens NPR-7910-1.....  | 40 |
| 3.7 ATEX zone bepaling volgens de NEN-EN-IEC60079-10-1 .....  | 40 |
| 3.8 Deelconclusie toegestane lekopening en relatie tot normen .....   | 41 |
| 4. Plan van aanpak.....   | 42 |
| 4.1 Testmethode op hoofdlijnen.....   | 42 |
| 4.2 Meetpunten en meetapparatuur .....  | 42 |
| 4.3 Wind en ventilatie .....  | 43 |
| 4.4 Foto's van de opstellingen.....   | 44 |
| 5. Bespreking resultaten van bestaande behuizingen .....  | 46 |
| 5.1 Lekdebiet $0,18 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hr}$ - aardgas.....  | 46 |
| 5.2 Lekdebiet $0,56 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hr}$ - waterstof.....                                      | 47 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.3  | Samenvatting resultaten .....  | 48  |
| 5.4  | Daadwerkelijke ventilatievoud (afgeleid van meetwaarden) .....   | 51  |
| 6.   | Aanpassingen ventilatie bij $\frac{1}{2}$ m <sup>3</sup> kast (oriënterend onderzoek) .....                | 52  |
| 6.1  | Aanleiding .....   | 52  |
| 6.2  | Het effect van additionele onderventilatie .....   | 52  |
| 6.3  | Het effect van extra boven- en/of onderventilatie .....  | 54  |
| 6.4  | Beschouwing en samenvatting resultaten aanpassingen extra ventilatie .....                                 | 58  |
| 7.   | Modellering van waterstofverspreiding bij lekkage in gasstations .....                                     | 60  |
| 7.1  | Inleiding .....  | 60  |
| 7.2  | Literatuurstudie .....   | 61  |
| 7.3  | Modelleringsaanpak .....   | 62  |
|      | Basis en opstelling van de HyRAM+ calculations .....   | 62  |
|      | Basis en opstelling van de CFD-berekeningen .....  | 63  |
| 7.4  | Resultaten van de simulaties met HyRAM+ .....  | 66  |
| 7.5  | Resultaten van de CFD-simulaties .....   | 67  |
|      | Simulatie-01 – Waterstof, 6 m <sup>3</sup> (n)/h .....   | 67  |
|      | Simulatie-02 – Waterstof, ~ 0.6 m <sup>3</sup> (n)/h .....   | 70  |
|      | Simulatie-05 & Simulatie-06 – aardgas, 3 m <sup>3</sup> (n)/h en 0.45 m <sup>3</sup> (n)/h .....           | 72  |
|      | Simulation-03 – Lekkage in horizontale richting .....  | 74  |
|      | Simulatie-04 – Verschillend ventilatieontwerp .....  | 75  |
| 7.6  | Conclusies CFD .....   | 78  |
| 7.7  | Aanbevelingen CFD .....  | 78  |
| 8.   | Conclusies .....   | 79  |
| 9.   | Aanbevelingen .....  | 82  |
|      | Referenties .....  | 83  |
| I    | Overzicht samenstelling begeleidings- en sparringsgroep .....  | 85  |
| II   | Berekening van ventilatie effecten .....   | 86  |
| III  | Zonebepaling .....   | 89  |
| IV   | Berekening ventilatievoud geteste behuizingen .....  | 94  |
| V    | Foto's van de testopstelling .....   | 98  |
| VI   | Gebruikte meetapparatuur .....   | 100 |
| VII  | Overzicht alle metingen .....  | 101 |
| VIII | Meetresultaten – $\frac{1}{2}$ m <sup>3</sup> kast .....   | 104 |
|      | Lekdebiet 1,8 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....   | 104 |
|      | Lekdebiet 5,6 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar ..... | 105 |
|      | Lekdebiet 0,40 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....  | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| Lekdebiet 1,25 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....   | 107 |
| Lekdebiet 0,18 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....    | 108 |
| Lekdebiet 0,56 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....  | 109 |
| Lekdebiet 0,04 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....    | 110 |
| Lekdebiet 0,125 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar ..... | 111 |
| IX Meetresultaten – 4 m <sup>3</sup> kaststation .....  | 112 |
| Lekdebiet 1,8 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....      | 112 |
| Lekdebiet 5,6 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....    | 113 |
| Lekdebiet 0,4 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....      | 114 |
| Lekdebiet 1,25 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,25 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....   | 115 |
| Lekdebiet 0,18 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....    | 116 |
| Lekdebiet 0,56 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....  | 117 |
| Lekdebiet 0,04 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....    | 118 |
| Lekdebiet 0,125 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar ..... | 119 |
| X Meetresultaten – HAS kast .....   | 120 |
| Lekdebiet 0,18 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....    | 120 |
| Lekdebiet 0,56 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 8 bar .....  | 121 |
| Lekdebiet 0,04 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – aardgas (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar .....    | 122 |
| Lekdebiet 0,125 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /hr – waterstof (lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> ) – 1 bar ..... | 123 |

## 1. Aanleiding

HyDelta is een nationaal samenwerkingsprogramma waarbij barrières die zorgen dat waterstofprojecten worden vertraagd of zelfs stilgezet, worden weggenomen. Een onderdeel van het HyDelta programma is het werkpakket Gasstations. Gasdrukregelstations (voor aardgas) staan in Nederland doorgaans in de openbare ruimte. Dat is toegestaan, omdat buiten de behuizing van een gasdrukregelstation geen ATEX-zone aanwezig is, mits deze voldoet aan de ventilatie-eisen en voorwaarden zoals gesteld in de NEN1059: 2019. In de NEN:1059, 2019 [1] wordt gesteld dat bij een ventilatievoud van meer dan 5 keer per uur, binnen de behuizing een ATEX zone 2 van toepassing is. Buiten de behuizing is er dan geen ATEX zonering.

De beschrijving zoals gesteld in de bovenstaande norm roept allerlei vragen op. Wat is de praktische betekenis van ATEX zone 2: hoe vaak mag welke concentratie optreden? Waar is de ventilatievoud van 5 keer per uur op gebaseerd en zien we het verdunnen van een lekkage/ de opbouw van een brandbaar mengsel ook daadwerkelijk terug in metingen en modellen? Wat is de kwantitatieve invulling van “kleine” lekkages en “voldoende” ventilatie? En, misschien wel de belangrijkste vraag binnen WP6B-1 van HyDelta, op welke wijze ventileert waterstof anders dan aardgas uit een behuizing van een station?

Al deze vragen hangen met elkaar samen. Daarom is er in samenspraak met de expertgroep voor gekozen om in dit onderzoek niet te werken aan de hand van één enkele algemene hoofdvraag. Wel is er één doelstelling geformuleerd. Het doel van dit onderzoek is:

Het verkrijgen van inzicht in de geschiktheid van de ventilatie van bestaande behuizingen voor de distributie van waterstof.

Om dit inzicht te verkrijgen worden de volgende deelvragen behandeld.

1. Deelvraag 1: Wat zijn de meest voor de hand liggende typen behuizingen van gasstations voor de toepassing van waterstofdistributie?
2. Deelvraag 2: Aan welke voorwaarden moet een behuizing van een gasstation voldoen voordat deze geschikt is voor de distributie van waterstof? <sup>3</sup>
3. Deelvraag 3: In hoeverre voldoen de meest voor de hand liggende behuizingen aan de voorwaarden, al dan niet met additionele ventilatie? <sup>4</sup>

Het antwoord op deelvraag 1 wordt gegeven in paragraaf 0, op deelvraag 2 in paragraaf 3.8. Deelvraag 3 wordt beantwoord in de conclusie (hoofdstuk 8).

Dit onderzoek kan het beste worden gezien als een doorontwikkeling van HyDelta 1.0. Daarin wordt aanbevolen om kleinere, meer in de praktijk voorkomende, lekken goed in kaart te brengen. Waar in HyDelta 1.0 (werkpakket D1B.3A) een realistische lekgrootte werd gedefinieerd aan de hand van de (geldende norm) NEN 1059: 2019, namelijk een lekopening met een diameter van 1mm<sup>2</sup>, wordt in dit

---

<sup>3</sup> De eisen voor ventilatie van huidige behuizingen is vastgelegd in de NEN1059: 2019 en de NEN12186: 2014 waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende soorten behuizingen. De gekozen lekopening in de NEN1059: 2019 is vastgesteld op 1 mm<sup>2</sup> voor het zoneren van opstellingsruimten. Met de resultaten uit HyDelta 1.0 staat deze lekopening ter discussie (zie ook paragraaf 3.2) voor het uitvoeren van de testen binnen dit werkpakket (voor het beproeven van de ventilatie en het vaststellen van de zonering). In HyDelta 1.0 is expliciet een aanbeveling gemaakt dat er verschil zou moeten zijn tussen een incident en een reguliere lekkage/ storing.

<sup>4</sup> Het uitgangspunt voor het toepassen van ventilatie zal in dit onderzoeksprogramma allereerst gebaseerd zijn op bestaande behuizingen en geldende normen. Aanpassingen van de behuizingen ter verbetering van de ventilatie zullen, waar nodig, in samenspraak worden bepaald.

onderzoek onderbouwd dat andere lekopeningen ook en (wellicht zelfs beter) als reëel kunnen worden beschouwd. Met deze lekopeningen worden vervolgens ook experimenten gedaan. Daarnaast wordt in HyDelta 1.0 de aanbeveling gedaan om in kaart te brengen welk type behuizingen veelvuldig in Nederland worden toegepast. In dit onderzoek wordt deze aanbeveling opgevolgd.

## 2. Inventarisatie

### Doel van de inventarisatie

Om meer inzicht te verkrijgen, is het noodzakelijk om een beeld te hebben van de verschillende behuizingen die veelvuldig voorkomen in Nederland. Daarnaast heeft de inventarisatie als hoofddoel om uitspraken te kunnen doen over de mate waarin de testen en CFD berekeningen in het onderzoek representatief zijn voor de behuizingen die gebruikt (zullen) worden voor waterstofdistributie. Binnen het onderzoek is het mogelijk een beperkt aantal testen en modelberekeningen uit te voeren en deze moeten zo veel mogelijk aansluiten bij de (te verwachten) praktijk. Daarnaast geeft dit deel van het onderzoek een mogelijk waardevol overzicht van de bestaande situatie van de behuizingen voor gasstations in Nederland.

In dit hoofdstuk wordt om die reden de volgende deelvraag beantwoord: “Wat zijn de meest voor de hand liggende typen behuizingen van gasstations voor de toepassing van waterstofdistributie?”

Met de “voor de hand liggende behuizingen” worden behuizingen bedoeld die nu gebruikelijk zijn voor nieuwe aardgas stations. Deze zijn gestandaardiseerd en veelvuldig gebruikt.

In overleg met de expertbegeleidingsgroep (EAG) is nadere invulling aan gegeven aan het begrip “voor de hand liggend”. Behuizingen die het meest waarschijnlijk zullen worden toegepast in een waterstofnetwerk zijn:

- Zo standaard mogelijk. Dit zijn namelijk de grootste aantallen waardoor ervaringen bij één behuizing kunnen worden toegepast op een groot aantal identieke exemplaren. Bovendien is hierbij ook de meeste ervaring opgedaan met aardgas. Tenslotte zijn dit ook de meest uitontwikkelde behuizingen.
- Behuizingen van relatief nieuwe stations. Voor waterstofprojecten zal een netbeheerder (logischerwijs) willen werken met de meest betrouwbare installaties en het is dan onwaarschijnlijk dat een tientallen jaren oude installatie zal worden omgezet van aardgas naar waterstof. Dat is in het bijzonder het geval voor pilot-projecten. In hoeverre later bij grootschalige waterstofdistributie ook uitsluitend gekozen wordt voor nieuwere stations, met nieuwere behuizingen, is nu nog een open vraag. Voor dit moment ligt de focus in elk geval niet op oudere typen behuizingen.
- Tenslotte is een open vraag gesteld aan de EAG welk type behuizingen zij, op basis van hun expertise, zouden selecteren voor waterstofprojecten.

### Aanpak

#### *Van helikopter view naar steeds meer details*

In eerste instantie is getracht om een volledig beeld te verkrijgen van alle behuizingen van stations van de RNB's. Met dit volledige beeld kon dan, was de gedachte, worden nagegaan hoeveel verschillende types er als “standaard” in het veld aanwezig waren, met vergelijkbare maatvoering en wijze van ventileren. Daarmee zou kennis worden opgedaan over welk percentage van de gehele populatie als “standaard” kon worden aangeduid. Van een aantal standaard behuizingen zou additionele detailinformatie worden opgevraagd, met name over de exacte lay-out van de ventilatieopeningen. Deze detailinformatie kon dan weer vergeleken worden met de lay-out van de gemodelleerde en geteste behuizingen.

Deze aanpak is deels geslaagd. De netbeheerders hebben gegevens over al hun stations kunnen herleiden. De aantallen per type (HHAS, HAS, DS, OS) zijn bekend en ook de voordruk van de stations is bekend. Andere gegevens, zoals dimensies van behuizingen en fabrikanten, bleken in veel gevallen niet beschikbaar voor de gehele populatie. In paragraaf 2.1 is met de beschikbare informatie een overzicht gegeven van de behuizingen in Nederland voor de hele populatie.

#### *Focus op de laatste 10 jaar*

De focus is gelegd op behuizingen die in de laatste 10 jaar zijn aangeschaft door de RNB's. Van deze behuizingen is meer informatie beschikbaar dan de oudere behuizingen en het is ook waarschijnlijker dat deze worden toegepast voor waterstofdistributie. Van deze behuizingen is opgevraagd en deels ontvangen: materiaal, fabricaat en % van de totale inkoop. In paragraaf 2.2 is een overzicht gegeven van de behuizingen zoals in de laatste 10 jaar ingekocht door de netbeheerders.

#### *EAG expert-opinion*

Tenslotte is aan de EAG gevraagd welke behuizing zij, op basis van hun expertise, voor de hand vinden liggen voor toepassing in een waterstof distributienetwerk.

## 2.1 Behuizingen voor gasdrukregelstations in Nederland

### De behuizing en het gasstation

Er zijn in Nederland drie partijen die gasdrukregelininstallaties (kortweg: gasstations) leveren aan de regionale gasnetbeheerders: gAilar, Raak en van Voskuilen. RENDO maakt zelf zijn eigen gasdrukregelininstallaties. Een gasstation bestaat uit een behuizing, leidingwerk en componenten (het filter, drukregelaars, de drukbeveiliging, manometers en afsluiters). Er zijn een beperkt aantal fabrikanten per component en ook een beperkt aantal fabrikanten van behuizingen. In de praktijk komen vooral vrijstaande stations (inhoud  $\geq 15 \text{ m}^3$ ), kaststations (inhoud tussen  $0,5 \text{ m}^3$  en  $15 \text{ m}^3$ ) en kasten (inhoud  $\leq 0,5 \text{ m}^3$ ) voor. In de laatste categorie vallen ook de HAS installatie, met een inhoud van circa  $1/8 \text{ m}^3$ .

De huidige behuizingen zijn gemaakt van RVS. Vanaf eind jaren '70 tot 2000 was polyester ook gebruikelijk, maar dat bleek na veroudering minder degelijk te zijn dan RVS.

Er is sprake van een geleidelijke toename van partijen die de behuizingen levert. Avedko maakt de kasten al geruime tijd, Zador is "enkele jaren geleden" tot de markt toegetreden. Dat was destijds gedreven vanuit de wens van de netbeheerders om minder afhankelijk te zijn van één partij, met kostenbesparing als uiteindelijke doel. In de recente inventarisatie zijn nieuwe namen van fabrikanten naar voren gekomen: Quintall, Idra-tech en van Veen Deventer. Dit zijn metaalbewerkingsbedrijven.

### Meest voorkomende typen, naar functie en inlaatdruk

Er is navraag gedaan hoeveel stations de RNB's beheren per type, per inlaatdruk en per volume-inhoud van de kast. De aantallen per type zijn exact bekend. Voor de aantallen per inlaatdruk en per volume inhoud van de kast zijn de gegevens niet helemaal volledig maar van een voldoende kwaliteit om een betrouwbare inschatting te geven van de verhouding. Dit overzicht is weergegeven in **Error! Reference source not found.**



Tabel 1. Gasstations van de RNB's anno 2022, per type en inlaatdruk. Dit betreft uitsluitend stations die zijn aangesloten op het hogedruknetwerk.

| Type station                  | Totaal<br>(afgerond) | Netdruk inlaatzijde (percentage van<br>totaal per type station) |              |       |
|-------------------------------|----------------------|---|--------------|-------|
|                               |                      | 1 bar   | >1 t/m 4 bar | 8 bar |
| <b>Afleverstation</b>         | 10.000               | 8%  | 13%          | 79%   |
| <b>Districtstation</b>        | 10.000               | 5%  | 17%          | 78%   |
| <b>Hogedrukafleverstation</b> | 34.000               | 8%  | 50%          | 42%   |
| <b>Overslagstation</b>        | 500                  | 0%  | 2%           | 98%   |

Hogedrukafleverstations (HAS) zijn de grootste aantallen en zijn vooral aangesloten op het 4 bar of 8 bar deelnet. Afleverstations (AS, een aansluiting voor een bedrijf) zijn tevens een grote groep. De capaciteit van een AS is een veel grotere range dan van een HAS waarmee de behuizingen ook een grotere range zullen hebben. Van de populatie districtstations hebben verreweg de meeste een voordruk van 8 bar.

#### Veel voorkomende afmetingen

Om de afmetingen van behuizingen te achterhalen is in eerste instantie begonnen met een indeling per groep. Deze groep zijn: a)  $\leq 0,5\text{m}^3$ , b)  $0,5 - 2\text{m}^3$ , c)  $2\text{ t/m } 4\text{m}^3$  en d) groter dan  $4\text{m}^3$ .

In de systemen van de netbeheerders is in veel gevallen geen koppeling gemaakt tussen de afmetingen van een gasstation en de functie van een station. Alhoewel het niet altijd goed geregistreerd is, zijn veelal van de stations  $0,5\text{m}^3$  kasten of kleiner. Grotere installaties waren vroeger gebruikelijk, maar door standaardisatie en ontwikkelingen zijn ze kleiner geworden. Overslagstations zijn qua formaat ongeveer gelijkwaardig verdeeld in alle groepen. Van de districtstations en afleverstations was de dataset niet compleet genoeg om hieraan conclusies te verbinden.

## 2.2 Belangrijkste typen van behuizingen laatste 10 jaar

De netbeheerders is gevraagd welke behuizingen ze in de laatste 10 jaar hebben ingekocht. Dat geeft het volgende beeld:

Tabel 2. Inventarisatie type behuizingen zoals in de laatste 10 jaar zijn ingekocht door de netbeheerders

| RNB      | Type kast         | Materiaal behuizing | Fabrikant behuizing | Inhoud (m <sup>3</sup> ) | % van het totaal (per netbeheerder) | Opmerkingen  |
|----------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Coteq    | kast              | RVS                 | Avedko              | 0,5                      | 57%                                 | afmetingen 1x0.5x1 m   |
| Coteq    | kaststation       | RVS                 | Avedko              | 5,12                     | 19%                                 | afmetingen 1.6x1.6x2 m   |
| Coteq    | HAS               | RVS                 | Avedko              | 0,06                     | 8%                                  | afmetingen 0.5x0.4x0.3 m   |
| Coteq    | kaststation       | RVS                 | Avedko              | 4                        | 6%                                  | afmetingen 2x1x2 m   |
| Coteq    | kaststation       | RVS                 | Avedko              | 1                        | 5%                                  | afmetingen 1x1x1 m   |
| Coteq    | kast              | RVS                 | Zador               | 0,5                      | 4%                                  | afmetingen 1x0.5x1 m   |
| Enexis   | kast              | RVS                 | Zador               | 0,5                      | 60%                                 | aantallen is 2021 en 2022 t/m 19-10  |
| Enexis   | kaststation       | RVS                 | Zador               | 4                        | 18%                                 | aantallen is 2021 en 2022 t/m 19-10  |
| Enexis   | kaststation       | RVS                 | Zador               | 1                        | 14%                                 | aantallen is 2021 en 2022 t/m 19-10  |
| Enexis   | kaststation       | RVS                 | Zador               | 2,25                     | 8%                                  | aantallen is 2021 en 2022 t/m 19-10  |
| Liander  | kast              | RVS                 | Zador               |                          | 41%                                 | inhoud 0,25 t/m 0,5 m3   |
| Liander  | kast              | RVS                 | Adedko              |                          | 12%                                 | inhoud 0,25 t/m 0,5 m3   |
| Liander  | kaststation       | RVS                 | Zador               |                          | 8%                                  | inhoud 1 tot 15 m3   |
| Liander  | kaststations      | RVS                 | Adedko              |                          | 6%                                  | inhoud 1 tot 15 m3   |
| Liander  | kaststations      | RVS                 | Idra-tech           |                          | 3%                                  | inhoud 1 tot 15 m3   |
| Liander  | kast              | RVS                 | Voskuilen           |                          | 3%                                  | inhoud 0,25 t/m 0,5 m3   |
| Liander  | vrijstaand gebouw | steen               | Mavo                |                          | 3%                                  | inhoud > 15m3  |
| Liander  | kast              | RVS                 | onbekend            |                          | 2%                                  | inhoud 0,25 t/m 0,5 m3   |
| Liander  | kast              | RVS                 | Idra-tech           |                          | 2%                                  | inhoud 0,25 t/m 0,5 m3   |
| Liander  | vrijstaand gebouw | steen               | onbekend            |                          | 2%                                  | Amsterdam. Inhoud > 15m3   |
| RENDO    | Mini kast         | RVS                 | Avedko              | 0,07                     | 44%                                 | ter vervanging polyester kastje. Rendo heeft relatief veel mini kastjes en de laatste 10 jaar zijn relatief veel vervangen. Daarom mogelijk vertekend beeld. |
| RENDO    | kast              | RVS                 | Avedko              | 0,5                      | 32%                                 | betreft met name vervanging polyester kasten   |
| RENDO    | kaststation       | RVS                 | Avedko              | 4                        | 24%                                 | betreft met name vervanging polyester kaststations   |
| Stedin   | kast              | RVS                 | Avedko              | 0,5                      | 48%                                 |  |
| Stedin   | maatwerk          | RVS                 | Avedko              |                          | 31%                                 | > 0,5 m <sup>3</sup> en < 15 m <sup>3</sup>  |
| Stedin   | kleine kast       | RVS                 | Avedko              |                          | 18%                                 | < 0,5 m <sup>3</sup>   |
| Westland | onbekend          | aluminium           | Quintall            | 0,5                      | 36%                                 |  |
| Westland | onbekend          | aluminium           | Quintall            | 0,1                      | 31%                                 | afmetingen: 690x500x300 mm   |
| Westland | onbekend          | RVS                 | Avedko              | 0,12                     | 28%                                 | afmetingen: 565x650x330 mm   |
| Westland | onbekend          | onbekend            | Weva                | 0,25                     | 4%                                  |  |
| Westland | onbekend          | RVS                 | Avedko              | 0,5                      | 0.7%                                |  |
| Westland | onbekend          | RVS                 | Avedko              | 0,5                      | 0.1%                                |  |

Hieruit blijkt dat ook in de laatste 10 jaar, Avedko de belangrijkste partij was om de behuizing van stations te leveren. RVS is het meest gebruikte materiaal. Polyester wordt niet meer toegepast in nieuwe behuizingen, aluminium wordt wel gebruikt. Voordelen van aluminium ten opzicht van RVS zijn een lagere prijs en een lager gewicht. Overigens maakt het gebruikte plaatmateriaal voor de ventilatie van een station geen verschil.

Verder valt uit de data op te maken dat het merendeel van de behuizingen die de laatste 10 jaar zijn geplaatst een relatief kleine inhoud hebben, zoals is samengevat in tabel 2.

Tabel 3. Percentage van de behuizingen in de laatste tien jaar met een inhoud van  $\leq 0,5 \text{ m}^3$

| RNB      | $\leq 0,5 \text{ m}^3$ |
|----------|------------------------|
| Coteq    | 69%                    |
| Enexis   | 60%                    |
| Liander  | 60%                    |
| Rendo    | 76%                    |
| Stedin   | 66%                    |
| Westland | 100%                   |

### 2.3 Expert opinion voor de hand liggende behuizingen

Uit analyse van de belangrijkste gegevens die verkregen zijn bij de uitvraag naar de vijf tot tien meest voorkomende behuizingen bleek dat er veel verschillende soorten “standaard” maten in omloop zijn. Zoals benoemd lag de focus voornamelijk op de meest frequent toegepaste behuizingen in de afgelopen 10 jaar. Hieronder zijn de standaarden en bijzonderheden per type station samengevat.

#### Veel voorkomende maatvoeringen

##### Minikast / HAS / AS

Vrijwel alle netbeheerders hebben hun eigen “standaard” maten voor de behuizingen. Voor het kleinste type behuizing, werden de volgende dimensies opgegeven als veelvoorkomende behuizingen:

Tabel 4. Veel typische voorkomende afmetingen van kleinste typen behuizingen per netbeheerder.

| RNB                 | Lengte (m) | Breedte (m) | Hoogte (m) | Totaal ( $\text{m}^3$ ) |
|---------------------|------------|-------------|------------|-------------------------|
| Coteq               | 0,5        | 0,4         | 0,3        | 0,06                    |
| Enexis <sup>5</sup> | 0,415      | 0,3         | 0,5        | 0,062                   |
| Liander             | 0,6        | 0,3         | 0,6        | 0,108                   |
| Rendo               | 0,45       | 0,25        | 0,65       | 0,073                   |
| Stedin <sup>6</sup> | 0,8        | 0,35        | 0,4        | 0,14                    |
| Westland            | 0,3        | 0,5         | 0,7        | 0,105                   |

De inhoud van de behuizing wisselt tussen de 60 liter en de 108 liter. Aangezien dit al de “meest-voorkomende” types zijn, is niet uit te sluiten dat in het veld nog kleinere of grotere mini-kasten te vinden zijn. Wel kan gesteld worden dat alle netbeheerders streven naar standaardisatie. Zeker wanneer gekeken wordt naar behuizingen van de laatste 10 jaar, kan worden gesteld dat elke netbeheerder een standaard model heeft. Liander heeft de laatste 10 jaar hoofdzakelijk mini-kasten geplaatst met dimensies 0,6 x 0,6 x 0,3 meter. Enexis meldt dat voor mini-kasten (HAS) en afleverstations in de regel in

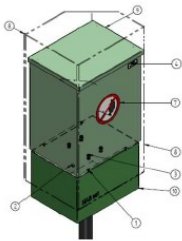

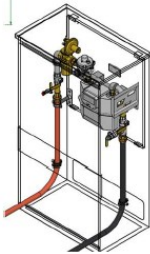


<sup>5</sup> Detail tekening geleverd met maten 0,5/0,4/0,3 m

<sup>6</sup> Brochure gAvilar geleverd met maten 0,75/0,45/0,75 m

“nagenoeg” dezelfde behuizingen worden geleverd. Dit beeld wordt bevestigd door alle betrokken netbeheerders.

### Principe van ventilatie

De netbeheerders hebben foto's en tekeningen aangeleverd van de behuizingen, zie figuur 7. Daarnaast is één mini-kast aangeleverd voor het uitvoeren van testen (hierover meer in hoofdstuk 5).

| Enexis  | Liander   | Stedin  | Rendo  | Westland  |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| LxBxH =<br>415x300x500mm  | LXBXH =<br>600x300x600mm  | LXBXH =<br>800x350x~500mm   | LXBXH =<br>450x250x650mm   | LXBXH =<br>300x500x700mm  |

Figuur 7. Veel voorkomende afmetingen van mini-kasten

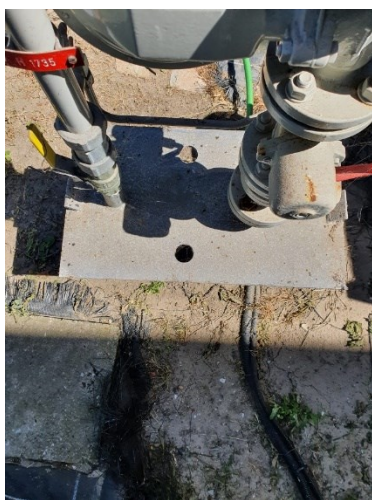
Uit bestudering van deze tekeningen valt op dat de ventilatie in hoofdlijnen op vier verschillende methodes wordt gebaseerd, waarbij optie 3 door één netbeheerder wordt toegepast en optie 4 als curiositeit kan worden beschouwd. Het gaat om de volgende principes:

1. Bovenventilatie<sup>7</sup> door middel van een overmaats dak. Dit zien we terug in de tekeningen van Liander, Stedin en Rendo. Het dak bevindt zich op enige afstand (orde grootte 1 cm) boven de rest van de behuizing. Het dak rust op enkele schroeven. Het dak is overmaats, hetgeen betekent dat de dakrand enkele millimeters breder en/of langer is. Ter voorkoming van een volledige open ruimte (met het risico dat men zaken naar binnen kan gooien), hebben de dakranden verticale strips. Uit de tekening van Liander is op te maken dat de dakrand op drie zijden (1x lang, 2x kort) groter is dan de voet. De tekening van Stedin is minder duidelijk, maar hier lijkt de dakrand op alle vier de zijden overmaats te zijn.
2. Bovenventilatie door middel van een sleuf. De mini behuizing die door Enexis is aangeleverd beschikt over één sleuf aan een lange zijde, zie figuur 8. Ook hier is door middel van een opstaande strip voorkomen dat er een volledig open ruimte ontstaat.
3. De behuizingen van Westland beschikken over boven- en onderventilatie. De minikast rust op de gasvoerende buizen en in de bodemplaat zitten twee openingen. Daarnaast beschikken beide de korte zijden van de dakrand over kieren als gevolg van het overmaatse dak. Westland kent ook een polyester (0,25 m<sup>3</sup>) minikast die aan de onderkant geheel open is en enige centimeters boven maaiveld wordt geplaatst, figuur 10.
4. Tijdens een voortgangsoverleg werd een foto getoond gemaakt van mini-kasten met een rond ventilatierooster. Dit wordt beschouwd als curiositeit en tegelijkertijd als een mogelijke oplossingsrichting wanneer extra ventilatie gerealiseerd moet worden.

<sup>7</sup> Bij het toepassen van bovenventilatie zijn aan de bovenzijde van een behuizing ventilatieopeningen gemaakt waardoor natuurlijke ventilatie kan plaatsvinden. De inhoud van de behuizing kan zo ververst worden. In het geval van onderventilatie zijn aan de onderzijde van de behuizing ventilatieopeningen aangebracht. In het geval van kruisventilatie zijn zowel aan de boven- als onderzijde ventilatieopeningen aangebracht.



Figuur 8. Mini-kast Enaxis met enkele sleuf.



Figuur 9. Kruisventilatie in de 0,1 m<sup>3</sup> minikast van Westland



Figuur 10. De "open" 1/4 m<sup>3</sup> polyester kast van Westland.

### ½ m<sup>3</sup> kast

Door alle netbeheerders is aangegeven dat de "½ m<sup>3</sup> kast" veel wordt toegepast. Een veelgebruikt ½ m<sup>3</sup> kast van gAvilar (type DS1) heeft als afmetingen 1,0 x 0,5 x 1,0 meter (l x b x h). De ½ m<sup>3</sup> kast van Zador (zoals onder andere gebruikt door Liander), heeft als afmetingen 1,05 x 0,56 x 1 meter. Omdat bij de bepaling van de inhoud van een station wordt gerekend *exclusief* de ruimte die door de installatie wordt



ingenomen, wordt hier nog steeds gesproken over een  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast. Beide worden veel toegepast. Alle  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kasten waarvan wij de tekeningen hebben ingezien, maken gebruik van het overmaatse dak en bovenventilatie.

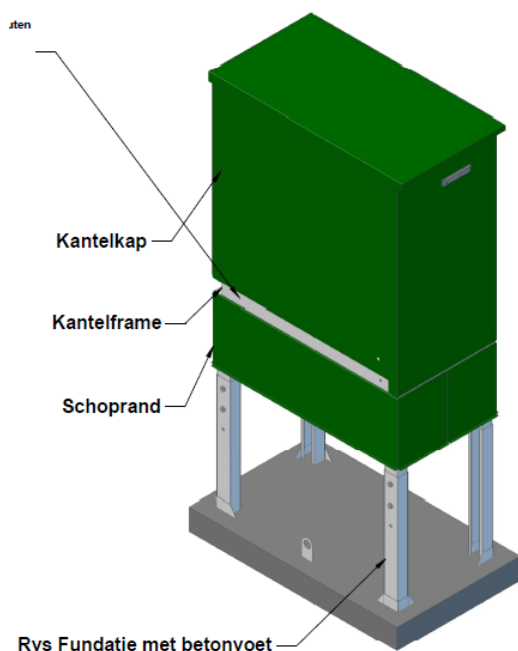
Het dak van deze behuizing bevindt zich enkele millimeters boven de bovenkant van de voet. Het dak rust op O-ringen rondom de bevestigingsbout, zoals is op te maken uit deze foto (figuur 11) die vanuit de binnenzijde van de kast is genomen.



*Figuur 11. Dak (boven) van  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast, bevestigd met bout op de voet. De spleet is in verbinding met de buitenlucht.*

Het standaard principe van een  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast is dat van een kantelkast of klapkast, zoals weergegeven is in figuur 12. Het kantelende deel van de kast rust op een rubberen strip, alle ventilatieopeningen bevinden zich dus ook bij een klapkast rondom het dak. Het is bekend dat niet alle  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kasten ook klapkasten zijn, maar aangezien dit geen invloed lijkt te hebben op de ventilatie is geen nader onderzoek gedaan naar de verdeling klapkast/vaste kast bij de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kasten.

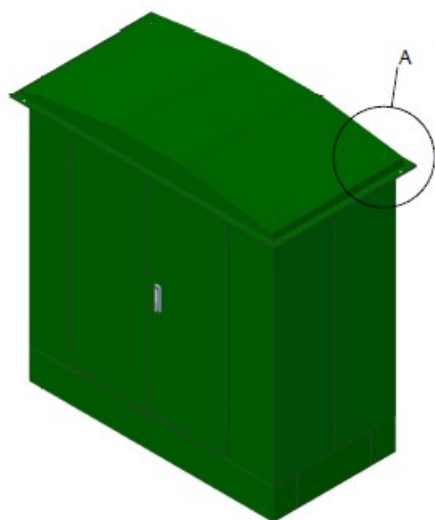
Alle  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kasten die in de laatste 10 jaar zijn geleverd beschikken over een plat dak.  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kasten met een puntdak kunnen voorkomen, dit zijn oudere modellen. Inzet van deze oudere en afwijkende kasten voor waterstofprojecten ligt niet voor de hand en deze worden daarom verder in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.



Figuur 12. Tekening 1/2 m<sup>3</sup> kast Liander (Zador)

#### Groter dan ½ m<sup>3</sup>

Een andere veel-voorkomende maat zijn kaststations van 2 x 1 x 2 meter. Verder zijn allerhande maten in omloop. Van Liander is een tekening verkregen van de 4m<sup>3</sup> kast zoals deze door Zador wordt gefabriceerd, (figuur 13). Ook hier is duidelijk de overmaatse dakrand als ventilatieprincipe terug te zien.



Figuur 13. Uitsnede constructietekening 4 m<sup>3</sup> kaststation Liander (Zador)

Wat verder opvalt in deze tekening is dat deze behuizing geen plat dak heeft, maar (tot op zekere hoogte) een puntdak. Dat type dak zien we terug op meerdere plekken. Het is in gebruik door Rendo (figuur 14), Westland Infra (figuur 15) en is tevens aanwezig in de behuizing die wordt gebruikt in dit onderzoek en is aangeleverd door Enexis (figuur 16).



Figuur 14. Een 4 m3 kaststation van Rendo



Figuur 15. Een 4 m3 kaststation van Westland Infra





Figuur 16. Het 4 m<sup>3</sup> kaststation zoals wordt gebruikt voor de testen (aangeleverd door Enexis)

De reden dat dit “punt dak” hier wordt benoemd, is dat het vermoeden bestaat dat dit invloed heeft op de ventilatie. Hierover wordt in paragraaf 6.4 verder aandacht besteed.

## 2.4 Interpretatie van de inventarisatie

Uit de inventarisatie kunnen een aantal conclusies worden verbonden.

Algemeen:

- Behuizingen worden hoofdzakelijk gemaakt van RVS en hoofdzakelijk door Avedko en Zador, al leveren andere metaalbewerkingsbedrijven ook behuizingen.

Minikasten:

- Elke netbeheerder heeft zijn eigen standaard minikast.
- Als ventilatieprincipe worden diverse methoden gekozen, met het overmaatse dak als meest voorkomende oplossing.

0,5 m<sup>3</sup> en 4 m<sup>3</sup> kasten

- Behuizingen zijn tot in grote mate gestandaardiseerd. Wel zijn er verschillende tekeningen in omloop en worden de kasten geleverd door diverse leveranciers.
- Uit de verkregen foto's en tekeningen blijkt telkens één principe van ventilatie: het overmaatse dak. Andere principes van ventilatie (bijvoorbeeld met roosters of kruisventilatie) worden nauwelijks toegepast.

## 2.5 Selectie van behuizingen en de mate waarin deze representatief zijn (beantwoording deelvraag 1)

In hoofdstuk 1 is de volgende deelvraag gesteld:

Wat zijn de meest voor de hand liggende typen behuizingen van gasstations voor de toepassing van waterstofdistributie?

In de laatste 10 jaar zijn vooral kleinere behuizingen geplaatst, deze behuizingen zijn tamelijk uniform. In het bijzonder zijn kasten met een inhoud van 0,5 m<sup>3</sup> en kaststations met een inhoud van 4 m<sup>3</sup> in grote mate vergelijkbaar. Het is hiermee aannemelijk dat de resultaten uit dit onderzoek een goede indicatie zijn voor alle stations met deze inhoudsmaat, zolang deze gelijk zijn met betrekking tot de wijze van ventileren en het ventilatieoppervlakte. De mini kasten (inhoud < 0,5 m<sup>3</sup>) zijn in mindere mate uniform. Elke netbeheerder heeft zijn eigen standaard die soms veel en soms weinig afwijkt van de standaard van andere netbeheerders.

Deze drie types behuizingen (de mini-kast, de ½ m<sup>3</sup> kast en de 4 m<sup>3</sup> kast) kunnen gebruikt worden als indicatie voor een substantieel deel van de hele populatie. Deze drie types worden beschouwd als het meest voor de hand liggend om te onderzoeken voor toepassing met waterstof vanwege het feit dat deze veel voorkomen.

De *mini-kast* wordt toegepast in een hogedrukafleverstation (HAS). In absolute aantallen is dit het meest voorkomende gasstation. Daarnaast zal deze kast, gezien het beperkte volume, bij een relatief klein lek snel hoge gasconcentraties bereiken. Binnen het project moesten keuzes worden gemaakt welke behuizingen wel en welke niet getest konden worden. Gedurende een lange tijd in het project was het uitgangspunt om te kiezen voor uitwerking van de 1/2m<sup>3</sup> kast en de 4m<sup>3</sup> kast, waarbij de mini-kast buiten beschouwing gelaten zou worden. Redenen om deze buiten te beschouwen te houden waren:

- Er zijn bij de meeste netbeheerders geen waterstof(pilot)projecten gaande of in de planning waarbij mini-kasten worden gebruikt.
- Testen en modellen zouden waarschijnlijk weinig inzichten opleveren. Extrapolatie van gegevens van testen met de ½ m<sup>3</sup> kast uit HyDelta 1.0 en de eerste testen in dit HyDelta 2.0 onderzoek gaven een indicatie dat de ventilatie met de huidige lay-out van de kleinere mini-kasten volstrekt onvoldoende zou kunnen zijn.
- Gezien de grotere diversiteit van de mini-kasten zou het onderzoek tamelijk uitvoerig moeten zijn. Daarmee zouden te veel andere aandachtspunten van het onderzoek geschrapt moeten worden.

Tegen het eind van het project is alsnog gekozen om enkele testen uit te voeren met de mini-kast. Dit had als doel om alvast enige kennis op te doen van het ventilatiegedrag van mini-kasten zodat een eventueel vervolgonderzoek gericht op de mini-kast zo effectief mogelijk kan worden vormgegeven. De onderzochte mini kast (HAS) heeft artikelnummer 74025, type A en is geproduceerd door de firma RAAK. De behuizing is gemaakt door Van Veen metal Productie Deventer. Deze heeft als afmetingen 40,7 x 30,8 x 51,4 cm (lbh). Aan één lange zijde bevindt zich een ventilatiesleuf, direct onder de dakrand. De ventilatiesleuf is 13,5 mm bij 404 mm, daarmee bedraagt de ventilatie 4,6% van het vloeroppervlakte.

De ½ m<sup>3</sup> kast is door alle netbeheerders genoemd als interessant type. Dit model is het meest gestandaardiseerd van alle maatvoeringen. Bovendien is in HyDelta 1.0 ook getest met een ½ m<sup>3</sup> kast,

waardoor resultaten uit HyDelta 1.0 gekoppeld konden worden aan 2.0. De geteste  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast is een klappkast, aangeleverd door Enexis. Afmetingen van deze kast zijn 106 x 55,5 x 106 cm (lxbxh). De omlaagstaande lip van de dakrand heeft een hoogte van 5 cm. Aan drie zijden is bovenventilatie toegevoegd, aan de twee lange zijden en één korte zijde. De spleet onder het dak is 4mm. Het totale oppervlakte van de ventilatie is hiermee 2% van het vloeroppervlakte.

De 4 m<sup>3</sup> kast is ook door de meeste netbeheerders genoemd als interessant type. Van de kaststations “groter dan  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup>” is de 4 m<sup>3</sup>-kast het meest gestandaardiseerd. Mogelijk kunnen metingen en berekeningen aan de 4m<sup>3</sup> kast dienen als indicatie voor alle “grotere” kaststations. Ook hier geldt dat deze ook in HyDelta 1.0 is getest, waardoor resultaten uit HyDelta 1.0 gekoppeld konden worden aan 2.0. De afmetingen van dit kaststation zijn 200x100x200 cm. De maten komen overeen met Avedko artikel nummer 014.30.01. Rondom de gehele omtrek van het station bevindt zich een ventilatiesleuf van 16mm. Het totale ventilatieoppervlakte is daarmee 4,8% van het vloeroppervlakte.

### 3. Beschouwing lekopening en relevante normen

#### 3.1 Terugblik op onderzoek HyDelta 1.0 (werkpakket D1B.3A)

Tijdens de start van het HyDelta onderzoek in 2020 is als onderdeel van het werkpakket 1B “gasstations” onder andere gekeken naar de ventilatie van behuizingen voor gasdrukregelstations [2]. Wanneer gasdrukregelstations gebruikt gaan worden voor de distributie van waterstof, moeten de nu geldende normen en eisen opnieuw tegen het licht worden gehouden.

De vraag die destijds voorlag, was tweeledig en als volgt geformuleerd;

1. *Zijn er aanpassingen aan de behuizing nodig voor een veilig gebruik met waterstof en zo ja, welke?*
2. *Kan er onder normale omstandigheden buiten de kast een brandbaar of explosief aardgas of waterstof mengsel optreden?*

Deze hoofdvragen konden beantwoord worden wanneer de volgende deelvragen werden beantwoord:

1. *Wat is het maximale lekdebiet in een station waar rekening mee moet worden gehouden in het veld tijdens normale bedrijfsomstandigheden?*
2. *Voldoet de binnenzijde van het station inderdaad aan ATEX zonering 2, bij de huidig toegepaste ventilatie en het maximale lekdebiet, zowel voor aardgas als voor waterstof?*
3. *Is er sprake van een brandbaar mengsel **buiten de behuizing** bij de huidige toegepaste ventilatie en het maximale lekdebiet, zowel voor aardgas als voor waterstof?*

Uit de resultaten is naar voren gekomen dat de gekozen lekopening van 1 mm<sup>2</sup> leidt tot aanzienlijke lekdebieten waarbij zowel de concentraties aardgas als waterstof opliepen tot ruim in het ontsteekbare gebied. De vraag hierbij was wel in hoeverre de geselecteerde lekopening en de gekozen lekdebieten realistisch worden geacht voor een gaslekkage onder normale bedrijfsomstandigheden. De 1 mm<sup>2</sup> zou daarbij moeten worden beschouwd als een incident en niet als een reguliere lekkage/ storing.

Hieruit is in HyDelta 1.0 onder andere de aanbeveling gedaan om opnieuw te kijken naar de resultaten van dat onderzoek. Voornaamste doel zou moeten zijn wat een goede inschatting is voor realistische lekdebieten voor reguliere lekkages. Een opsomming van realistische lekdebieten staat beschreven in paragraaf 3.2, waarna in paragraaf 3.3 een keuze wordt gemaakt voor meest realistische lekdebieten die vervolgens ook zijn toegepast in de experimenten.

### 3.2 Beschikbare informatie over lekkages

In HyDelta 1.0 is in de werkgroep uitgebreid gesproken over lekkages in gasdrukregelstations. In dit onderzoek is gekozen om lekkages te testen die goed overeenkomen met heersende drukken uit de praktijk. Het toepassingsgebied van gasdrukregelstations weergegeven in tabel 1. De heersende druk vormt samen met de gekozen lekopening de input voor de berekening van de volumetrische uitstroom van aardgas of waterstof.

Tabel 1 - type stations en toepassingen

| Type station                  | inlaatdruk |       |       |       | uitlaatdruk                        |       |       |       |
|-------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|
|                               | ≤ 200 mbar | 1 bar | 4 bar | 8 bar | ≤ 200 mbar                         | 1 bar | 4 bar | 8 bar |
| <b>Afleverstation</b>         | x          | x     | x     | x     | afhankelijk van wensen v/d afnemer |       |       |       |
| <b>Districtstation</b>        |            | x     | x     | x     | x                                  |       |       |       |
| <b>Hogedrukafleverstation</b> |            | x     | x     | x     | x                                  |       |       |       |
| <b>Overslagstation</b>        |            |       | x     | x     |                                    | x     | x     |       |

De vraag “Wat is het maximale lekdebiet in een gasdrukregelstation waar rekening mee moet worden gehouden?” kan dus alleen goed beantwoord worden wanneer de maximale druk (8 bar) en de maximale lekopening gedefinieerd zijn. Deze uitgangspunten zijn, net als de link met de praktijk, noodzakelijk om te beantwoorden om tot een goed uitgangspunt te komen. De grootte van een lekopening wordt in diverse bronnen genoemd.

#### Informatie uit normen

In Nederland worden gasdrukregelstations ontworpen aan de hand van de NEN1059; 2019 [3], “gasvoorzieningsystemen - Gasdrukregel- en meetstations voor transport en distributie”. In deze norm wordt een lekopening van 1 mm<sup>2</sup> gedefinieerd voor het bepalen van de zonering van een opstellingsruimte. Van deze waarde is de referentiebron niet eenduidig te achterhalen maar het vermoeden bestaat dat het hier gaat om de ademopening van een falende regelaar of het falen van een bourdonveer van een manometer. In het artikel “de hinderwet en gasdrukregel- en meetstations” in het tijdschrift GAS van februari 1968 wordt beschreven dat de menselijke factor een grote rol speelt bij lekkages en dat behoorlijke ventilatie een noodzaak is. Uit vroege richtlijnen blijkt dat het niet uitgesloten kan worden dat gas uitstroomt door een opening van circa 1 mm<sup>2</sup> door het springen van een bourdonveer in een manometer [4]. In de hinderwet (1968) zelf wordt in hoofdstuk IX beschreven dat “in een omsloten opstelling moeten openingen, groter dan 1 mm, waar – bijvoorbeeld als gevolg van het bezwijken van een membraan, balg, bourdonbuis of het in werking treden van een veiligheidsklep – gas in gevaarlijke hoeveelheden kan uitstromen, zijn voorzien van een afvoerleiding, waardoor dit gas op een veilige plaats in de buitenlucht wordt afgevoerd”. Hier wordt dus gesproken over 1 mm in plaats van 1 mm<sup>2</sup>. (nb. een cirkelvormig lek met een doorsnee van 1 mm heeft een oppervlakte van  $\frac{1}{4} * \pi * 1^2 = 0,79 \text{ mm}^2$ ). Deze 1 mm<sup>2</sup> staat al enige tijd ter discussie, zoals zal worden toegelicht in de volgende paragraaf.

Naast de NEN1059:2019 kan ook de IGEM/SR/25 Edition 2 (2010) [5], “Hazardous area classification of Natural Gas installations” geraadpleegd worden. In deze norm van IGEM, the institution of gas engineers and managers is het advies om voor de beschouwing van aardgas lekkages in gasdrukregelstations een lekopening te kiezen van 0,25 mm<sup>2</sup> voor secundaire gevaarbronnen bij een ingaande druk van meer dan 100 mbar. Voor installaties met een ingaande druk tot 100 mbar wordt in de UK aangeraden om voor secundaire gevaarbronnen te rekenen met een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> (paragraaf 4.4.1 van IGEM /SR/25).

In de NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) [6], “Explosive atmospheres – part 10-1: classification of areas – explosive gas atmospheres” worden de richtlijnen uitgezet voor Europese ATEX regulering. In deze norm die toepasbaar is op explosieve atmosferen in het algemeen komen dezelfde waarden terug voor de lekkages van pakkingen. In het HyDelta rapport “ventilatie” is de aanbeveling verstrekt om metingen te verrichten in de bandbreedte tussen 0,025 mm<sup>2</sup> en 0,25 mm<sup>2</sup> waar in annex B van deze norm (Table B.1 – “Suggested hole cross sections for secondary grade of releases”) wordt gerefereerd aan “typical values for the conditions at which the release opening will not expand”. Deze norm laat meer ruimte voor interpretatie dan de IGEM/SR/25 omdat hier een bandbreedte wordt gegeven van 0,025 mm<sup>2</sup> en 0,25 mm<sup>2</sup> waarbij geen relatie wordt gelegd met de heersende druk.

In het onderzoeksrapport van de Britse Health and Safety Executive (RR630 - “Area classification for secondary releases from low pressure natural gas systems”) [7] worden soortgelijke waarden gedefinieerd voor secundaire gevaarenbronnen waarbij de inhoud van dit onderzoeksrapport is ingebracht in de IGEM/SR/25 Edition 2.

### **Lekgrootte uit de 1059 staat ter discussie**

In paragraaf 7.3.11 van de norm NEN 1059:2019 staat een lekopening genoemd van 1 mm<sup>2</sup>. Daarin staat *“Een opstellingsruimte mag als niet-gevaarlijk gebied (NGG) worden geclassificeerd als een gaslek met een opening van maximaal 1 mm<sup>2</sup> bij de onder normale bedrijfsomstandigheden heersende druk, geen gevaarlijke hoeveelheid explosief gas-luchtmengsel kan opleveren. Zie bijlage E.”* In bijlage E wordt genoemd dat opstellingsruimten voor meteropstellingen met een maximale inlaatdruk van 100mbar als NGG kunnen worden geclassificeerd, indien aan de voorwaarden wordt voldaan.

Zoals in de bovenstaande paragraaf reeds is toegelicht, is deze lekgatgrootte te herleiden is tot de opening bij het springen van een bourdonveer in een manometer. Een tweede argument dat wordt gebruikt in de normcommissie van de NEN 1059 is dat 1 mm<sup>2</sup> de ademopening is van een regelaar. Op het moment dat een membraan is een regelaar scheurt, ontstaat er een uitstroombopening ter grootte van deze ademopening van circa 1 mm<sup>2</sup>.

Binnen de normcommissie van de NEN 1059 staat de lekopening van 1 mm<sup>2</sup> al enige tijd ter discussie. Verreweg de meeste gasstations van de netbeheerder hebben een inlaatdruk van 8 bar, 4 bar of 1 bar. Echter, bijlage E van de 1059 benoemt specifiek gasmeteropstellingen met een inlaatdruk van 100 mbar. De NEN 1059 geeft in feite geen direct antwoord op de vraag welke lekopening aangenomen moet worden bij het bepalen van de benodigde ventilatie voor stations bij een druk groter dan 100 mbar. Bij gebrek aan dit duidelijke antwoord, zijn binnen Hydelt 1.0 metingen gedaan bij een lekopening van deze 1 mm<sup>2</sup>, maar dan wel bij een in de praktijk optredende bedrijfsdruk, namelijk 8 bar. Het lekdebiet dat ontstaat bij een voordruk van 8 bar en een lekopening van 1 mm<sup>2</sup> is veel groter dan wat door de experts binnen de normcommissie als realistisch wordt beschouwd voor een regulier optredend lek. Een dergelijk groot gaslek is zowel hoorbaar als ruikbaar op enige meters van het gasstation en zal beschouwd worden als een incident en niet als een reguliere lekkage. In de sector en bij de leden van de NEN 1059 commissie is er geen enkel incident bekend dat er door een vonk van buitenaf, onder normale omstandigheden, een kast vlam heeft gevat [8]. Wel worden met enige regelmaat gaslucht gemeld bij gasstations, waarop gereageerd wordt door de storingsdiensten van de netbeheerder.

### **Praktijkmetingen aan lekken bij stations**

Om een beter beeld te verkrijgen welke gasconcentraties zich daadwerkelijke voordoen bij ventilatieopeningen in districtregelstations, is in 2022 onderzoek uitgevoerd door Kiwa Technology, in opdracht van de normcommissie NEN 1059 en Netbeheer Nederland. Bij een totaal van 713 districtstations is met een gasconcentratiemeter secuur (en volgens gestandaardiseerd protocol) gemeten langs de ventilatieopeningen. De aanzuigopening van de gasconcentratiemeter is zo dicht als mogelijk bij of net in de opening gehouden. In deze positie is met een snelheid van 2 meter per minuut



langs de ventilatieopeningen bewogen. Vervolgens is nog 1 minuut gemeten op de plek waar de maximale concentratie tijdens de rondgang is gemeten.

Er is tijdens het uitvoeren van deze metingen in geen enkel geval een brandbaar mengsel gevonden in de ventilatieopening. Bij tweederde van de metingen is de methaanconcentratie lager dan 11 ppm. Bij 99,4% van alle metingen is de gasconcentratie onder de 10% LEL. Twee metingen hadden een meetwaarde van 10% LEL en 2 metingen zitten daarboven, met als hoogst gemeten waarde 40% LEL. Er is geen enkel brandbaar mengsel gemeten in de ventilatieopeningen van alle 713 stations die bemeten zijn. Dit project heeft daarmee aangetoond dat het zeer onwaarschijnlijk is dat een station tijdens regulier bedrijf vanuit de ventilatieopeningen tot ontbranding kan worden gebracht [8].

#### *Lekdebietmetingen vanuit het onderwerp methaanemissies*

Het project waarbij de ventilatieopeningen van 713 stations zijn doorgemeten, heeft in 2022 ook een *spin-off* project gekregen vanuit het oogpunt van kwantificeren van methaanemissies. Informatie over gasconcentraties bij de ventilatieopeningen zijn buitengewoon nuttig vanuit het oogpunt van veiligheid. Vanuit het oogpunt van kwantificeren van methaanemissies, is het ook noodzakelijk om een uitspraak te kunnen doen over de omvang van een lekdebiet.

De monteur die de concentratiemeting in de ventilatieopeningen doet, heeft bij een meetwaarde van meer dan 500 ppm contact opgenomen met Kiwa. Bij 13 districtstations heeft Kiwa vervolgens door middel van een “Hi Flow Sampling” meting het lekdebiet bepaald. Het grootste gemeten lek was 0,3 liter/minuut (18 liter/uur). Een gemiddelde lekgrootte is 2 liter uur [9].

Ook in Duitsland is in 2022 onderzoek gedaan naar lekkages in gasdrukregelstations. Uit DVGW onderzoek [10] is naar voren gekomen dat bij reguliere lekkages aan 159 gasdrukregelstations een gemiddeld lek van 1,8 liter per uur is gemeten. De maximale gevonden lekkage bedroeg 31 liter per uur. Tevens is vastgesteld dat tweederde van alle metingen kleiner zijn dan 2 liter per uur met een mediaan van 1 liter per uur. Dit gemiddelde lek (of: deze emissiefactor) vervangt daarmee de eerder gebruikte emissiefactoren van 25,7 liter per uur voor stations op lagedruk en 105,6 liter per uur voor stations op middendruk op die worden aangehaald in het omvangrijke onderzoek *Methane Emission Estimation Method for the Gas Distribution Grid* (MEEM [11]). De originele bron van deze waarden is een onderzoek van Ruhrgas AG uit 2000 en is op basis van het geringe aantal van vijf metingen.

Alle Nederlandse gasnetbeheerder zijn partner van de Oil & Gas Methane Partnership 2.0. Dit is een initiatief van UNEP (United Nations Environment Program) en heeft als doel om de accuraatheid en transparantie van het rapporteren van methaanemissies te vergroten in de olie en gasector. Binnen OGMP 2.0 wordt onderscheidt gemaakt uit drie bronnen van methaanemissies: fugitives (kleine, “normaal optredende” lekken), incidenten en emissies bij werkzaamheden. Incidenten hebben in de regel een groter lekdebiet dan “regulier optredende lekken”, maar worden in de regel gemeld en snel veilig gesteld. Bij de vaststelling van een maximale lekgrootte is het daarom van belang om vast te stellen of hierbij ook gekeken moet worden naar incidenten of uitsluitend naar lekgroottes die meer permanent kunnen optreden.

### 3.3 Gekozen lekopening

Zoals reeds in paragraaf 3.2 omschreven, zijn verschillende bronnen geraadpleegd om een eenduidig beeld te kunnen schetsen van lekkages. Voor reguliere lekkages (zogenaamde secundaire gevaarbronnen<sup>8</sup>) is bij hogere drukken dan 100 mbar te vinden dat een typische lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup> zouden moeten worden geselecteerd (IGEM/HSE). Een kleinere lekopening van bijvoorbeeld 0,025 mm<sup>2</sup> kan wellicht ook interessant zijn om te beschouwen met het oog op de inhoud van de Europese norm voor explosieve gas atmosferen. Een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> geeft bij een voordruk van 1 bar een lek grootte van 40 liter/ uur. Lek grootte metingen met hi flow samplers aan gasstations geven vergelijkbare waarden met een maximum van 18 liter/uur (Nederlandse metingen) en 31 liter/uur (Duitse metingen). Een lek grootte van 40 liter / uur is daarmee een realistische lek grootte.

In een gasdrukregelstation heerst een maximale druk van 8 barg waardoor bij een lekopening in de band breedte tussen 0,025 mm<sup>2</sup> en 0,25 mm<sup>2</sup> leidt tot lek debieten van 0,18 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h en 1,80 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h aardgas. In eerder onderzoek is gekeken naar de ratio die toegepast zou moeten worden tussen aardgas en waterstof [2] [13]. Afhankelijk van de druk, stroomopwaarts van de lekopening, is de stroming laminair of turbulent. Tevens speelt de geometrie van een lekopening hierbij een rol. Door de band genomen kan worden verondersteld dat in dit onderzoek een factor 3 tussen aardgas en waterstof een logische keuze is op basis van de resultaten uit de eerder aangehaalde onderzoeken.

Wanneer dit wordt gedaan voor bovenstaande lek debieten voor aardgas, volgt dat de lek debieten voor waterstof tussen de 0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h en 5,6 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h liggen.

Gasdrukregelstations worden in de regel toegepast als transitie tussen hoge druk en lage(re) druk. Hierbij worden aan de hogedrukzijde drukken toegepast van 1 tot 8 barg. Daarom is tevens gekeken naar dezelfde lek openingen bij inlaatdruk van 1 barg. Daarmee wordt de volgende set van “relevante lek openingen” gedefinieerd:

| Bron en toelichting  | Lek debiet<br>aardgas               | Equivalente lek grootte<br>waterstof bij dezelfde<br>lek openingen * |
|--|-------------------------------------|--|
| Voordruk 8 bar bij Lek opening 0,25 mm <sup>2</sup>  | 1,80 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h | 5,6 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h                                   |
| Voordruk 8 bar bij Lek opening 0,025 mm <sup>2</sup>   | 0,18 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h | 0,56 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h                                  |
| Voordruk 1 bar bij Lek opening 0,25 mm <sup>2</sup>  | 0,4 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h  | 1,25 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h                                  |
| Voordruk 1 bar bij Lek opening 0,025 mm <sup>2</sup>   | 0,04 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h | 0,125 m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h                                 |
| Voor aardgas tevens in lijn met onderzoek naar<br>lek groottes methaanemissies (maximaal 40 liter/uur) |                                     |  |

\*) afrondingen van getallen voorbehouden

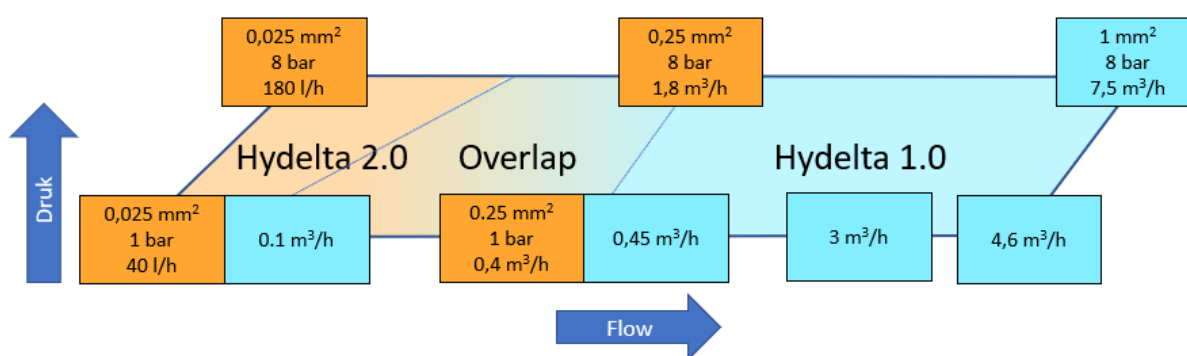
<sup>8</sup> een secundaire gevaarbron is een gevaarbron van waaruit het vrijkomen van een brandbare stof onder normaal bedrijf niet waarschijnlijk is, en indien dit wel gebeurt, niet frequent en slechts gedurende korte perioden” (zie par 5.5.2 van de NPR7910-1 (2021))



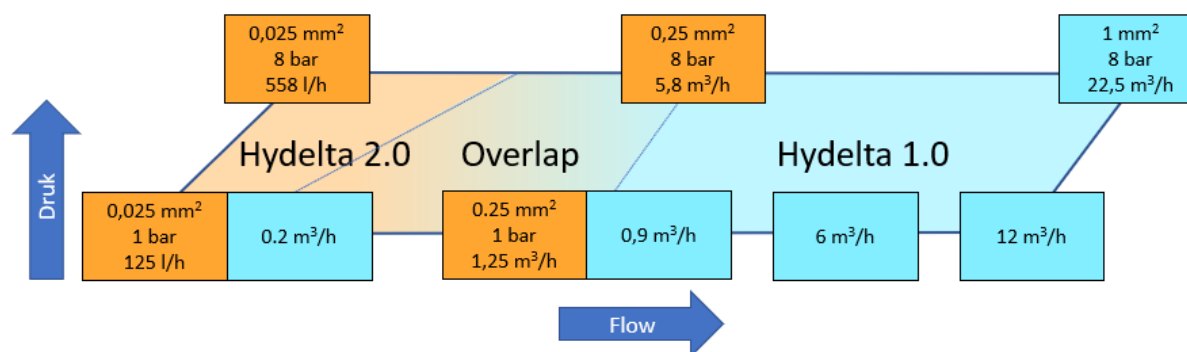
### 3.4 Lekopeningen en eerdere experimenten

Wanneer bovenstaande getallen worden vertaald naar een aandachtsgebied voor lekkages, kunnen zowel voor aardgas als voor waterstof overzichten gemaakt worden. Wanneer hierbij tevens de informatie uit HyDelta 1.0 wordt toegevoegd, ontstaat een goed beeld van alle testen. Hierbij valt op te merken dat gekozen lekdebieten uit HyDelta 1.0 deels een overlap hebben met lekkages uit HyDelta 2.0. Met het oog op de praktische haalbaarheid van het instellen van het lekdebiet met behulp van een MFC zijn afrondingen en significante cijfers in deze tabellen voorbehouden.

Wanneer de druk wordt uitgezet tegen het lekdebiet (flow), kunnen verschillende diagrammen opgesteld worden waarbij het “operating window” wordt gevisualiseerd. Op deze manier is voor zowel aardgas als waterstof duidelijk te zien welk operationele gebied wordt afgedekt voor de veronderstelde lekkages.



Figuur 17. Gekozen lekdebieten HyDelta 1.0 versus HyDelta 2.0 voor aardgas



Figuur 18. Gekozen lekdebieten HyDelta 1.0 versus HyDelta 2.0 voor waterstof

Op basis van de gepresenteerde gegevens uit de verschillende onderzoeken rondom het gebied van methaanemissie en het eerder genoemde DVGW onderzoek valt op te maken dat de gevonden lekkages in gasdrukregelstations bij benadering overeenkomen met de kleinste lekkage (0,025 mm²) bij de laagste voorgestelde druk (1 barg). Daarmee kan veilig worden gesteld dat een reguliere lekkage zoals die voorkomt bij normale bedrijfsomstandigheden is meegenomen in dit testprogramma.

Bovenstaande informatie is vertaald naar een testmatrix die wordt gebruikt voor dit onderzoek met daarin de twee lekopeningen van 0,25 en 0,025 mm<sup>2</sup>. Met twee drukken (1 bar en 8 bar) en aardgas/waterstof levert dit 2<sup>3</sup> (= 8) mogelijke combinaties op. Deze zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 5. Lekdebieten voor aardgas en waterstof. Lekdebiet 1 bij 8 bar voordruk, lekdebiet 2 bij 1 bar voordruk.

|  | Lekdebiet 1 -<br>0,25 mm <sup>2</sup> | Lekdebiet 2 -<br>0,25 mm <sup>2</sup> | Lekdebiet 1 -<br>0,025 mm <sup>2</sup> | Lekdebiet 2 -<br>0,025 mm <sup>2</sup> |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|
| <b>Aardgas (m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h) *</b>   | 1,8                                   | 0,40                                  | 0,18                                   | 0,04                                   |
| <b>Aardgas (g/s) *</b>                           | 0,42                                  | 0,09                                  | 0,04                                   | 0,01                                   |
| <b>Waterstof (m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h) *</b> | 5,6                                   | 1,25                                  | 0,56                                   | 0,125                                  |
| <b>Waterstof (g/s) *</b>                         | 0,14                                  | 0,03                                  | 0,014                                  | 0,003                                  |

\*) afrondingen van getallen en significante cijfers voorbehouden

### 3.5 Waarom ATEX?

Een behuizing moet voldoen aan normeringen die voorschrijven welke lekkages nog veilig kunnen worden gemitigeerd en welke ventilatie daarvoor minimaal vereist is. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen continue, primaire en secundaire gevaarbronnen hetgeen een beeld geeft met betrekking tot de oorsprong van een lekkage.

Vanuit de Europese richtlijn ATEX 153 zijn werkgevers wettelijk verplicht om een ATEX zonering aan te geven in gebieden waar explosieve stoffen aanwezig zijn. Het risico wordt vastgesteld op basis van een risico inventarisatie- en evaluatie. Hiermee wordt de link gelegd met de ATEX 114 richtlijn. De ATEX 114 goedgekeurde apparatuur is onderverdeeld in categorieën, die aangeeft in welke zones deze mag worden toegepast, zodat deze apparatuur een explosieve atmosfeer niet kan ontsteken.

Bij de distributie van waterstof is de insteek dat de veiligheid vergelijkbaar is met aardgas. Daarmee moet (de behuizing van) een gasstation voor waterstof ook minstens net zo veilig zijn als (de behuizing van) een gasstation voor aardgas. Om dit te bereiken moet worden zorggedragen dat het gebied dat vrij toegankelijk is voor het algemene publiek kan worden aangeduid als “Niet Gevaarlijk Gebied (NGG)”. Bij aardgas geldt dat binnen de behuizing van een gasstation sprake is van een ATEX zone 2 en dat direct buiten de behuizing het “Niet Gevaarlijk Gebied” begint. Om die reden wordt er normaal gesproken geen hekwerk geplaatst rondom een station voor de distributie van aardgas. Datzelfde zou moeten gelden voor stations met waterstof. Een behuizing (of: de behuizing inclusief een afgeschermd stuk grondoppervlakte) moet geclassificeerd kunnen worden als een ATEX zone 2. Dan is direct naast deze zone geen ATEX zonering noodzakelijk en mag dat gebied toegankelijk zijn voor het algemene publiek.

In de NEN:1059, 2019 wordt gesteld dat bij een ventilatievoud van meer dan 5 keer per uur, binnen de behuizing ATEX zone 2 van toepassing is. Dan is er buiten de behuizing geen zonering van toepassing. In het geval van een kleine lekkage zou voldoende ventilatie aanwezig moeten zijn om het ontsnapte gas goed weg te kunnen ventileren.

De basis van deze eis is reeds lang geleden opgesteld en gepresenteerd in een GAS artikel [3]. Hier is via een set van differentiaalvergelijkingen bepaald dat een onderlinge relatie tussen het volume van de behuizing, de ventilatievoud en het lekdebiet kan worden vastgesteld (zie appendix II).

De basis van bovenstaande normering ligt in het technisch dicht verklaren van de installatie volgens de volgens de NEN-EN 1127 Annex B (B.3 – “Enhanced tightness”) of de NPR-7910-1 (2021). Echter, omdat hele kleine lekkages niet meteen opgemerkt worden, is het raadzaam om het binnenste van de kast als ATEX zonering 2 in te delen waarbij de zone niet buiten de kast komt. Zo hoeft er buiten de behuizing niet gezoneerd te worden.

Uit onderzoek weten we van reguliere lekkages dat ze klein zijn en door de omgeving niet altijd opgemerkt worden. Een realistische lekopening voor een reguliere lekkage wordt echter in referenties niet expliciet benoemd. In paragraaf 3.2 wordt beschreven dat op basis van recent onderzoek is vastgesteld dat zo’n lekkage zelden tot nooit groter is dan 40 liter per uur [9]. Op basis van paragraaf 3.3 is richting gegeven aan de grootte van een dergelijke lekkage en deze kan dienen als startpunt voor het maken van een ATEX berekening en het vaststellen van de daarbij behorende ATEX zonering.

### 3.6 ATEX zone bepaling volgens NPR-7910-1

Deze Nederlandse praktijkrichtlijn geeft informatieve aanwijzingen bij het opstellen van een gevarenclassificatie met betrekking tot gasexplosiegevaar. Deze praktijkrichtlijn dient als praktisch hulpmiddel ter nadere uitvoering van NEN-EN-IEC60079-10-1 (2021) en behoort in samenhang met deze norm gelezen te worden.

Door een samenloop van omstandigheden kan een lekkage ontstaan in een gastechnische installatie. De lekkage kan heel klein zijn waardoor deze niet eens opgemerkt wordt. In de Nederlandse normering is hiervoor een stappenplan gemaakt die classificeert hoe hiermee om te gaan. Allereerst kan bij een zeer kleine lekkage (in combinatie met goede ventilatie) gekeken worden of een indeling als niet gevaarlijk gebied (NGG) mogelijk is. Als dit vanwege de uitstromende hoeveelheid gas in combinatie met de beschikbare ventilatie niet mogelijk is, moet een ATEX zonering worden toegepast.

In bijlage III wordt aan de hand van de NPR-7910 een bepaling gedaan van de ATEX zonering voor een gasdrukregelstation.

### 3.7 ATEX zone bepaling volgens de NEN-EN-IEC60079-10-1

Zoals eerder benoemd is de NPR-7910-1 (2021) een praktisch hulpmiddel voor het gebruik van de NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) (Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - explosive gas atmospheres) die in detail beschrijft welke specifieke berekeningen gemaakt kunnen worden bij het uitvoeren van een analyse inzake explosieveiligheid. Hierbij worden berekeningen gepresenteerd die, waar mogelijk, gecombineerd worden met praktische ervaring (of meetwaarden) als deze beschikbaar is.

In appendix C en D van deze internationale standaard staat in stappen beschreven hoe een dergelijke analyse moet worden uitgevoerd. Een typische analyse bestaat uit de volgende stappen;

- ✓ Bepaal het type van de lekbron (continue/ primair/ secundair).
- ✓ Bepaal het lekdebiet van de lekbron.
- ✓ Bepaal de mate van verdunning aan de hand van lekdebiet en ventilatie.
- ✓ Bepaal de bijbehorende ATEX zonering aan de hand van de mate van verdunning, de beschikbaarheid van ventilatie (betrouwbaarheid) en het type van de lekbron.

Toch heeft deze werkwijze ook limiteringen, zeker voor de situatie die beschouwd wordt in dit rapport. Het gaat in dit onderzoek om zeer kleine lekkages vanuit secundaire gevaarbronnen waardoor de gebruikte grafieken voor het bepalen van de mate van verdunning en het bepalen van de "circle of influence" geëxtrapoleerd moeten worden.

In bijlage III wordt aan de hand van de NEN-EN-IEC60079 een bepaling gedaan van de ATEX zonering voor een gasdrukregelstation.

### 3.8 Deelconclusie toegestane lekopening en relatie tot normen

In hoofdstuk 1 is de volgende deelvraag gesteld:

Deelvraag 2: Aan welke voorwaarden moet een behuizing van een gasstation voldoen voordat deze geschikt is voor de distributie van waterstof?

De distributie van waterstof moet minstens net zo veilig zijn als de distributie van aardgas. Daarmee moet (de behuizing van) een gasstation voor waterstof ook minstens net zo veilig zijn als (de behuizing van) een gasstation voor aardgas. Uiteindelijk moet aan deze voorwaarde worden voldaan. Om dat te bereiken, moet aangetoond kunnen worden dat de behuizing (of: de behuizing inclusief een afgeschermd stuk grondoppervlakte) geclassificeerd kan worden als een ATEX zone 2. Alleen dan is direct naast deze zone geen ATEX zonering noodzakelijk en mag dat gebied toegankelijk zijn voor het algemene publiek.

Om een gebied te mogen classificeren als ATEX zone 2, moet aangetoond kunnen worden dat sprake is van een secundaire gevaarbron en dat er voldoende ventilatie aanwezig is.

Een secundaire gevaarbron betekent dat er in minder dan 0,1% van de tijd sprake mag zijn van een ontbrandbaar mengsel. Om dat aan te kunnen tonen, is kennis nodig van de in de praktijk optredende lekken. Er mogen lekken voor komen in gasstations die leiden tot een concentratie boven de 100% LEL, zolang deze maar zelden ( $< 0,1\%$  van de tijd) voor komen. Door een gedegen onderhoudsregime moet door de eigenaar immers zorg worden gedragen voor een technisch dichte installatie. De NPR7910-1 stelt: “In het geval van een kleine lekkage zou voldoende ventilatie aanwezig moeten zijn om het ontsnapte gas goed weg te kunnen ventileren”. Een praktische interpretatie hiervan is dat de concentratie onder de LEL/LFL moet blijven. Tevens dient opgemerkt te worden dat wanneer aan de hand van de NPR 7910-1 een analyse wordt gedaan voor een behuizing, hierbij enkel een eis wordt neergelegd waaraan de behuizing zou moeten voldoen. Daarmee doet de NPR7910-1 geen uitspraak of de gebouwde geometrie van een behuizing daadwerkelijk geschikt is om adequaat te kunnen ventileren.

De geldende normen geven diverse aanknopingspunten voor een definitie van het begrip “kleine lekkage”. De NEN 1059: 2019 noemt een lekopening van  $1 \text{ mm}^2$ . De IGEM/SR/25 noemt een lekopening van  $0,25 \text{ mm}^2$  ( $P > 100 \text{ mbar}$ ) en  $0,025 \text{ mm}^2$  ( $P < 100 \text{ mbar}$ ). De NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) noemt een lekopening in de range van  $0,025 \text{ mm}^2$  t/m  $0,25 \text{ mm}^2$ . Op het moment dat berekeningen worden uitgevoerd aan lekken van deze omvang, wordt duidelijk dat ATEX zone 2 niet in alle gevallen gehaald wordt, zoals blijkt uit paragraaf 3.7 en appendix III/IV.

Er zit echt een verschil tussen de lekgroottes zoals die in normen worden genoemd en de lekgroottes die daadwerkelijk in praktijk zijn gemeten. Praktijkmetingen tonen aan dat bij de ventilatieopening van districtstations geen gasconcentraties boven 25% LEL/LFL voorkomen. Uit deze metingen blijkt ook dat lekkages groter dan 40 l/u niet zijn waargenomen bij gasstations op aardgas. Wanneer dit debiet (aan de veilige kant) wordt omgerekend naar waterstof, is een reëel maximumwaarde voor een lekdebiet 125 l/u waterstof.

Om zo veel mogelijk inzicht te verkrijgen zijn experimenten uitgevoerd bij zowel lekgroottes zoals die in de normen zijn aangedragen als lekgroottes zoals die in de praktijk optreden. Deze staan samengevat in tabel 5 van paragraaf 3.4.

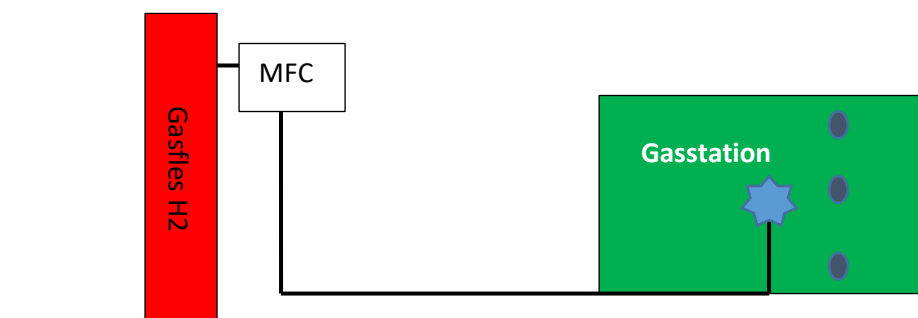
## 4. Plan van aanpak

### 4.1 Testmethode op hoofdlijnen

Zoals al eerder benoemd, kan dit onderzoek het beste gezien worden als een doorontwikkeling van HyDelta 1.0. Daarin wordt aanbevolen om de gevolgen van kleinere, meer in de praktijk voorkomende, lekken goed in kaart te brengen. Hiervoor is in de basis dezelfde testopstelling gebruikt, waardoor de beschrijving ook is overgenomen uit de rapportage van HyDelta 1.0.

De testopstelling bestaat uit:

- Gasflessen met waterstof, aardgas en stikstof
- Een gasdrukregelaar en een mass flow controller (MFC).
- Een standaard kast ( $1/2\text{m}^3$ ) met alleen bovenventilatie ( $\sim 2\%$ ), geleverd door Enexis.
- Een standaard kaststation ( $4\text{m}^3$ ) met alleen bovenventilatie ( $\sim 4\%$ ), geleverd door Enexis.
- Een standaard Hogedrukafleverstation (HAS) ( $< 0,1\text{m}^3$ ) met alleen bovenventilatie ( $\sim 4\%$ ), geleverd door Enexis.
- Een leiding zodat een lek met een uitstroomopening van respectievelijk  $0,25$  en  $0,025\text{mm}^2$  in de behuizing wordt aangebracht. Het lek wordt gepositioneerd in het midden van de kast. De uitstroomopening heeft tevens de mogelijkheid tot het aansluiten van een naaldafsluiter.

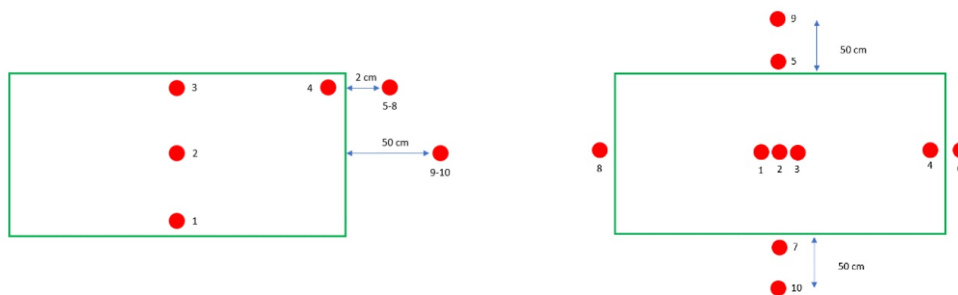


Figuur 19. Schematische weergave testopstelling

### 4.2 Meetpunten en meetapparatuur

De aardgas of waterstof concentratie wordt op de volgende punten gemeten:

- In de kast op 4 punten (onder, midden en 2x boven). Het meetpunt “midden” (2), zit 10 cm verwijderd van de uitstroomopening. De meetpunten “onder” (1) en “boven” (3) zitten recht onder en boven het meetpunt “midden”, op 5 cm afstand van maaiveld dan wel de bovenkant van de kast (voor de  $1/2\text{m}^3$  kast). Het meetpunt “boven” (4) zit in het kaststation ter hoogte van de daklijn, hetgeen niet het hoogste punt betreft. Voor andere geteste behuizingen, is eenzelfde werkwijze gehanteerd. Schematisch ziet de opstelling van de meetpunten er als volgt uit;



Figuur 20. Setup van de meetpunten in de testopstelling ( $1/2\text{m}^3$  kast), zijaanzicht (links) en bovenaanzicht (rechts)



- Direct buiten de kast op 4 punten (punten 5, 6, 7 en 8), alle zijden op 2 cm afstand van de ventilatieopeningen in het midden. Hiervoor worden de Riken Keiki sensoren gebruikt, 0 – 100 vol% waterstof. Bij de experimenten met aardgas worden de MultiRae sensoren gebruikt. (0-100% LEL/LFL en 0-100vol%).
- Tevens zal de aardgas of waterstof concentratie op 0,5 meter van de behuizing gemeten worden (punten 9 en 10). De sensoren (allen MultiRae's) zijn op 1 meter boven grondniveau geplaatst. Deze meters bevatten zowel een ppm-sensor als een LEL/LFL-sensor voor waterstof.

#### 4.3 Wind en ventilatie

De wind kan een grote invloed hebben op de experimenten. Tijdens HyDelta 1.0 zijn daarom twee situaties gecreëerd, namelijk een binnensituatie (windstille situatie) en een buitensituatie. Om een windstille situatie te simuleren, wordt het kaststation in een grote tent geplaatst. Daarnaast worden dezelfde serie metingen uitgevoerd op een dag die, naar verwachting, een constante windkracht (van windkracht 2 of 4) heeft om zo de invloed ten gevolge van natuurlijke trek te beperken.

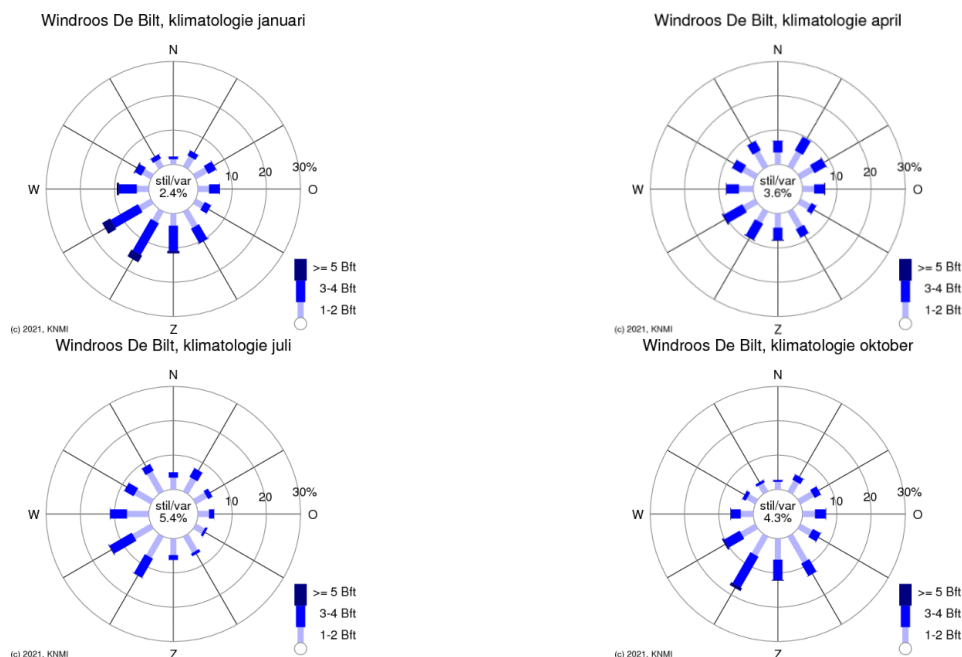
Tijdens HyDelta 2.0 is gekozen om alle experimenten zoveel mogelijk uit te voeren in een windluwe situatie waarbij een grote tent is gebruikt. Wanneer door de grootte van de behuizing plaatsing in een tent niet mogelijk was, is met behulp van blinderende dranghekken een windluwe situatie gecreëerd. Ter controle of er daadwerkelijke sprake was van een windluwe (dus niet per definitie: windstille) situatie, is tijdens de metingen gebruik gemaakt van een indicatieve windmeter. Dit betreft een anemometer van merk en Type Skywatch OELE, met een minimaal meetbereik van 0,6 m/s.

In de NEN1059:2019 is een ventilatievoud van 5 of groter gesteld voor behuizingen van gasdrukregelstations. Echter is de ventilatievoud afhankelijk van de windsnelheid. In de NPR7910-1 (2021) en in de NEN-EN-60079-10-1 (2021) worden windsnelheden gesteld voor het berekenen van ventilatie. In de NPR7910-1 (2021) wordt gesteld dat de luchtverversing waarbij zonder mechanische hulpmiddelen de luchtsnelheid meestal hoger is dan 2 m/s en zelden lager dan 0,5 m/s. Tevens staat in de NPR7910-1 (2021) beschreven dat voor het berekenen van de ventilatieopeningen een windsnelheid van 0,5 m/s als richtlijn kan worden aangenomen.

In de NEN-EN-60079-10-1 (2021) is een tabel opgenomen waarin windsnelheden voor verschillende situaties benoemd zijn. Ook deze waarden kunnen gebruikt worden voor een analyse van de ventilatievoud en komen overeen met de NPR7910-1 (2021).

Behuizingen voor gasdrukregelstations staan overal in Nederland. Het KNMI heeft richtlijnen opgesteld voor de gemiddelde windsnelheid. Aan de hand van langjarige gemiddelden (1991-2020) kan inzichtelijk gemaakt worden hoe de wind gedurende de maanden van het jaar varieert. Deze metingen zijn echter genormaliseerd voor een hoogte van 10 meter boven het maaiveld om te corrigeren voor globale terreinruwheid. De bruikbaarheid van deze gegevens voor de hoogte van de ventilatie van een gasstation (0,5 meter tot 2 meter boven maaiveld) is zeer beperkt. Voor deze hoogte zijn helaas geen betrouwbare datasets beschikbaar.

Aan de hand van windrozen valt op te maken dat windkracht 1 tot 5 regelmatig voorkomt. Als voorbeeld zijn voor weerstation “de Bilt” een aantal windrozen toegevoegd.



Figuur 21. Windrozen gedurende de seizoenen in de bilt op basis van langjarig gemiddelden

Tijdens alle experimenten is de windsnelheid bij de behuizing gemeten om te verifiëren. In de basis is geprobeerd om alle metingen uit te voeren op windluwe dagen. Wanneer het vermoeden bestaat dat de experimenten zijn beïnvloed door de wind, is dit benoemd in de rapportage.

#### 4.4 Foto's van de opstellingen

De stations zijn dus zowel in een buitensituatie als in een binnen-/ windluwe situatie getest. Stations staan in de praktijk altijd buiten. Echter, het is de verwachting dat natuurlijke ventilatie op windstille en/of windluwe momenten minder goed zal functioneren dan wanneer er sprake is van natuurlijk ventilatie door wind. Om windstille en/of windluwe situaties na te bootsen, is zowel de 1/2m<sup>3</sup> kast als het 4m<sup>3</sup> kaststation in een tent geplaatst.



Figuur 22. De 1/2 m<sup>3</sup> kast in een windluwe situatie



Figuur 23. Het 4m<sup>3</sup> kaststation in een windluwe situatie

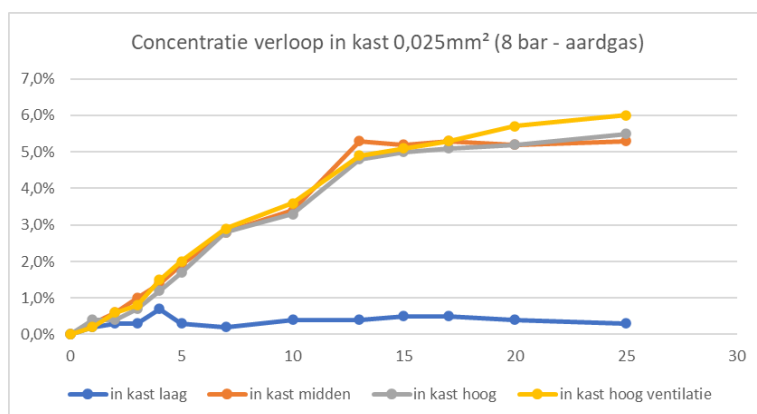
Vanuit een gasfles is respectievelijk aardgas (L-gas) en waterstof met een mass flow controller (MFC) gecontroleerd toegevoegd in de behuizing. Dit gas stroomt uit in het midden van de kast vanuit een lekopening met een oppervlakte van respectievelijk 0,25 en 0,025 mm<sup>2</sup>. In de kast zijn meetpunten aangebracht, één op 5 cm van de bodem, één in het midden, één op 5 cm van de daklijn en één in de nabijheid van een ventilatieopening. Daarnaast zijn op alle vier de zijden van de kast sensoren geplaatst die buiten de kast vlak onder de ventilatieopening meten. Tenslotte zijn sensoren geplaatst die op 0,5 meter afstand meten. Deze sensoren zijn op 1 meter boven de grond opgehangen zoals te zien op bovenstaande foto's. Op die manier wordt het verspreidingsgedrag van het gaslek in kaart gebracht. Additionele informatie over de testopstelling kan gevonden worden in appendix IV.

## 5. Bespreking resultaten van bestaande behuizingen

In de twee onderstaande paragrafen wordt één meting voor aardgas en één meting voor waterstof gepresenteerd. Beide testen zijn uitgevoerd in de 1/2 m<sup>3</sup> kast bij de hoogste voordruk in een windluwe situatie (met de kleinste lekopening). Deze paragrafen dienen als voorbeeld hoe alle resultaten uit tabel 5 verwerkt zijn. Deze resultaten zijn toegevoegd in bijlage VII tot en met X van dit rapport.

### 5.1 Lekdebiet 0,18 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr - aardgas

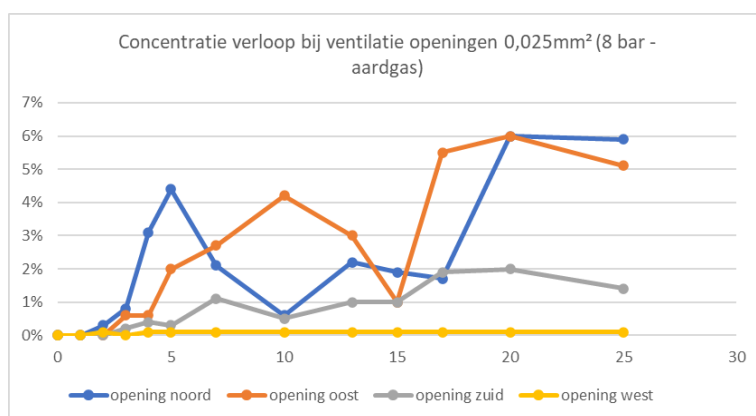
Bij de eerste test is de kleinste lekopening conform de IGEM/SR/25 Edition 2 gecreëerd bij een voordruk van 8 bar in de ½ m<sup>3</sup> behuizing waarbij de concentratie oploopt tot maximaal 6,0 vol%. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 24. Concentratie (vol% aardgas) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lek van 0,025 mm<sup>2</sup> bij 8 bar

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatieopeningen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 6,0vol% | 6,0vol% | 2,0vol% | 0,1vol% |



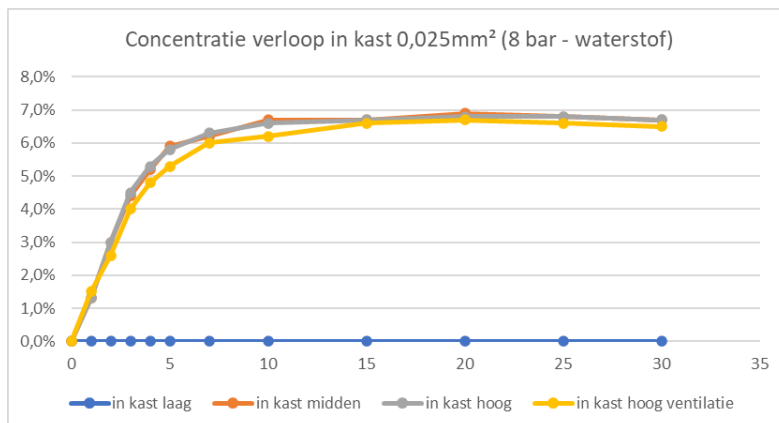
Figuur 25. Concentratie bij de ventilatie openingen (vol% aardgas) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lek van 0,025 mm<sup>2</sup> bij 8 bar

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met sensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd incidenteel 100 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werden geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

## 5.2 Lekdebiet 0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr - waterstof

Wanneer met dezelfde voordruk het gedefinieerde lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 6,9 vol% in de behuizing.

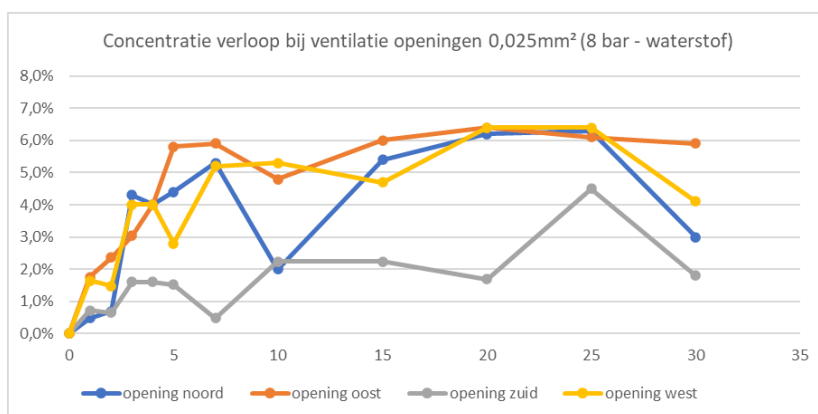
De concentratie op alle meetpunten in de behuizing stabiliseert na ongeveer 10 minuten en blijft daarna nagenoeg gelijk tijdens de hele test. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 26. Concentratie (vol % waterstof) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lek van 0,025 mm<sup>2</sup> bij 8 bar

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie waterstof | 6,3vol% | 6,4vol% | 4,5vol% | 6,4vol% |



Figuur 27. Concentratie bij de ventilatieopening (vol% waterstof) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lek van 0,025mm<sup>2</sup> bij 8 bar

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werden waarden tot 580 ppm bereikt aan de westzijde van de behuizing. Op een afstand van 0,5 meter werden geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

### 5.3 Samenvatting resultaten

De resultaten van het testprogramma voor de verschillende behuizingen (de 1/2m<sup>3</sup> kast, het 4m<sup>3</sup> kaststation en de HAS kast) zijn verzameld in bijlage VII tot en met X. De belangrijkste gegevens van al deze testen zijn kort samengevat in onderstaande tabellen. De waarden in rood geven aan wanneer de maximale concentratiemeting binnen de brandbaarheidsgrenzen van het gas-luchtmengsel valt. Wanneer een veld in onderstaande tabellen niet is ingevuld, betekent dit dat er geen waarde is gemeten.

#### 1/2m<sup>3</sup> kast

Tabel 2 – 1/2m<sup>3</sup> kast resultaten – windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas ≥ 5 vol% en LEL/LFL waterstof ≥ 4 vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |             | 1/2m <sup>3</sup> kast             |  |       |      |       |          |       |  |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|-------|------|-------|----------|-------|--|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |       |      |       |          |       |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |      |       | op 0,5 m |       |  |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z    | W     | %LFL     | ppm   |  |
| 0,179                            | 8           | 6,0%                               | 6,0%                                       | 6,0%  | 2,0% | 0,1%  | -        | 100   |  |
| 0,04                             | 1           | 1,0%                               | 1,0%                                       | 0,5%  | 0,1% | 0,4%  | -        | -     |  |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |       |      |       |          |       |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |      |       | op 0,5 m |       |  |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z    | W     | %LFL     | ppm   |  |
| 1,8 *                            | 8           | 26,6%                              | 21,5%                                      | 25,1% | 2,7% | 23,1% | 7,0%     | >1000 |  |
| 0,4                              | 1           | 11,9%                              | 11,3%                                      | 11,6% | 4,0% | 10,8% | -        | -     |  |

| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |             | 1/2m <sup>3</sup> kast             |  |       |       |       |          |       |  |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|-------|-------|-------|----------|-------|--|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |       |       |       |          |       |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |  |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |  |
| 0,558                            | 8           | 6,9%                               | 6,3%                                       | 6,4%  | 4,5%  | 6,4%  | -        | 580   |  |
| 0,125                            | 1           | 2,7%                               | 2,9%                                       | 2,6%  | 1,4%  | 3,2%  | -        | 260   |  |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |       |       |       |          |       |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |  |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |  |
| 5,8                              | 8           | 24,0%                              | 20,0%                                      | 20,0% | 18,0% | 21,0% | 18,0%    | >1000 |  |
| 1,25                             | 1           | 11,0%                              | 10,0%                                      | 11,0% | 6,5%  | 11,0% | -        | 580   |  |

\*) lekkage levert aardgas concentraties op boven de UEL/ UFL maar omdat altijd ergens een overgang in concentratie zal zijn die binnen de brandbaarheidsgrenzen van het gas valt, zijn deze waarden rood weergegeven.



## 4m<sup>3</sup> kaststation

Tabel 3 – 4m<sup>3</sup> kaststation resultaten – windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas  $\geq 5$  vol% en LEL/LFL waterstof  $\geq 4$  vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |             | 4m <sup>3</sup> kaststation        |  |      |      |      |          |     |  |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|------|------|------|----------|-----|--|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |      |      |      |          |     |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |  |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |  |
| 0,179                            | 8           | 0,8%                               | 0,2%                                       | 0,7% | 0,4% | 0,4% | -        | -   |  |
| 0,04                             | 1           | 0,1%                               | 0,0%                                       | 0,0% | 0,0% | 0,1% | -        | -   |  |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |      |      |      |          |     |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |  |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |  |
| 1,8                              | 8           | 4,3%                               | 2,6%                                       | 1,0% | 3,7% | 3,7% | -        | -   |  |
| 0,4                              | 1           | 1,1%                               | 0,9%                                       | 0,3% | 0,5% | 1,8% | -        | -   |  |

| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |             | 4m <sup>3</sup> kaststation        |  |      |      |      |          |     |  |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|------|------|------|----------|-----|--|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |      |      |      |          |     |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |  |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |  |
| 0,558                            | 8           | 2,2%                               | 0,9%                                       | 1,6% | 1,1% | 1,3% | -        | 70  |  |
| 0,125                            | 1           | 1,0%                               | 0,3%                                       | 0,4% | 0,4% | 0,4% | -        | 10  |  |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |      |      |      |          |     |  |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |  |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |  |
| 5,8                              | 8           | 12,0%                              | 9,1%                                       | 4,0% | 9,3% | 6,0% | -        | 570 |  |
| 1,25                             | 1           | 5,5%                               | 4,1%                                       | 4,0% | 3,6% | 4,1% | -        | 120 |  |

## HAS kast

De inhoud van de HAS kast bedraagt circa 0,06 m<sup>3</sup>.

Tabel 4 – HAS kast resultaten – windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas  $\geq 5$  vol% en LEL/LFL waterstof  $\geq 4$  vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |      | HAS kast                   |                                    |        |          |     |
|----------------------------------|------|----------------------------|------------------------------------|--------|----------|-----|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |      |                            |                                    |        |          |     |
| Lekdebiet                        | Druk | Max concentratie behuizing | Max concentratie ventilatieopening |        | op 0,5 m |     |
| nm <sup>3</sup> /hr              | bar  | vol%                       | vol%                               |        |          |     |
|                                  |      |                            | Links                              | Rechts | %LFL     | ppm |
| 0,179                            | 8    | 10,3%                      | 9,1%                               | 7,9%   | 0,0%     | 0   |
| 0,04                             | 1    | 3,3%                       | 3,9%                               | 2,7%   | 0,0%     | 0   |

| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |      | HAS kast                   |                                    |        |          |     |
|----------------------------------|------|----------------------------|------------------------------------|--------|----------|-----|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |      |                            |                                    |        |          |     |
| Lekdebiet                        | Druk | Max concentratie behuizing | Max concentratie ventilatieopening |        | op 0,5 m |     |
| nm <sup>3</sup> /hr              | bar  | vol%                       | vol%                               |        |          |     |
|                                  |      |                            | Links                              | Rechts | %LFL     | ppm |
| 0,558 *                          | 8    | 12,0%                      | 12,0%                              | 12,0%  | 0,0%     | 410 |
| 0,125                            | 1    | 4,8%                       | 5,6%                               | 4,1%   | 0,0%     | 20  |

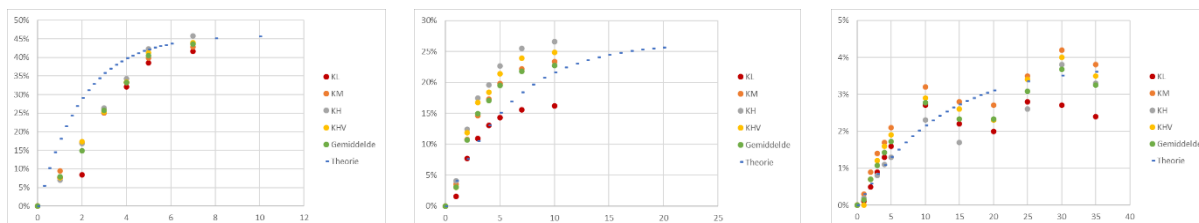
\* experiment voortijdig gestopt (ivm veiligheid) door snelle opbouw van waterstof concentratie.

#### 5.4 Daadwerkelijke ventilatievoud (afgeleid van meetwaarden)

In paragraaf 3.4 wordt beschreven dat de afleiding van de ventilatievoud tot stand is gekomen via een set van differentiaalvergelijkingen die een onderlinge relatie beschrijven tussen het volume van de behuizing, de ventilatievoud en het lekdebiet [3]. Het resultaat van deze berekening is de gasconcentratie die behaald kan worden in een behuizing met deze specifieke randvoorwaarden. Omdat de oorsprong van deze informatie erg belangrijk wordt geacht voor het beschouwen van het onderwerp ventilatie, is een deel van het artikel toegevoegd in appendix II. Hiermee is namelijk de ventilatievoud van meer dan 5 (zoals gebruikt in de NPR-7910-1 (2021)) vastgesteld.

Deze redenering kan ook worden omgedraaid. Aan de hand van het volume van de behuizing, het lekdebiet en de gestabiliseerde eindconcentratie van een experiment kan worden vastgesteld wat de ventilatievoud van een specifieke geometrie is.

In onderstaande grafieken is respectievelijk voor  $1 \text{ mm}^2$ ,  $0,25 \text{ mm}^2$  en voor  $0,025 \text{ mm}^2$  de gemeten concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten. Hierbij zijn de verschillende meetpunten kast laag (KL), kast midden (KM), kast hoog (KH) en kast hoog ventilatie (KHV) uitgezet. Daarnaast is met behulp van de theorie een curve berekend waarbij de gemiddelde gasconcentratie wordt berekend. De gemiddelde gasconcentratie van alle metingen (kast laag (KL), kast midden (KM), kast hoog (KH) en kast hoog ventilatie (KHV)) is tevens uitgezet.



Figuur 28. Aardgasconcentratie als functie van tijd ( $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast) bij een lek van  $1 \text{ mm}^2$ ,  $0,25 \text{ mm}^2$  en  $0,025 \text{ mm}^2$  bij 8 bar

Wanneer deze drie metingen worden beschouwd voor aardgas bij 8 bar (bij lekopeningen van respectievelijk  $1 \text{ mm}^2$ ,  $0,25 \text{ mm}^2$  en  $0,025 \text{ mm}^2$ ) in een  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  behuizing, dan kunnen we op basis van de metingen de volgende gegevens afleiden;

Tabel 5 – Lekopening, lekdebiet en maximale aardgasconcentratie

| Lekopening [ $\text{mm}^2$ ] | Lekdebiet ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | Maximale concentratie (vol%)* | Ventilatievoud [-] |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| <b>1</b>                     | 7,5                                 | 45,9                          | 25                 |
| <b>0,25</b>                  | 1,8                                 | 26,6                          | 14                 |
| <b>0,025</b>                 | 0,18                                | 6,0                           | 12                 |

\*) maximale aardgasconcentratie gemeten in de behuizing

De ventilatievoud is dus afhankelijk van het lekdebiet, de geometrie van de behuizing, het volume van de behuizing en de omstandigheden (wind/temperatuur) van de omgeving. Eenzelfde soort conclusie is vastgesteld aan de hand van eerdere literatuur [3]. Voor deze specifieke geometrie geldt dat de vastgestelde ventilatievoud altijd groter is dan de vereiste ventilatievoud van 5 (en dus op papier beschikt over voldoende capaciteit) waarmee kan worden gesteld dat op basis van de werkwijze in de NPR7910-1 (2021), tabel 7 een gevarenzone 2 van toepassing mag zijn.

Echter kan ook gesteld worden dat bij een ventilatievoud van meer dan 5 nog steeds een aanzienlijke gasconcentratie (van meer dan 25% LEL/LFL) kan ontstaan in de behuizing. Het stellen van de gewenste ventilatievoud is hiermee geen dekkend middel voor het garanderen van voldoende ventilatie bij deze specifieke behuizing.

## 6. Aanpassingen ventilatie bij $\frac{1}{2}$ m<sup>3</sup> kast (oriënterend onderzoek)

### 6.1 Aanleiding

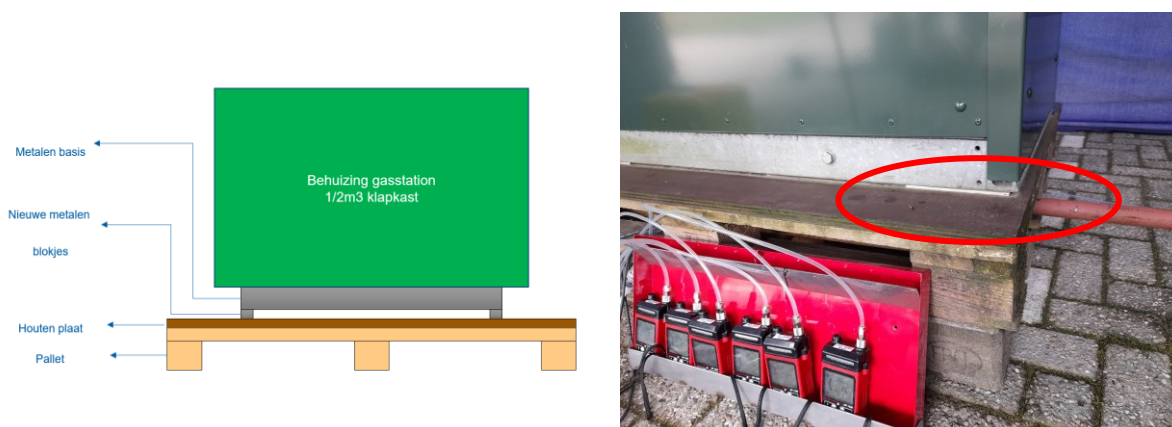
In de hoofdstuk 5 is zijn de resultaten besproken van testen met verschillende lekkage aan standaard behuizingen met onangepaste ventilatie. Voor de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> behuizing is enkel bovenventilatie toegepast. Hetzelfde geldt voor het 4 m<sup>3</sup> kaststation en de HAS kast.

In de NEN1059:2019 wordt in tabel 3 uiteen gezet wat de totale minimale vrije doorlaat van ventilatieopeningen en/of -kokers als percentage van de vloeroppervlakte moet zijn. Hierbij wordt aangegeven dat voor niet betreedbare kaststations en kasten zowel bovenventilatie als boven- en onderventilatie mag worden toegepast. Hierbij wordt het percentage van het vloeroppervlak gespecificeerd waarbij deze percentages verschillen per situatie. Zo is bijvoorbeeld gespecificeerd dat een kast minimaal 2% bovenventilatie moet hebben en dat in het geval van boven- en onderventilatie minimaal 1% per ventilatiepositie moet worden aangehouden. Andere onderzoeken [14] [15] hebben aangetoond dat gecombineerde boven- en onderventilatie kan leiden tot verbeterde ventilatiecondities en diensgevolge ook lagere gasconcentraties bij een lekkage.

Om meer inzicht te verkrijgen is onderzocht wat het effect is van het aanpassen van de ventilatie van de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast. Dat is gedaan in twee stappen. In eerste instantie is onderventilatie toegevoegd (2% van het vloeroppervlakte). Vervolgens is verder gegaan met het uitbouwen van de ventilatie voor zover dit mogelijk was binnen het ontwerpincipe van de behuizing.

### 6.2 Het effect van additionele onderventilatie

Deze kast heeft alleen “standaard” 2% bovenventilatie, zoals vereist in de NEN1059:2019. Vanuit de EAG was de wens om de behuizing minimaal te beschadigen bij het aanbrengen van extra ventilatie. Door de basis van deze kast op metalen strips te plaatsen, is de ventilatie aangepast van bovenventilatie naar boven- en onderventilatie. Hierbij is 2% onderventilatie toegevoegd waardoor kruisventilatie ontstaat. De kast heeft dan dus 2% bovenventilatie en 2% onderventilatie.

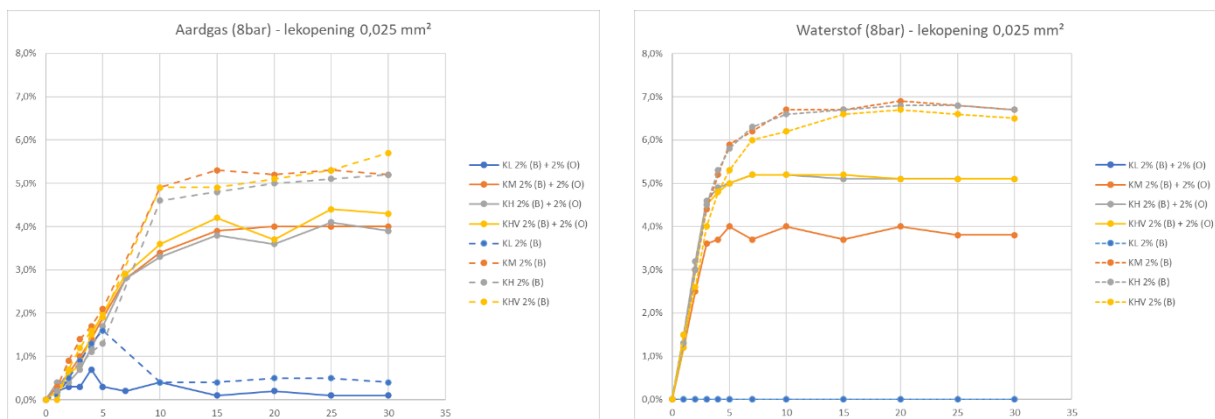


Figuur 29. Aangepaste ventilatie  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast ten behoeve van kruisventilatie met behulp van metalen strips

Achtereenvolgens zijn een aantal experimenten uitgevoerd met aardgas en waterstof met de kleinste lekkage bij 8 bar (0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h). In eerdere experimenten voor de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> behuizing is waargenomen dat de maximale aardgas- of waterstofconcentratie in de behuizing net boven de LEL/LFL komt. Er is onderzocht of de additionele ventilatie kan leiden tot lagere concentraties.

In de onderstaande linker grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten. Hetzelfde experiment is uitgevoerd met waterstof en weergegeven in de rechter grafiek.

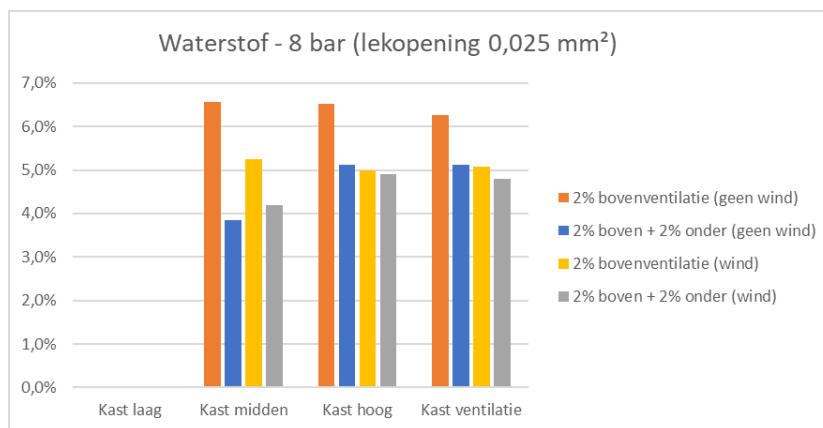
De gestreepte lijnen zijn de meetwaarden van de standaard kast, de vaste lijnen van de aangepaste behuizing met kruisventilatie. De kleuren van de lijnen en streeplijnen zijn gelijk en houden verband met de locatie van het meetpunt.



Figuur 30. Concentratie (vol % aardgas links en vol % waterstof rechts) in de ½ m³ kast bij een lek van 0,025 mm² bij 8 bar

In bovenstaande grafieken is te zien dat de gemeten gasconcentratie op de meetposities “midden”, “hoog” en “hoog-ventilatie” beduidend lager ligt voor de gecombineerde boven/ onderventilatie in vergelijking met alleen bovenventilatie. Dit geldt zowel voor aardgas als voor waterstof. Wat tevens opvalt, is dat aardgas met gecombineerde boven/ onderventilatie net onder LEL/LFL niveau stabiliseert voor deze lekcondities. Voor waterstof met kruisventilatie is wel een verbetering waar te nemen ten opzichte van de uitgangssituatie, echter zijn de concentraties waterstof op de meetposities op of net boven de LEL/LFL.

Tevens zijn voor waterstof lekkages additionele experimenten uitgevoerd met/ zonder wind bij een lekopening van 0,025 mm² en 8 bar om zo de effecten van aangepaste ventilatie en wind in beeld te kunnen brengen. Voor het overzichtelijk vergelijken van experimenten zijn de gemiddelde waarden van deze metingen weergegeven in staafdiagrammen. In de onderstaande grafiek is de gemiddelde concentratie waterstof (in vol%) weergegeven voor verschillende meetposities in de behuizing. De gemiddelde concentratie is bepaald in de tijdsspanne tussen 5 en 30 minuten.



Figuur 31. Concentratie (vol % waterstof) voor verschillende meetposities in de ½ m³ kast

De gemeten gemiddelde gasconcentratie ligt op de meetposities “midden”, “hoog” en “hoog-ventilatie” beduidend lager voor de kruisventilatie in vergelijking met alleen bovenventilatie (oranje versus blauw). Het effect van wind is duidelijk zichtbaar bij zowel bovenventilatie (oranje versus geel) maar minder duidelijk bij kruisventilatie (blauw versus grijs). De meeste gemeten gemiddelde waarden in de behuizing zijn boven of net op de brandbaarheidsgrens.

### 6.3 Het effect van extra boven- en/of onderventilatie

Omdat het effect van het toevoegen van 2% extra onderventilatie beperkt bleek te zijn, is verder gegaan met het vergroten van het ventilatieoppervlakte. Dat is gedaan op een wijze die paste binnen het ontwerpincipe van deze behuizing.

Door het toevoegen van additionele ringen aan de bovenzijde van de kast kan het dak verder gelift worden en kan de bovenventilatie vergroot worden. Aan de onderzijde kan met behulp van de metalen strip (zie Figuur 29) onderventilatie worden toegevoegd. De bovenventilatie varieert tussen de 2% en 6% van het vloeroppervlak. Verdere vergroting boven de 6% was niet mogelijk omdat dan de kier tussen de behuizing en de omlaagslaande rand ook vergroot zou moeten worden, en dat zou een aanpassing betekenen die indruist tegen het ontwerpincipe van deze kast. De bovenventilatie van de behuizing kan met zeer geringe inspanning worden vergroot tot 6%, een groter percentage zou extra inspanningen vereisen waarbij de kast bijvoorbeeld van extra roosters moet worden voorzien. De onderventilatie varieert tussen de 0% (dicht) en 2%.

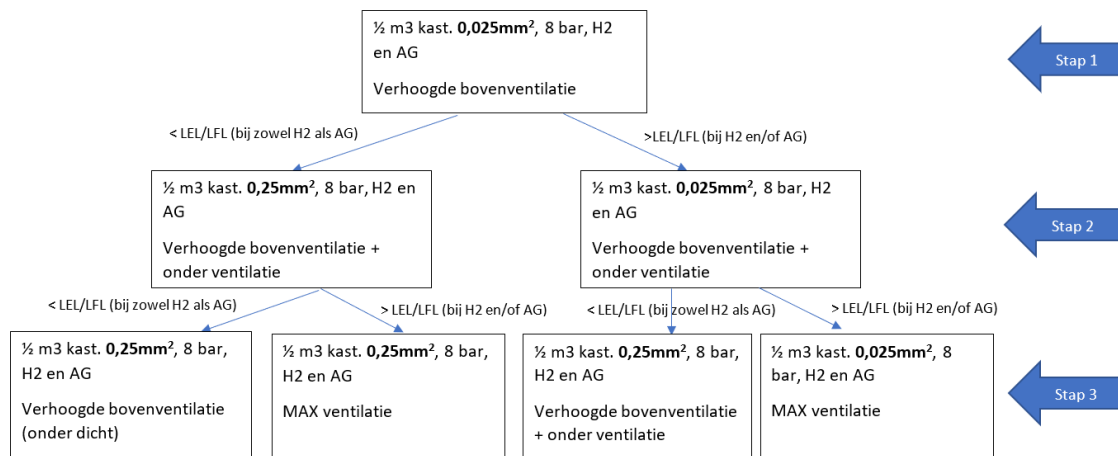


Figuur 32. Aanpassing van  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast met extra boven- en/of onderventilatie

In deze stap is achtereenvolgens een aantal experimenten uitgevoerd met aardgas en waterstof met de kleinste lekkage bij 8 bar (0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h) als uitgangspositie. In eerdere experimenten voor de 1/2m<sup>3</sup> behuizing is waargenomen dat de maximale aardgas- of waterstofconcentratie in de behuizing net boven de LEL/LFL komt.



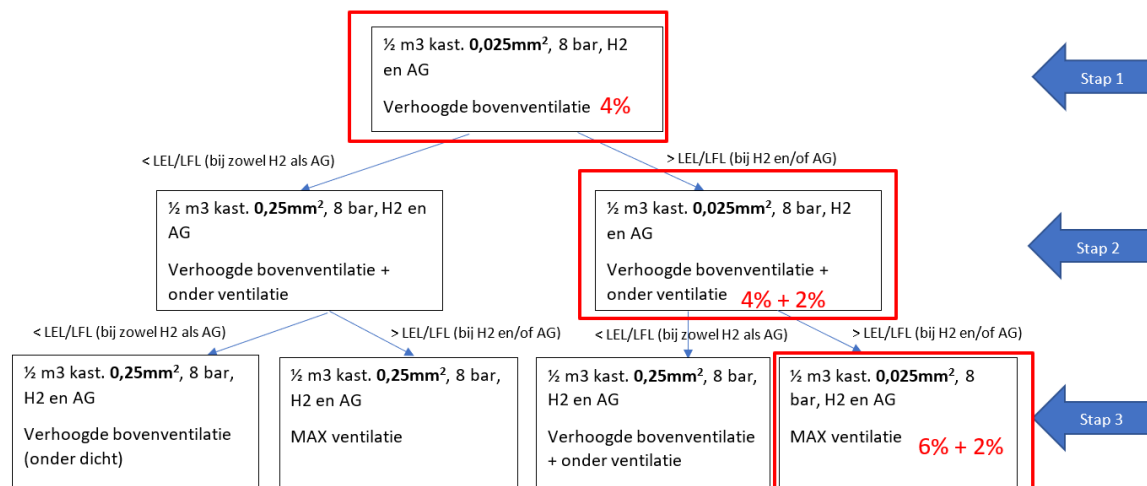
Deze aanpak is uitgewerkt in een dynamische testmatrix die besproken is met de “expert assessment group” voor de aanvang van de uitvoer van alle experimenten.



Figuur 33. Opzet van dynamische testmatrix.

Na het uitvoeren van de eerste set experimenten (stap 1, aangegeven met een blauwe pijl), wordt gekozen tussen het verder verbeteren van de ventilatie (wanneer de gemeten aardgas- of waterstofconcentraties boven de LEL/LFL uitkomen) en het vergroten van de lekopening (wanneer de gemeten aardgas- of waterstofconcentraties onder de LEL/LFL uitkomen).

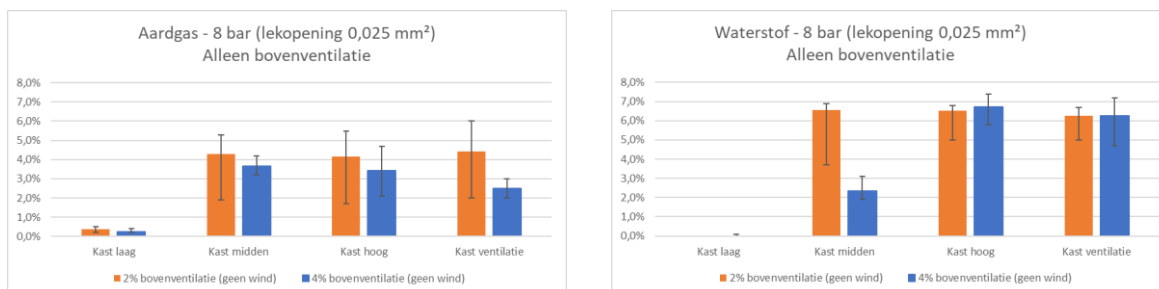
Achtereenvolgens wordt als vervolg een deel van de testmatrix uitgevoerd in stap 2 en stap 3 zoals aangegeven met rode kaders. Die geven aan welke route is gevolgd en er is tevens benoemd welk percentage ventilatie in elke stap is toegepast om het ventilatiegedrag maximaal te beïnvloeden.



Figuur 34. Stappen in de dynamische testmatrix.

De gekozen route geeft al wat details prijs met betrekking tot de resultaten van de experimenten die zijn uitgevoerd. Hierbij valt op dat de route voor het verbeteren van de ventilatie wordt gevolgd en niet het vergroten van de gekozen lekopening. Hieruit valt indirect op te maken dat verbetering van ventilatie onvoldoende is om de gemeten gasconcentratie in de behuizing (voor zowel aardgas als waterstof) adequaat te verlagen.

Stap 1; verhoogde bovenventilatie (4%) bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> en 8 bar. In vergelijking met de uitgangspositie (alleen 2% bovenventilatie) was het criterium gesteld dat de gemiddelde gemeten concentraties aardgas en waterstof onder de LEL/LFL zouden uitkomen.



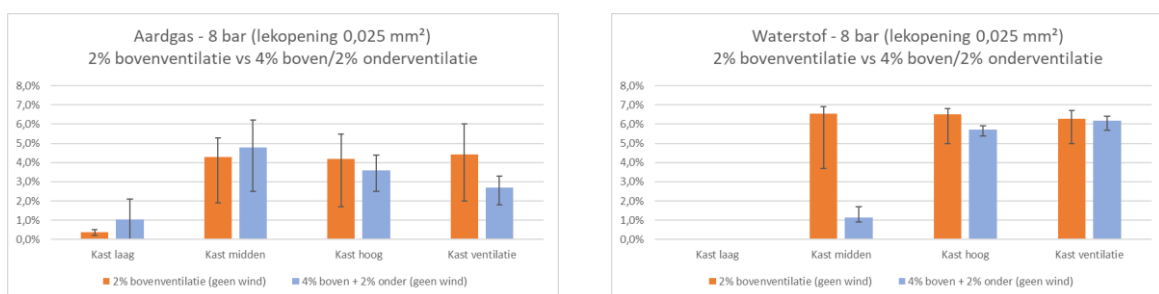
Figuur 35. Vergroten van de bovenventilatie van 2% naar 4% bij ½ m<sup>3</sup> kast

Wanneer de 1/2m<sup>3</sup> kast in ongewijzigde vorm (met alleen 2% bovenventilatie) wordt vergeleken met dezelfde kast en verbeterde bovenventilatie, valt op dat de gasconcentraties voor aardgas over de hele linie licht afnemen. Hier heeft het vergroten van de bovenventilatie een positief effect op de gasconcentratie in de behuizing. De gemiddeld gemeten waarden bevinden zich onder de LEL/LFL, de hoogst gemeten waarden bevinden zich boven de LEL/LFL.

Voor waterstof valt op dat de concentratie afneemt in het midden van de kast (kast midden) maar hoog in de behuizing nagenoeg gelijk blijft bij verbeterde bovenventilatie. De gemiddeld gemeten waarden en de hoogst gemeten waarden bevinden zich boven de LEL/LFL.

De foutenbalken zijn gebruikt om inzicht te geven in de spreiding van de metingen, waarbij deze balken in het staafdiagram de gemiddelde meetwaarde representeren.

Stap 2; onderventilatie (2%) en verhoogde bovenventilatie (4%) bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> en 8 bar. In vergelijking met de uitgangspositie (alleen 2% bovenventilatie) was het criterium gesteld dat de gemiddelde gemeten concentraties aardgas en waterstof onder de LEL/LFL zouden uitkomen. Wanneer dit niet het geval is, wordt overgaan tot het verder vergroten van de bovenventilatie.

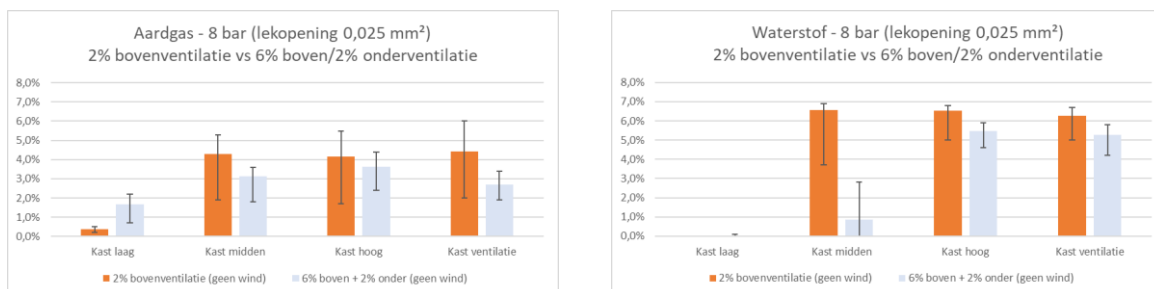


Figuur 36. Vergroten van de bovenventilatie van 2% naar 4% en toepassen kruisventilatie bij ½ m<sup>3</sup> kast

Wanneer de 1/2m<sup>3</sup> kast in ongewijzigde vorm (met alleen 2% bovenventilatie) wordt vergeleken met dezelfde kast en verbeterde boven- en onderventilatie, valt op dat de gasconcentraties voor aardgas over de hele linie licht afnemen. Hier heeft het verder vergroten van de bovenventilatie effect op de gasconcentratie in de behuizing, echter is de situatie ten opzichte van stap 1 niet significant.

Voor waterstof valt op dat de concentratie in het midden van de kast sterk afneemt maar hoog in de behuizing nagenoeg gelijk blijft bij verbeterde boven- en onderventilatie. Er vormt zich een deken van uniforme waterstof concentratie in de behuizing die niet weggeventileerd wordt. Zowel de gemiddeld gemeten waarden als de hoogst gemeten waarden bevinden zich boven de LEL/LFL.

Stap 3; onderventilatie (2%) en verhoogde bovenventilatie (6%) bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> en 8 bar. In vergelijking met de uitgangspositie (alleen 2% bovenventilatie) was het criterium gesteld dat de gemiddelde gemeten concentraties aardgas en waterstof onder de LEL/LFL zouden moeten uitkomen.

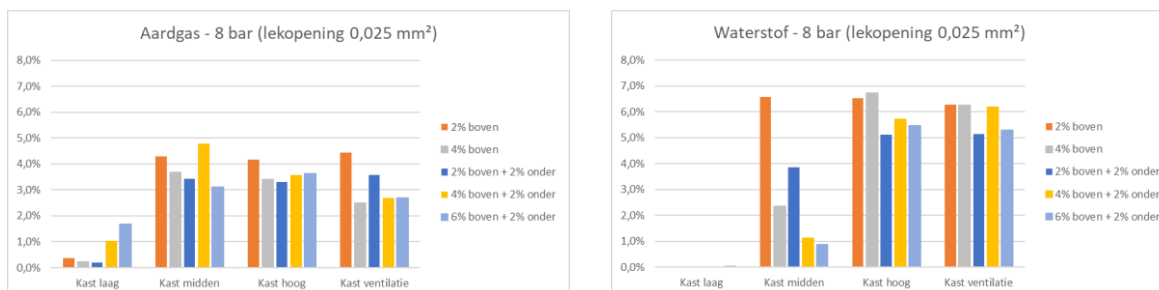


Figuur 37. Vergroten van de bovenventilatie van 2% naar 6% en toepassen kruisventilatie bij ½ m<sup>3</sup> kast

Wanneer de 1/2m<sup>3</sup> kast in ongewijzigde vorm (met alleen 2% bovenventilatie) wordt vergeleken met dezelfde kast en verbeterde boven- en onderventilatie, valt op dat de gasconcentraties voor aardgas over de hele linie licht afnemen. Hier heeft het verder vergroten van de bovenventilatie weinig effect op de gasconcentratie in de behuizing.

Voor waterstof valt op dat de concentratie in het midden van de kast sterk afneemt maar hoog in de behuizing nagenoeg gelijk blijft bij verbeterde boven- en onderventilatie. Ook hier vormt zich een deken van uniforme waterstof concentratie in de behuizing die niet weggeventileerd wordt. Zowel de gemiddeld gemeten waarden als de hoogst gemeten waarden bevinden zich net boven de LEL/LFL.

Om een overzichtelijk vergelijk te maken, zijn alle metingen opgenomen in één staafdiagram voor aardgas en één voor waterstof. Hierbij valt voor aardgas de verbetering op bij het toevoegen van bovenventilatie terwijl bij waterstof vooral de verschuiving van gasconcentratie (van midden naar hoog in de behuizing opvalt).



Figuur 38. De effecten van het aanpassen van de ventilatie bij een ½ m<sup>3</sup> kast

Resumerend valt voor deze specifieke behuizing op basis van bovenstaande stappen te concluderen dat;

- Het vergroten van de bovenventilatie leidt tot verlaging van de gemeten aardgas concentraties;
- Het vergroten van de bovenventilatie leidt tot verplaatsing van de gemeten waterstof concentraties. Hierbij wordt een deken van uniforme concentratie gevormd die onvoldoende weggeventileerd kan worden (alleen nog hoge concentratie op “kast hoog” en “kast ventilatie”);
- Het toevoegen van onderventilatie lijkt vooral een positief effect te hebben voor de gemeten waterstof concentraties. De dikte van de “deken” van uniforme concentratie neemt af.

## 6.4 Beschouwing en samenvatting resultaten aanpassingen extra ventilatie

In paragraaf 5.3 worden alle resultaten uit de testmatrix samengevat voor de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast, het 4 m<sup>3</sup> kaststation en de HAS kast. Alle gerapporteerde waarden zijn de maximaal gemeten concentraties aardgas of waterstof in en om de behuizing. Deze concentraties zijn uit de metingen gehaald die een looptijd hadden van 30 minuten tenzij de gemeten concentratie leidde tot een verhoogd risico met betrekking tot de brandbaarheidsgrenzen. In die specifieke gevallen is de meting korter geweest en wordt dit vermeld bij de beschrijving van de meting in de bijlage. Ook is de meting gestopt wanneer de gemeten concentratie niet meer noemenswaardig toenam.

Bij metingen aan de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> behuizing wordt bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup> (bij 8 bar) een gasconcentratie rond de onderste brandbaarheidsgrens gemeten. Dit geldt zowel voor aardgas als waterstof.

Aan de hand van dit specifieke experiment is tevens een vergelijking gemaakt tussen de werkwijze uit de NPR en de metingen. Hierbij is de mogelijkheid tot ventileren (geometrie specifiek) vergeleken met de experimenten (zie appendix IV). De berekening aan de hand van de NPR laat zien of, afhankelijk van de effectieve windsnelheid die de geometrie binnentreedt, voldoende is om de concentratie in de behuizing tot respectievelijk 25% LEL/LFL of 10% LEL/LFL te doen dalen.

Door het veronderstellen van een effectieve windsnelheid van 0,1 m/s (windstil) als intredende windsnelheid kan op basis van deze analyse geconcludeerd worden dat de berekening volgens de NPR redelijk goed overeenkomt met de resultaten uit de experimenten voor waterstof bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup>. In het geval van aardgas bij dezelfde lekopening oordeelt de NPR positiever in vergelijking met de experimenten. Bij het opstellen van de behuizing in een normale buitensituatie (niet windstil) zijn geen meetresultaten beschikbaar, echter kan wel een NPR berekening gedaan worden. Wanneer wordt verondersteld dat de effectieve windsnelheid 0,5 m/s bedraagt, is het oordeel van de NPR voor de ventilatie positief met uitzondering van de lekkage waterstof bij 8 bar.

Wat tevens opgemerkt dient te worden, is het vergelijking tussen de NPR methode en het bijbehorend experiment bij 40l/u aardgas. In een windstille situatie is de gemeten gasconcentratie in de behuizing kleiner dan 25% LEL/LFL, hetgeen bevestigd wordt door de NPR berekening. Voor het experiment met waterstof is de gemeten gasconcentratie in de behuizing groter dan 25% LEL/LFL, waarbij de NPR berekening net wel positief uitpakt en aantoont dat de behuizing zou voldoen.

Bij grotere lekopeningen (en lekdebieten) komen de experimenten en de NPR redelijk goed overeen. Hierbij tonen zowel de NPR methode als de experimenten aan dat het ventilatiegedrag niet kan voorkomen dat de gasconcentratie oploopt tot meer dan 25% LEL/LFL.

In paragraaf 6.2 en 6.3 is de rol van ventilatie verder onderzocht door het uitvoeren van metingen met de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast. Om hierbij de rol van externe factoren te minimaliseren, is ervoor gekozen om de staafdiagrammen te rapporteren met gemiddelde waarden. Deze waarden zijn een representatie van de instantane metingen over tijdsspanne tussen 4 minuten en 30 minuten (tenzij situatie als mogelijk risicovol werd geacht, dan is de tijdsduur van de meting ingekort). Vervolgens is in de staafdiagrammen gebruik gemaakt van foutbalken voor het inzichtelijk maken van de minimale en de maximale gemeten concentratie. De lengte van de foutenbalk geeft per meetpunt aan wat de bandbreedte van de gemeten concentraties tijdens het experiment. Met deze spreiding kan de lezer zien wat het effect is van de externe invloeden (zoals wind/ natuurlijke trek). Op deze manier kunnen metingen in één oogopslag met elkaar vergeleken worden.

Op basis van een oriënterende stap is inzichtelijk gemaakt dat het toevoegen van extra ventilatie kan leiden tot een verbetering. Door verschillende scenario's te vergelijken, is een lagere concentratie gemeten in de behuizing. Deze stap is gebruikt als opmaat naar een systematische aanpak van de analyse ter verbetering van de ventilatie met behulp van een dynamische testmatrix.

Door het vergroten van de ventilatiecapaciteit middels het toevoegen van boven- en/of onderventilatie is aannemelijk gemaakt dat een verbetering van ventilatie mogelijk is. Er vindt minder ophoping van gas plaats in de behuizing. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat sommige meetwaarden bij grotere lekkages de onderste brandbaarheidsgrens overschrijden.

Op basis van de waarnemingen lijkt de geometrie van het dak van invloed te zijn op de efficiëntie van ventilatie van deze  $1/2\text{m}^3$  kast. Dit is al eerder geconstateerd tijdens HyDelta 1.0 voor het  $4\text{m}^3$  kaststation waarbij de concentratie op de ventilatieopeningen tijdelijk gelijk of zelfs hoger is dan de metingen in de behuizing. Door toevoegen van het meetpunt "top kast" boven de uitgang van de ventilatie (in de dakpunt) is tijdens HyDelta 2.0 aan de hand van metingen inzichtelijk gemaakt dat vooral bij de grotere lekdebieten de gemeten gasconcentratie in de dakpunt hoger kan worden dan de gemeten concentratie bij de ventilatieopeningen. Dit duidt erop dat ophoping van gas in de dakpunt kan plaatsvinden. Door de gekozen dak geometrie (ten behoeve van hemelwaterafvoer) hebben deze behuizingen een hydraulische weerstand die door het ontsnappende gas overwonnen dient te worden. Door de lage dichtheid van waterstof is meer drijvende kracht nodig, hetgeen leidt tot een dikkere deken van uniforme gasconcentratie. Daarbij speelt het dichtheidsverschil tussen lucht en aardgas of lucht en waterstof tevens een belangrijke rol.

Voor het ontwerp van een behuizing die geschikt is voor waterstof ( $\text{H}_2$  ready ontwerp), valt onder andere te denken aan de volgende aandachtspunten met betrekking tot het ontwerp:

1. Het percentage ventilatie ten opzichte van het vloeroppervlak zou afhankelijk moeten zijn van de inhoud van de behuizing. Dit punt dient nader onderzocht te worden.
2. Het vergroten van het ventilatie oppervlak dient nader onderzocht te worden met als vertrekpunt de bevindingen uit deze rapportage en de huidige normering.
3. Het toepassen van kruisventilatie lijkt bij te dragen tot een verbeterde mogelijkheid tot ventilatie in vergelijking met alleen bovenventilatie. De praktische positionering van onderventilatie (in relatie tot plantgroei en sneeuw) dient hierbij in overweging genomen te worden.
4. De ventilatieopeningen dienen op enige afstand van de bovenzijde van de kast geplaatst te worden. Ook wordt in literatuur [3] gesteld dat de kwaliteit van ventilatie maximaal rendeert wanneer de ventilatie openingen 5-10% van de kasthoogte onder het dak worden aangebracht. Plaatst men de ventilatie openingen te hoog, dan strijkt de dwarswind teveel over het gasmengsel in de kast en dient men het oppervlak van de ventilatieopeningen met een factor 2 of 3 te vermenigvuldigen om hetzelfde effect te krijgen. Dit effect dient verder onderzocht te worden.
5. Bovenmaatse daken met als doel het voorkomen van inwateren dienen onderzocht te worden met het oog op hydraulische weerstand en ventileren. Een dergelijke constructie lijkt de ventilatiecapaciteit te limiteren.

Voor een dergelijke stap kunnen experimenten gebruikt worden als startpunt, waarbij CFD berekeningen kunnen worden gebruikt om meer inzicht te krijgen in het gedrag van gas tijdens een lekkage.

## 7. Modellering van gasverspreiding bij lekkages in gasstations

### 7.1 Inleiding

Waterstofgas is een gas dat ernstige risico's kan opleveren als het in een afgesloten ruimte wordt vrijgegeven. De mogelijke gevaren die gepaard gaan met de verspreiding van waterstofgas in afgesloten ruimten zijn onder meer brand en explosie. Het is belangrijk om het gedrag van waterstofgas in afgesloten ruimten te begrijpen om effectieve strategieën te ontwikkelen voor het verminderen van de risico's en het waarborgen van de veiligheid van mensen en apparatuur.

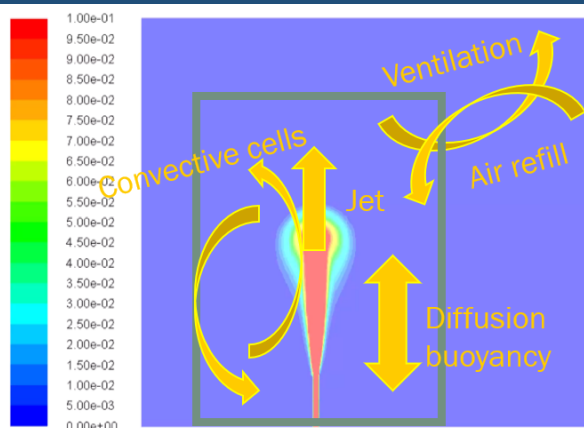
Het doel van de modelleringsactiviteiten is om te begrijpen welke factoren de verspreiding van waterstofgas in gasstations beïnvloeden, in termen van de concentratie en verdeling van waterstofgas in de kasten van het gasstation. Deze kennis kan worden gebruikt om de gasstations te ontwerpen en te bedienen op een manier die de risico's op waterstof gerelateerde incidenten minimaliseren en om de effectiviteit van verschillende risicoverminderingsstrategieën te evalueren.

Modellering kan worden uitgevoerd om het effect van gasstation behuizingen van verschillende maten en vormen te bestuderen. Factoren zoals de eigenschappen van het waterstofgas, de ventilatiesnelheid, de aanwezigheid van obstakels of menging in het gasstation en de initiële concentratie en verdeling van het gas kunnen worden meegenomen.

De stappen en factoren die uiteindelijk de waterstofconcentratieprofielen in een gasstation bepalen, zijn als volgt.

1. Lekdebiet: de hoeveelheid waterstof of aardgas die via een lekopening (in het defecte onderdeel) uit de leiding ontsnapt. Bij voldoende hoge bedrijfsdrukken, wat het geval is aan de stroom inlaatzijde van het gasstation (~8 barg), kunnen explosieve mengsels worden vastgesteld. Voor een bepaalde gas, zijn de enige parameters die de lekkagesnelheid bepalen, de druk en temperatuur in de leiding, de lekopening en een *discharge coëfficiënt* die zorgt voor correctie van de effectieve doorlaatbaarheid.
2. Verspreiding: de snelheid waarmee waterstof of aardgas zich in het gasstation verspreidt, wordt bepaald door verschillende fysische processen. Het eerste mechanisme is convectie, vanwege de hoofdbeweging van het gas door de uitstootstraal en de opwaartse kracht (dichtheidsverschillen) tussen het vrijgegeven gas en de lucht in het gasstation. Ten tweede drijft diffusie moleculen van een gebied met een hoge concentratie naar een gebied met een lage concentratie als gevolg van willekeurige moleculaire beweging. Een derde mechanisme is de ventilatie, die natuurlijk kan worden uitgevoerd door middel van openingen of gedwongen in geval van gebruik van een mechanisch apparaat. In een gasstation wordt alleen natuurlijke ventilatie toegepast. Deze mechanismen worden weergegeven in Figuur 39.





Figuur 39. Mechanismen die het transport van een gasvervuilende stof (in dit geval waterstof) binnen het gasstation (groene doos) aandrijven nadat er een lekkage heeft plaatsgevonden. Ventilatiespleten zijn beschikbaar aan de bovenkant van de kast.

## 7.2 Literatuurstudie

De literatuurstudie heeft zich gericht op de technieken die gebruikt worden bij het simuleren van de verspreiding van gassen in afgesloten ruimtes. Publicaties richten zich doorgaans op scenario's die plaatsvinden in huishoudelijke, mobiliteit of industriële omgevingen. Zoals vermeld in de vorige sectie kan het probleem van een waterstoflek in een gasstation meer algemeen worden beschreven als dat van een onontstoken gasuittoot in een afgesloten ruimte met passieve ventilatie. Omdat het gebruik van CFD-simulaties voor onderzoek naar ongevallen met waterstof momenteel veel aandacht krijgt, is de literatuurstudie die in dit rapport wordt samengevat beperkt tot publicaties waarvan het onderzoeksgebied veel overeenkomsten vertoont met het onderzoeksgebied van dit rapport.

Ref. [16] presenteert een blinde CFD-benchmark van waterstofuittoot en verspreiding in een afgesloten ruimte met passieve ventilatie. Dit is echter niet de eerste referentie die probeert CFD te benchmarken voor waterstofophoping in afgesloten ruimtes: het artikel herinnert aan twee andere vergelijkbare CFD-benchmarks die werden uitgevoerd met vergelijkbare doelstellingen, maar voor veel grotere afgesloten ruimtes. Het volume dat in ref. [16] wordt overwogen, is van dezelfde orde van grootte ( $\sim 1 \text{ m}^3$ ) als dat van het gasstation dat is geselecteerd voor CFD-simulaties ( $0,5 \text{ m}^3$ ). In de experimenten werd helium gebruikt in plaats van waterstof vanwege veiligheidsredenen en eigenschappen van het gas. In de experimenten werd ook het effect van windomstandigheden [17] onderzocht, hoewel de simulaties werden uitgevoerd onder omstandigheden zonder wind. Er werden verschillende openingen gebruikt. Drie verschillende partijen werden uitgenodigd om CFD-simulaties uit te voeren om de concentraties van de verontreinigende stof (helium) op verschillende posities in de afgesloten ruimte te bepalen. Elke partij gebruikte een andere CFD-solver en turbulentie model. Alle partijen ontwikkelden een model waarin de buitenomgeving wordt weergegeven door een voldoende groot volume. Als het gekozen volume te klein was, zouden er onnauwkeurigheden ontstaan in de berekend stromingsprofiel rond het ventilatieopening. In alle gevallen werd drijfvermogen impliciet vastgelegd door te berekenen voor de massaverhouding van helium over het hele model. De belangrijkste verschillen tussen de CFD-benaderingen waren het turbulentie model (URANS, LES), de numerieke discretisatiemethoden en het gebruik van grensvoorwaarden. Over het algemeen leverden alle CFD-formuleringen bevredigende resultaten op voor alle overwogen openingen. Er werd echter vastgesteld dat numerieke methoden, vooral op basis van URANS, de concentratie van de verontreinigende stof op de bodem van de afgesloten ruimte grotendeels overschatten, hypothetisch vanwege een kunstmatige overschatting van turbulente diffusie. De benchmark concludeerde dat CFD een geschikte benadering vertegenwoordigt om ventilatie-eigenschappen van afgesloten ruimtes te onderzoeken die vergelijkbaar zijn met de ruimte die in de validatie-experimenten is gebruikt en met vergelijkbare openingprincipes

De resultaten van de benchmark-inspanningen zijn later door dezelfde auteurs verwerkt tot een richtlijn voor de beste werkwijze en een bredere beoordeling van hoe CFD-simulaties uit te voeren voor waterstofverspreidingsproblemen in afgesloten ruimtes [18] [19].

Meer recentelijk voerden Lee et al. [20] CFD-onderzoeken uit voor een waterstofdrukregelstation dat qua kenmerken vergelijkbaar is met de gasstations die in HyDelta zijn onderzocht. Er werd een goede overeenkomst gevonden tussen CFD en experimenten, waardoor de onderzoekers het effect van alternatieve ventilatie konden onderzoeken. Een combinatie van de Bousinessq-hypothese, het species transport model en de  $k-\omega$  SST-turbulentieformulering presteerde het beste.

Op basis van deze referenties en de hierboven besproken referenties worden in Tabel 6 een aantal aanbevelingen gegeven voor de CFD-simulaties die nuttig zijn voor het onderzoek naar gasstations.

*Tabel 6. Aanbevelingen die van toepassing zijn op de vrijgave van waterstof binnen een gasstation, gebaseerd op de richtlijnen gegeven in referenties [18], [19].*

| Onderwerp         | Aanbevelingen  |
|-------------------|--|
| Domein            | Breid de simulatie uit verder dan alleen de positie van de ventilatie om eventuele randeffecten van de fysieke lucht-waterstofuitwisseling bij de ventilatie te verwijderen.   |
| Rooster           | Pas verhoogde resolutie toe in regio's met sterke gradiënten, zoals rond de waterstofinjectie nozzle, jet-wall impingement-punt en ventilatie.   |
| Lek injectie      | Ofwel als een volumebronterm of als een grensbron gekarakteriseerd door zijn snelheid op een geselecteerd gebied/oppervlak. De laatste is de voorkeur.   |
| Gas eigenschappen | Volg een mengbenadering op basis van massafractiëring van de verschillende soorten en volumegebaseerd voor de dichtheid.   |
| Turbulentie model | Geen duidelijke aanbeveling tussen op RANS gebaseerde of LES-gebaseerde benaderingen. RANS heeft de voorkeur vanwege de lagere kosten, maar met extra bouyancy-termen.   |
| Randvoorwaarden   | Als het domeinadvies wordt gevolgd, zijn vaste drukgrenzen, nulgradiënt of zelfs symmetriegrenzen mogelijk.  |
| Tijdstap          | Over het algemeen wordt aangenomen dat de grootte van de tijdstap klein moet zijn, met CFL-waarden (Courant getal) rond de 10 (5-20) in geval van $k-\epsilon$ turbulentie modellering. Voor LES is dit lager dan 1. |
| Numeriek schema   | Er zijn geen specifieke aanbevelingen, maar in alle benchmarkstudies werden ten minste tweede orde schema's gebruikt voor de convectieve termen.   |

### 7.3 Modelleringsaanpak

Er kunnen verschillende modelleringsmethoden worden gebruikt om de concentratieprofielen van waterstof in een (geventileerde) ruimte te voorspellen. Het doel van de modellering is om een beter begrip te geven van de experimentele resultaten. Er worden twee modelleringsniveaus nagestreefd. Het eerste niveau is gebaseerd op een combinatie van empirisch gevalideerde modellen die zijn opgenomen in de HyRAM+ toolkit, die bijna onmiddellijke resultaten biedt. Het tweede niveau is gebaseerd op CFD, wat lang kan duren om antwoorden te geven voor een bepaald geval.

#### Basis en opstelling van de HyRAM+ calculations

HyRAM+ [21] is gekozen om een eerste voorspelling en perspectief te geven op welke concentratieniveaus kunnen worden bereikt bij een waterstof- of aardgaslek in een gasstation. De resultaten van HyRAM+ kunnen worden vergeleken met de experimenten en met de CFD-modelleringsresultaten.

De modelleringsaanpak die in de HyRAM+ tool wordt gebruikt, volgt ref. [2]. De basis van het model is een massabalans binnen een veronderstelde homogene laag die boven in de ruimte ontstaat wanneer waterstof wordt vrijgegeven. De vrijgave wordt gemodelleerd met een jet model. De gevormde pluim voert waterstof naar de laag. Ventilatie vermindert de ophoping van waterstof in de veronderstelde laag. Ventilatie kan van nature worden aangedreven door opwaartse kracht, standaard aan de bovenkant, maar kan ook worden additioneel worden ondersteund door wind of een mechanische ventilator.

Voor de berekeningen uitgevoerd met HyRAM+, worden de volgende aannames of randvoorwaarden gebruikt:

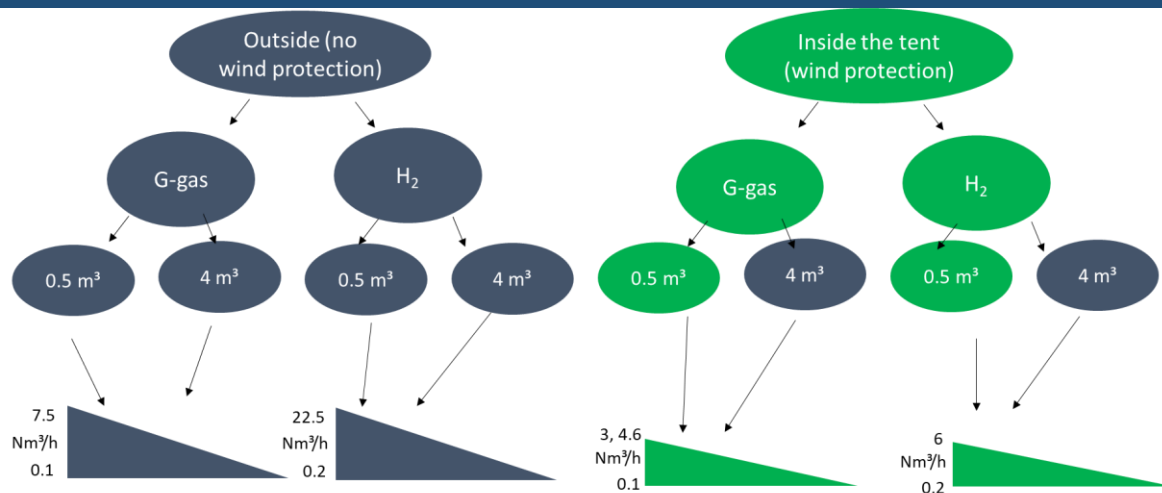
- Waterstof wordt vrijgegeven uit een tank bij een druk van 8 barg, wat de stroom opwaartse zijde van een gasstation vertegenwoordigt.
- De lekdiаметer is geselecteerd zodat het waterstoflekdebiet overeenkomt met de experimentele waarden. Het lek bevindt zich in het midden en 30 cm boven de grond, en naar boven gericht.
- Ventilatie: alleen plafondventilatie zonder aanwezigheid van wind of mechanische ondersteuning. Het gebied van de plafondventilatie is gebaseerd op een 15 mm spleet die zich uitstrekt over 3 van de 4 zijden van het deksel van het gasstation behuizing (de twee lange zijden en een korte zijde - de andere korte zijde heeft een plaat die grotendeels de ventilatiestroom blokkeert).
- De temperatuur van zowel de vrijgegeven waterstof als de omgeving wordt verondersteld gelijk te zijn op 15 graden Celsius.

#### Basis en opstelling van de CFD-berekeningen

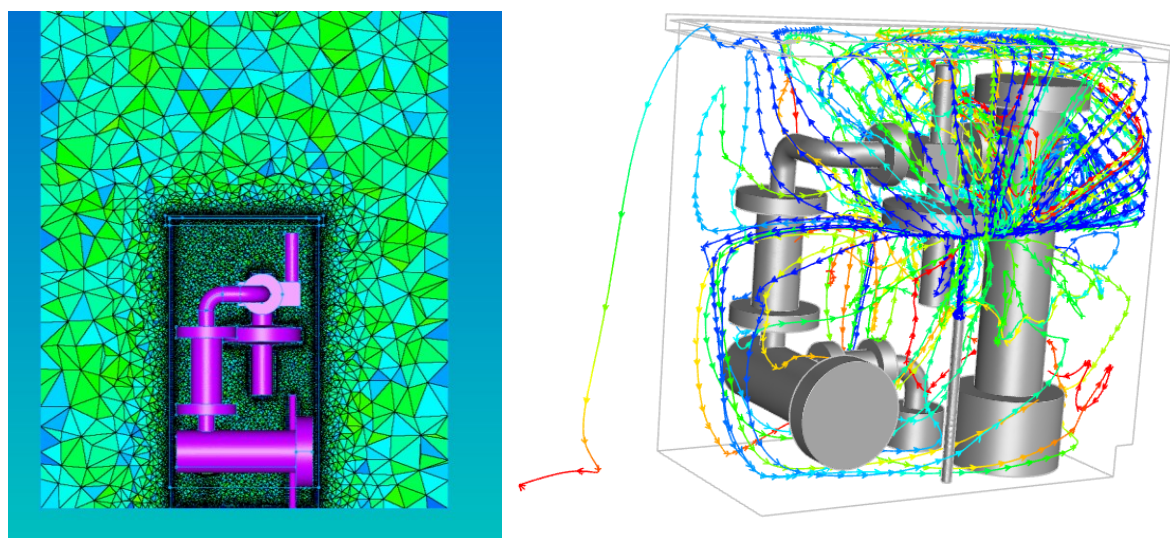
De modelleringsopstelling moest eerst worden geverifieerd aan de hand van een selectie van de experimenten die zijn uitgevoerd in de voormalige HyDelta 1-fase (gerapporteerd in [2]) en de huidige HyDelta 2-fase. Omdat de HyDelta 1-gegevens al beschikbaar waren aan het begin van HyDelta 2, werd deze set eerst geselecteerd voor validatiedoeleinden. De HyDelta 1-experimenten hielden rekening met een aantal onafhankelijke omstandigheden bij het onderzoeken van de ventilatie van de gasstations:

- Het ontwerp van het gasstation kabinet: een 1/2 m<sup>3</sup> of een 4 m<sup>3</sup> station.
- Het gas dat voor de lekkage wordt gebruikt: aardgas (G-gas) of waterstof.
- Bescherming tegen de wind of niet
- De daadwerkelijke opwaartse druk / spuitmond diameter die uiteindelijk het lekpercentage bepaalt.

Een overzicht van de experimentele matrix van HyDelta 1 wordt getoond in Figuur 40. Vanwege de kosten per CFD-berekening is slechts een subset geselecteerd voor validatie van de CFD-simulaties. De 1/2 m<sup>3</sup> kast is geselecteerd omdat hogere concentratieniveaus werden gevonden in de experimenten. De gevallen met windbescherming door een tent zijn ook interessant maar niet gekozen, omdat dit een moeilijk te bepalen randvoorwaarde is voor de CFD vanuit een dynamisch oogpunt (gemiddelde windsnelheidsvariaties en windstoten). Tevens is een geen-windconditie ook een conservatiever scenario, omdat wind de ventilatie zal verbeteren. Over het algemeen betekent dit dat het 1/2 m<sup>3</sup>-kast wordt gesimuleerd voor lekken van G-gas en H<sub>2</sub> zonder rekening te houden met wind



Figuur 40. Overzicht van experimenten uitgevoerd in HyDelta 1.0 [23]. Het pad dat groen is gemarkeerd, geeft de gevallen aan die zijn geselecteerd voor validatie van de CFD.



Figuur 41. Het initiële model setup toonde het gasstation met apparatuur (links) en een beperkte dekking van het model voor de buitenomgeving. Er werd ontdekt dat er sprake was van verbeterde menging als gevolg van het “botsen” van de straal op een flens (rechts), die niet kon worden gevalideerd aan de hand van de experimenten. De definitieve model setup wordt weergegeven in Figuur 42.

De simulaties werden uitgevoerd op de ½ m³ kast. Enkele vereenvoudigingen werden toegepast op de geometrie van de kast om het model klaar te maken voor het genereren van het net. Apparatuur in het gasstation (bijv. leidingwerk, kleppen, enz.) werd uiteindelijk niet gemodelleerd (Figuur 42), omdat dit de rooster kwaliteit verminderde en de mengsnelheid verhoogde omdat de straalstroom tegen de flens botst (Figuur 41). Er werd een domein van 4 m × 3 m × 3 m gebouwd rond de kast om de omgeving van het gasstation te modelleren. Deze uiteindelijke grootte van het buitenste domein is het resultaat van vroege pogingen met een kleiner domein (1,5 m × 2 m × 2 m), dat in combinatie met drukuitlaat randvoorwaarde onfysische neveneffecten naar het interessegebied bracht. Het maken van het rekenrooster werd uitgevoerd in Pointwise resulterend in hybride rekenroosters die voornamelijk tetraëdrische cellen bevatte en enkele hexaëdrische cellen. Na het importeren van het rekenrooster in ANSYS Fluent werden de tetraëdrische cellen getransformeerd in polyhedrale cellen om het aantal cellen te verminderen en de roosterkwaliteit te verbeteren. Een voorbeeld van het rooster is te zien in

Figuur 42. Lokale roosterverfijning is toegepast bij de lekopeningkage en bij de wanden van de kast, aan beide zijden. Het totale aantal cellen bedraagt ongeveer 3,7 miljoen.

Het model werd opgezet volgens ref. [16], i.e. met RANS-turbulentie modellering met de realizable k-ε turbulentie model en uitgebreide wandfunctie beschrijving. Volledige beschrijving van opwaartse effecten werden meegenomen wat betekent dat opwaartse krachten invloed hebben op de productie en afbraak van turbulentie. Specietransport werd gemodelleerd met behulp van een gegroepeerde specie voor "lucht" en een andere voor waterstof. De energievergelijking werd niet opgelost. De dichtheid op elk punt waar een mengsel van lucht en waterstof aanwezig is, werd berekend met behulp van de volumegewogen gemiddelde. De eigenschappen van de individuele soorten werden constant gehouden en zijn te vinden in Tabel 7. Hoewel de viscositeit van waterstof van dezelfde orde van grootte is als die van lucht, is de dichtheid een orde van grootte kleiner. Dit betekent dat waterstof sterk opwaarts beweegt wanneer het in de behuizing wordt vrijgegeven.

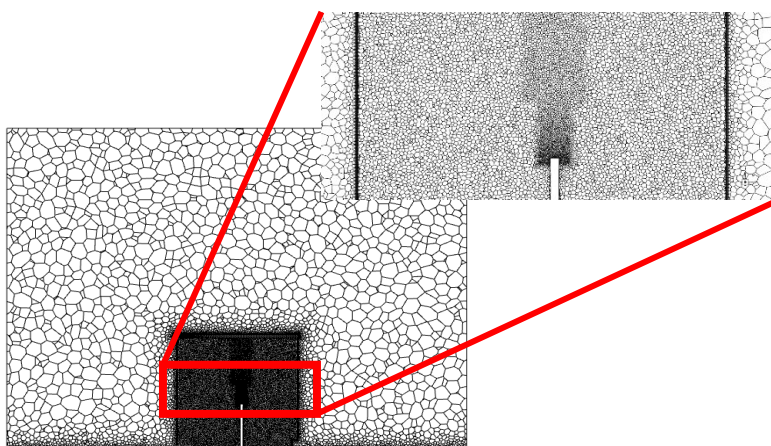
Met betrekking tot de randvoorwaarden, werden alle oppervlakken die de grond of bodem van de kast vertegenwoordigen, gemodelleerd als wanden. Ook werden de vier zijoppervlakken van het volume dat de buitenomgeving voorstelt, gemodelleerd als wanden. Het bovenoppervlak werd gemodelleerd met een constante drukrandvoorwaarde. De lekkage werd gemodelleerd als een instroom met een oppervlakte van 2 mm<sup>2</sup>, wat aanzienlijk groter is dan de eigenlijke opening die in geen van de experimenten werd gebruikt. Dit werd gedaan om zeer kleine roosterafstanden te voorkomen die de rekentijd aanzienlijk zouden verhogen. De massastroom werd echter gehandhaafd op de beoogde waarde om te kunnen vergelijken met de experimenten. Dit heeft invloed op de omgeving dicht bij opening, maar niet op de algehele verdeling van waterstof in de kast. Dit komt feitelijk overeen met het plaatsen van de "virtuele" instroom op een punt waar de straal al is uitgezet.

De belangrijkste resultaten die worden gezocht in de CFD-simulaties zijn de concentraties waterstof in lucht. De virtuele meetpunten zijn de punten P1-P2-P3-P4, die overeenkomen met meetlocaties 1-2-3-4 (Figuur 20).

Tabel 7. Eigenschappen van de gassen die zijn gebruikt in de CFD-simulaties.

| Eigenschap                     | gassen |           |         |
|--------------------------------|--------|-----------|---------|
|                                | Lucht  | Waterstof | Aardgas |
| Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.225  | 0.082     | 0.833   |
| Viscositeit [μPa s]            | 17.9   | 8.4       | 11.4    |





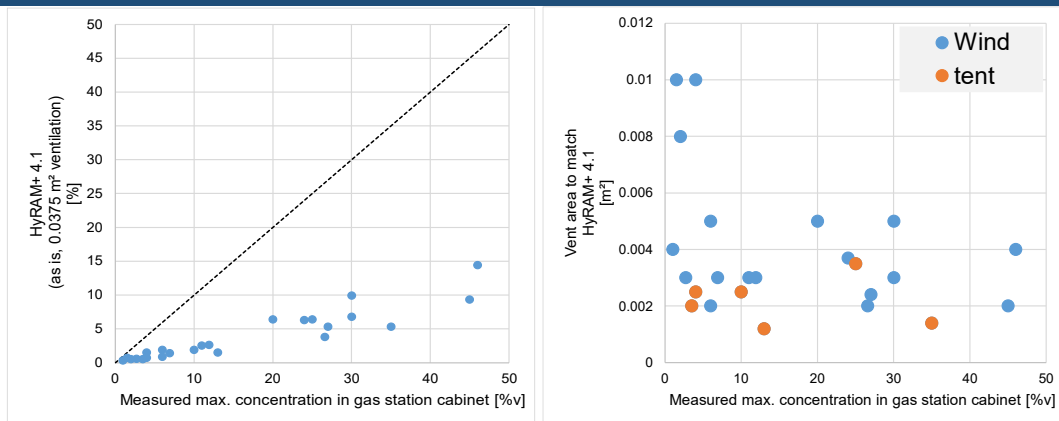
Figuur 42. Polyhedrale rekenrooster gebruikt in de CFD-simulaties en lokale rooster verfijning rondom de injectie nozzle (rechtsboven).

#### 7.4 Resultaten van de simulaties met HyRAM+

Simulaties met de HyRAM+ tool zijn berekend voor alle experimentele gevallen die zijn uitgevoerd gedurende HyDelta 1.0 [2] en de 1/2 m<sup>3</sup> kast van HyDelta 2.0 (zoals gepresenteerd in dit rapport), inclusief die voor waterstof en aardgas. Onder de aannames beschreven in sectie 7.3, voorspelt het model consequent concentraties die ongeveer een factor 3 lager zijn dan de gemeten concentraties tijdens de experimenten. Dit wordt getoond in Figuur 43. De belangrijkste reden hiervoor is waarschijnlijk dat de geometrie van het ventilatiegebied niet overeenkomt met het archetype dat wordt aangenomen in het HyRAM+ model, aangezien waterstof een kronkelend pad moet volgen om uit de kast te komen. Dit pad omvat zelfs een neerwaarts segment (tegen de opwaartse kracht van de buoyancy) dat alleen kan worden doorlopen door middel van een drijvende overdruk. In het HyRAM+ model bevindt het ventilatiegebied zich in hetzelfde vlak als de verticale wand van de kast, die de binnenkant van de behuizing scheidt van de buitenomgeving. Om de gemeten concentraties te evenaren, zou een veel kleiner ventilatiegebied moeten worden geïntroduceerd, dat ongeveer 10 keer kleiner is dan de geometrisch geselecteerde waarde. Als alternatief zou de uitstroomcoëfficiënt moeten worden aangepast, hoewel het effect gelijkwaardig is. De waarde fluctueert, waarbij gevallen blootgesteld aan wind een kleinere oppervlaktecorrectie vereisen dan de gevallen waarin de tent aanwezig was. Dit is redelijk, aangezien wind extra ventilatie biedt, wat kan worden vertaald in een effectief groter ventilatieraam. Windeffecten kunnen potentieel worden vastgelegd in HyRAM+, maar alleen door van invoer van de gebruiker, en niet als gevolg van het fysische model zelf.

Over het algemeen is de belangrijkste conclusie dat de geometrie van de ventilatiespleten van een typische Nederlandse gasstation kast het gebruik van moderne, standaardmodellen zoals die in HyRAM+ moeilijk maakt om toe te passen. Een correctiefactor op het ventilatiegebied van ongeveer 10 zou redelijke resultaten opleveren in vergelijking met de experimenten die in dit programma zijn uitgevoerd.





Figuur 43. Links: vergelijking van de resultaten van HyRAM+ met die van de experimenten uitgevoerd in HyDelta 1.0 en HyDelta 2.0. Als alle punten in deze grafiek samenvielen met de gestippelde lijn, zou dat betekenen dat er een perfecte overeenstemming is tussen de modelresultaten en de experimentele resultaten. Het model onderschat de gemeten concentraties in de kast. Rechts: oppervlak van de ventilatie dat in HyRAM+ -model moet worden geïntroduceerd om de gemeten concentraties overeen te laten komen, onderscheid makend tussen de gevallen waarin de kast blootgesteld wordt aan (wisselende sterkte van) wind en de gevallen waarin deze wordt beschermd door een tent.

## 7.5 Resultaten van de CFD-simulaties

Er zijn veel simulaties gedaan om de gevoeligheid van modelleringsopties te bestuderen totdat een definitieve instelling was bepaald (zoals beschreven in sectie 7.3). Hier worden alleen de meest relevante simulatieresultaten beschreven met betrekking tot de meetcampagnes in HyDelta 1.0 [2] en HyDelta 2.0. Het overzicht van de uitgevoerde simulaties wordt gegeven in Tabel 8, die de basis vormt van de volgende subsecties. Wanneer de resultaten worden vergeleken met experimenten, worden alleen de gevallen in de windluwe situatie (binnen de tent) in overweging genomen.

Tabel 8. Samenvatting van uitgevoerde simulaties met de beschreven opstelling.

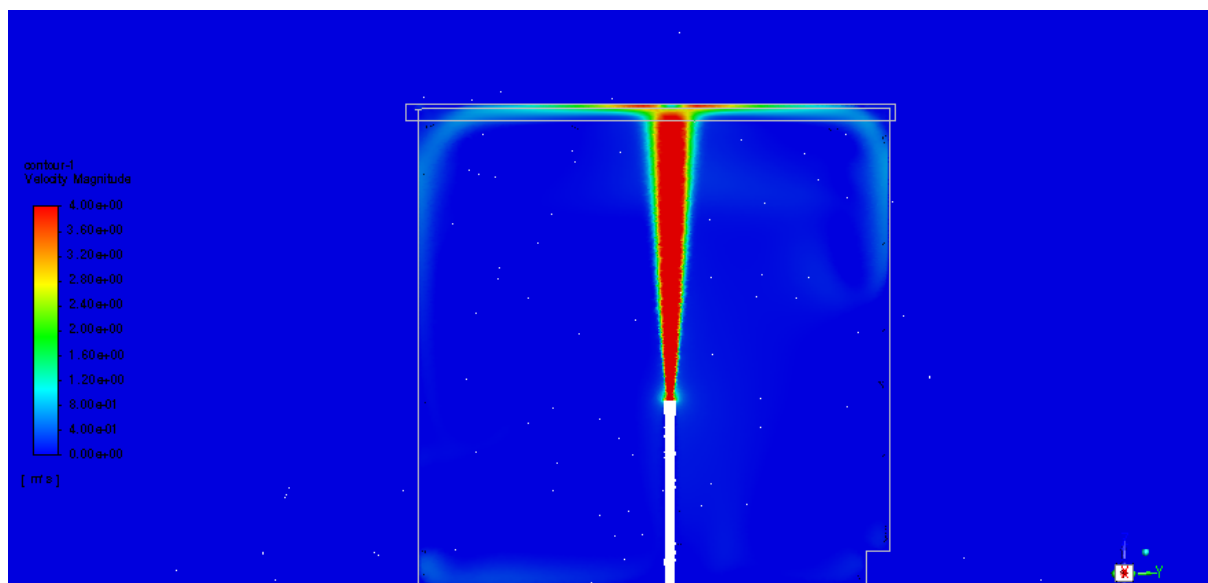
| Simulation ID | Leaked fluid | Lek debiet [Nm³/h] | Comments   |
|---------------|--------------|--------------------|--|
| 01            | Waterstof    | 6.0                | HyDelta 1, 8 barg, 0.25 mm²                            |
| 02            | Waterstof    | 0.6                | HyDelta 2, 8 barg, 0.025 mm²                           |
| 03            | Waterstof    | 0.6                | 02 met gevoeligheid voor jet richting                  |
| 04            | Waterstof    | 0.6                | 02 met gevoeligheid voor ontwerp van ventilatieopening |
| 05            | Aardgas      | 3.0                | HyDelta 1, maximale debiet met tentbescherming         |
| 06            | Aardgas      | 0.45               | HyDelta 1, lager debiet dan 05                         |

### Simulatie-01 – Waterstof, 6 m³(n)/h

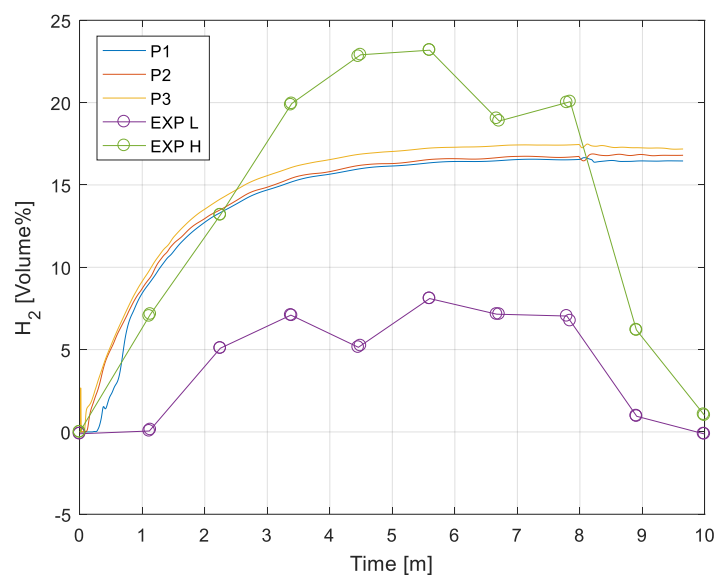
De eerste gesimuleerde case betrof de uitstoot van 6 m³(n)/h H<sub>2</sub>. Deze case simuleert een lekopening van 0,25 mm² met een stuur-druk van 8 barg vanuit het netwerk. Dit komt overeen met een massastroom van 0,15 g/s die werd toegepast in de CFD. Na 8 minuten wordt de uitstoot van waterstof gestopt.

Een contourplot van de snelheidsmagnitude wordt getoond in Figuur 44. Hierbij is te zien dat de straal de deksel van de kast raakt en vervolgens langs de bovenkant naar de zijkanten van de kast stroomt. De impuls van de straal drijft circulatie naar beneden en langs de muren van de kast. In Figuur 46 worden contourplots van de H<sub>2</sub> (%v) gepresenteerd. Vanwege de hoge snelheid van de straal mengt de waterstof zich redelijk goed in de kast en ontsnapt ook wat H<sub>2</sub> via de ventilatioeroosters naar buiten, waar het vanwege de opwaartse drijfkracht omhoog beweegt. Het gedrag lijkt niet zo op de theoretische archetypen gebaseerd op een homogene laag. Dit komt door de grote impuls van de straal. De waterstofconcentratie bereikt na ongeveer 6 minuten een stabiele toestand, zoals te zien is in Figuur

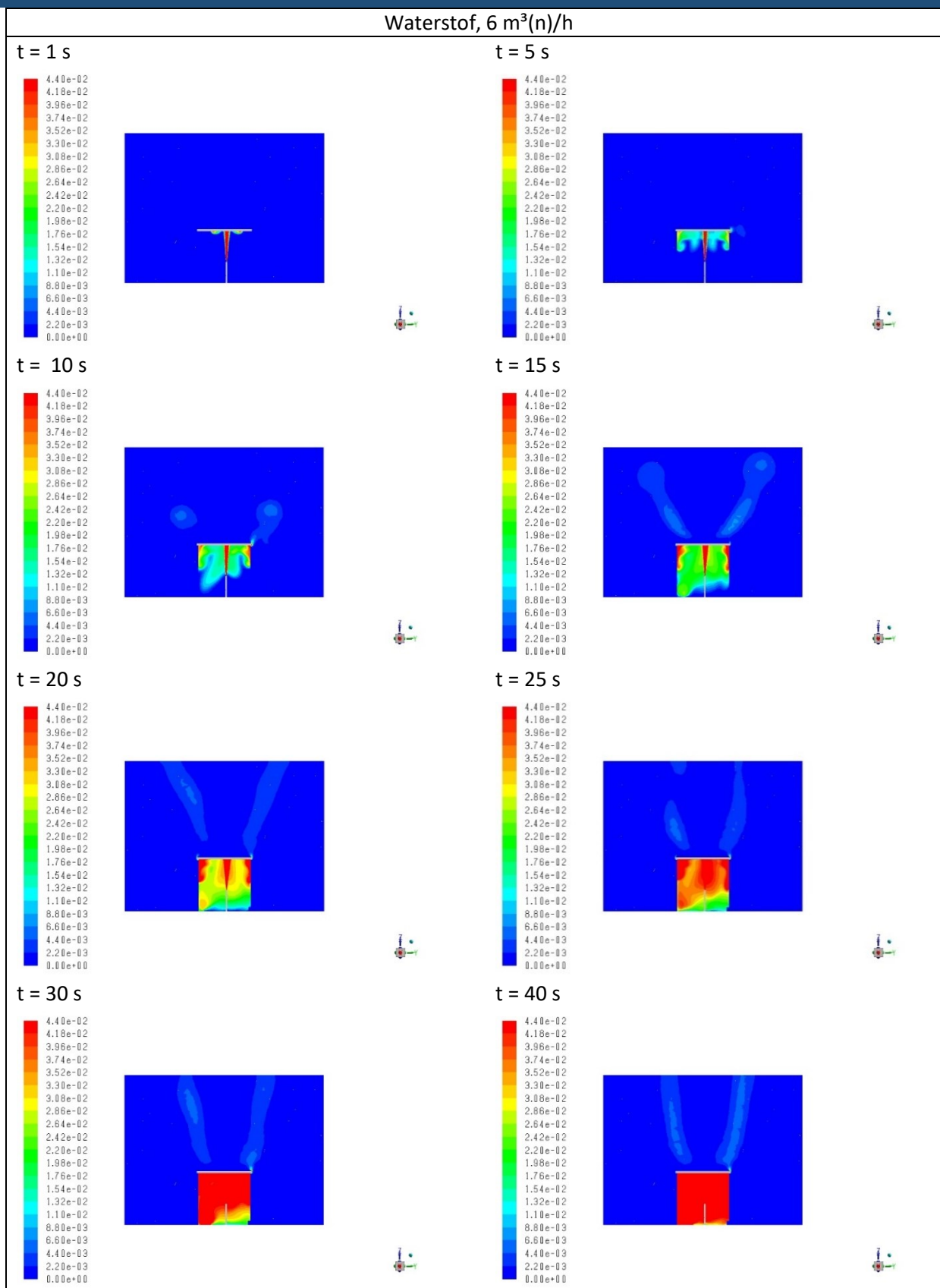
45 waar de tijdsevolutie is geplot voor verschillende locaties in de kast. Ook zijn de gemeten waarden in deze figuur geplot, waarbij 'L' staat voor de lagere locatie en 'H' voor de hogere locatie.



Figuur 44. Contourplot van de snelheidsmagnitude in een vlak door het lek.



Figuur 45. Concentratie van H<sub>2</sub> op drie locaties (P1-P2-P3) vergeleken met de experimentele metingen (EXP L en EXP H) voor debiet 6 m<sup>3</sup>(n)/h H<sub>2</sub>.



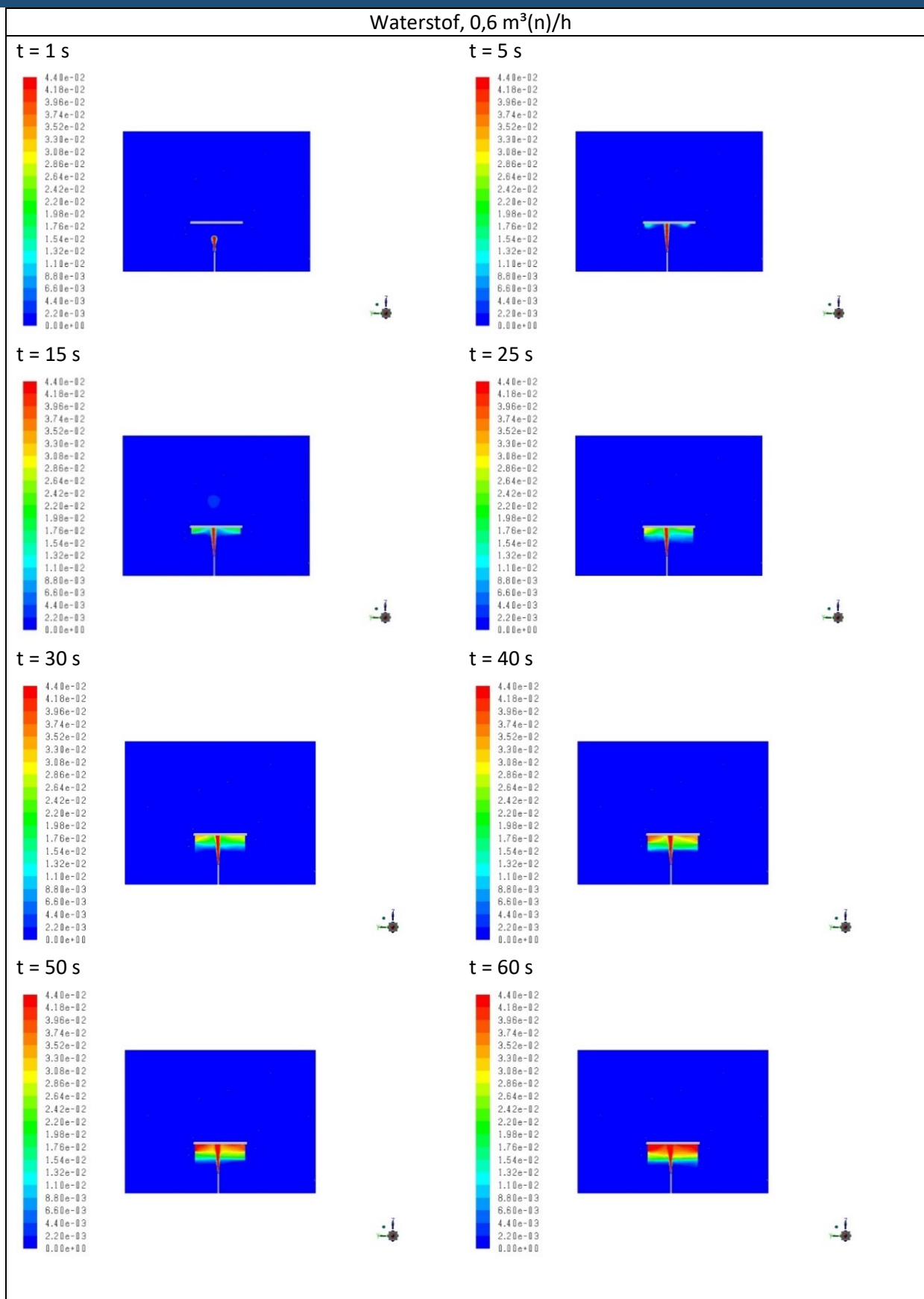
Figuur 46. Contourplots van de concentratie H<sub>2</sub> (volume%) op verschillende tijdstippen. t=1,5,10,15,20,25,30 en 40 s. De contour is afgeknapt op 4,4%, de onderste brandbaarheidsgrens van H<sub>2</sub>.

Enkele observaties die kunnen worden gemaakt vanuit Figuur 45 zijn:

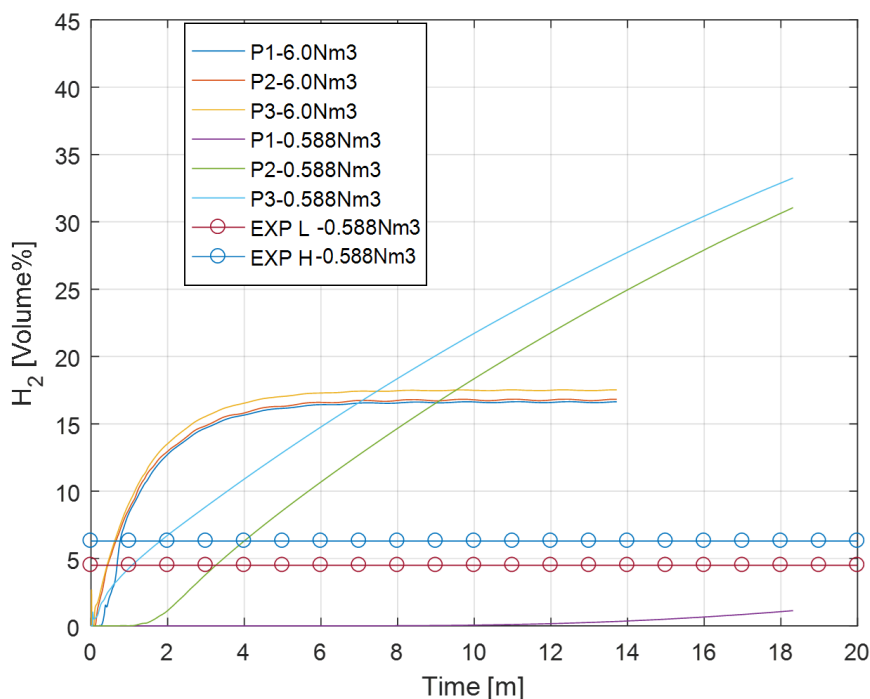
- De initiële opbouw van waterstof aan de bovenkant van de kast komt redelijk overeen met de experimenten. De uiteindelijke evenwichtsconcentraties aan de bovenkant van de kast (P2, P3) zijn ook zeer vergelijkbaar en komen overeen met de gemeten waarden.
- De tijd waarop evenwicht wordt bereikt is ook redelijk vergelijkbaar, tussen 5 en 6 minuten.
- Voor P1, het laagste punt, overschat de simulatie de evenwichtsconcentratie tot het punt dat er weinig tot geen stratificatie binnen de kast te zien is. Dit betekent dat de circulatie gecreëerd door de jet een dominante invloed heeft in vergelijking met opwaartse krachten, maar mogelijk ook dat de ventilatie onvoldoende is. Er is weinig concurrentie tussen zwaardere verse lucht en opwaartse waterstof om de ruimte bij de bodem van de kast te bezetten.
- Na 8 minuten, wanneer de lekkage in de experimenten stopt, veranderen de concentraties niet in de simulatie, terwijl de waarden in het experiment snel dalen. Dit geeft aan dat de ventilatie volgens de simulatie slecht is en dat er geen verse lucht van buitenaf de kast binnenkomt (of omgekeerd dat de waterstof vastzit in de kast). De diffusie naar buiten is onvoldoende om de concentratie in de kast te laten dalen.

#### Simulatie-02 – Waterstof, $\sim 0.6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Vervolgens wordt een geval uit HyDelta 2.0 berekend voor een lekkage van ongeveer  $0,6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ , wat overeenkomt met een massastroom van  $0,015 \text{ g/s}$ . Dit geval simuleert een lekopening van  $0,025 \text{ mm}^2$  met een inlaatdruk van 8 barg. Kijkend naar de contourplots in Figuur 47 zien we dat de stroming minder turbulent is en dat waterstof langzaam een laag vormt aan de bovenkant van de kast maar niet gemakkelijk door de ventilatieopening stroomt. Het gedrag is zeer vergelijkbaar met theoretische kaders die uitgaan van een homogene laag van groeiende dikte totdat een evenwicht tussen bron en ventilatie is bereikt. Het gedrag is ook zichtbaar in Figuur 48, waar de concentraties op verschillende meetpunten zijn geplot. Ter vergelijking wordt hier ook de CFD-gegevens van het vorige geval gegeven. Zoals verwacht, is de opbouw trager, maar bereikt het geen plateau zoals in het vorige geval. Ook zijn de concentratiewaarden verkregen in de simulatie veel hoger dan die verkregen in de experimenten, wat aangeeft dat het model een minder effectieve ventilatie vastlegt dan tijdens de experimenten. Bovendien zijn de verkregen concentraties hoger dan die bij een hogere stroomsnelheid, wat aangeeft dat de kast zonder aandrijvende impuls van een straal niet ventileert. In het geval van de hogere stroomsnelheid (simulatie-01) is de impuls die de waterstof nog bevat bij het raken van de deksel voldoende om een deel ervan naar buiten te drijven. Bij een kleinere stroomsnelheid is dat niet het geval en is de kast in staat om meer waterstof te verzamelen. Na 18 minuten simulatietijd wordt de simulatie gestopt.



Figuur 47. Contourplots van de concentratie  $H_2$  (volume%) op verschillende tijdstippen.  $t=1,5,15,25,30,40,50$  en  $60$  s. De contour is afgeknip op 4,4%, de onderste brandbaarheidsgrens van  $H_2$

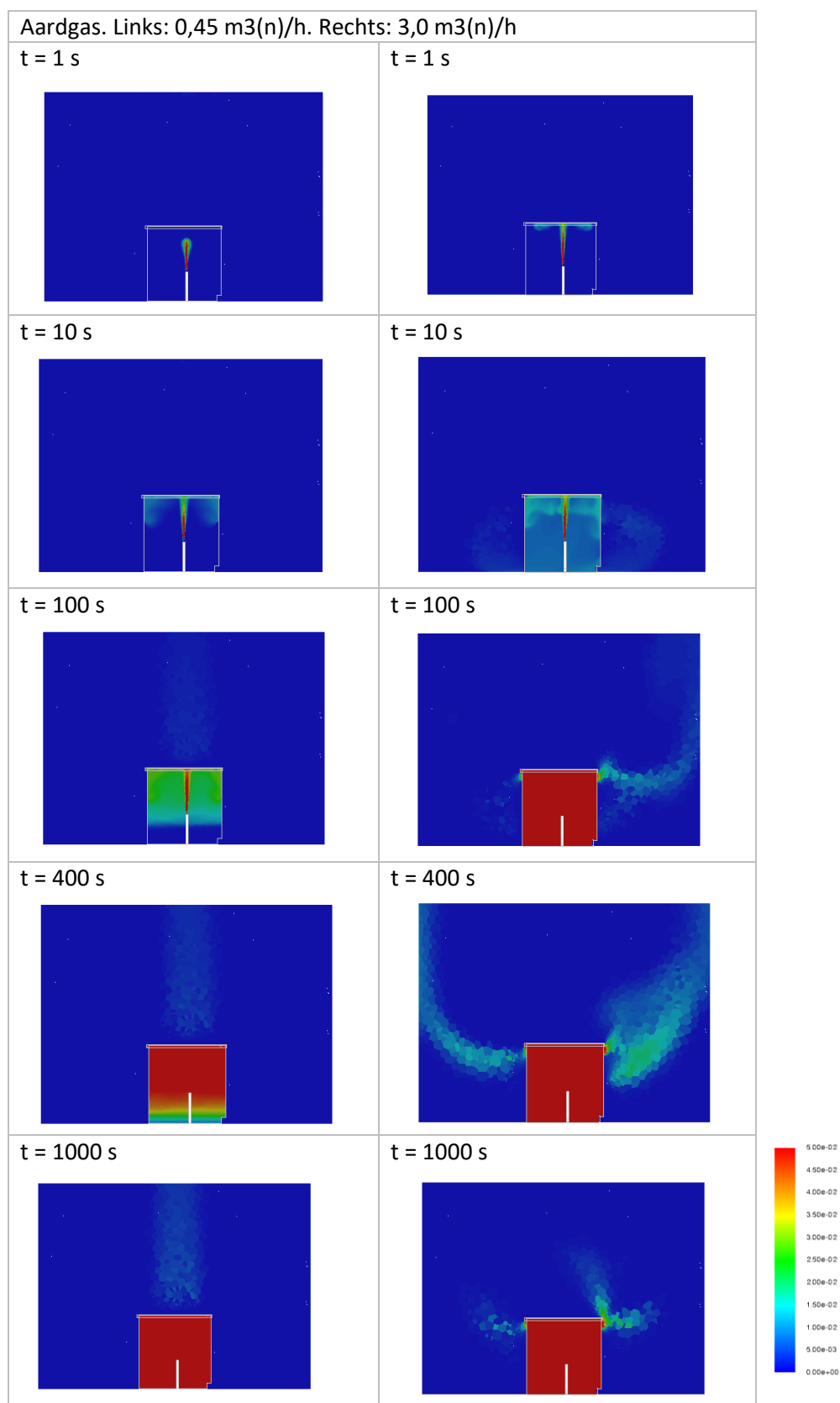


Figuur 48. Concentratie van  $H_2$  op drie locaties vergeleken met de experimentele metingen van debiet  $0,588 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  van  $H_2$ . Ter vergelijking worden ook de simulatieresultaten van de  $6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  case gegeven.

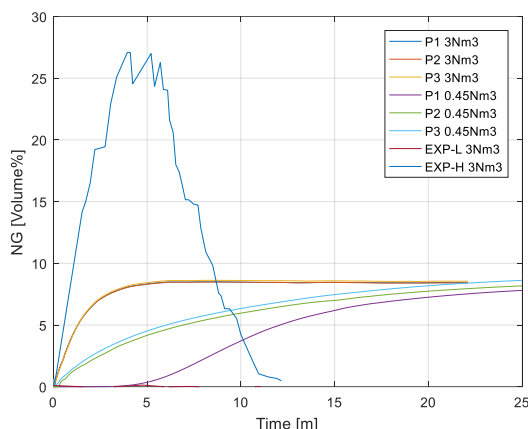
#### Simulatie-05 & Simulatie-06 – aardgas, $3 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ en $0,45 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Twee gevallen met een lekkage van aardgas (NG) worden uitgevoerd. Het verschil zit alleen in de lekstroom. De hoge stroom met  $3,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$  en een lagere stroom van  $0,45 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ . Resultaten zijn te zien in Figuur 49 en Figuur 50. In Figuur 49 zijn de contouren van NG geplot voor beide gevallen. Het geval met de hoge stroomsnelheid mengt veel sneller maar, vanwege het momentum van de straal, kan het aardgas sterk naar buiten het kabinet worden uitgestoten. Dit trekt ook meer verse lucht naar binnen. Bij het geval van de lage lekstroom wordt er een opbouw van aardgas gevormd vanaf het bovenste deksel van het kabinet, en de uitstoot van aardgas naar buiten is nauwelijks zichtbaar in de contourplots. Door naar de waarden op de meetpunten in Figuur 51 te kijken, kan worden gezien dat de evenwichtsconcentratie bijna hetzelfde is voor beide gevallen. Dit is een onverwacht resultaat, omdat de experimenten een hogere waarde laten zien voor de hogere stroomsnelheid. Het is echter consistent met het gedrag dat ook werd waargenomen in het waterstofgeval bij het vergelijken van simulaties 01 en 02, waarbij een lagere lekstroom resulteert in een hogere concentratie binnenin het kabinet.





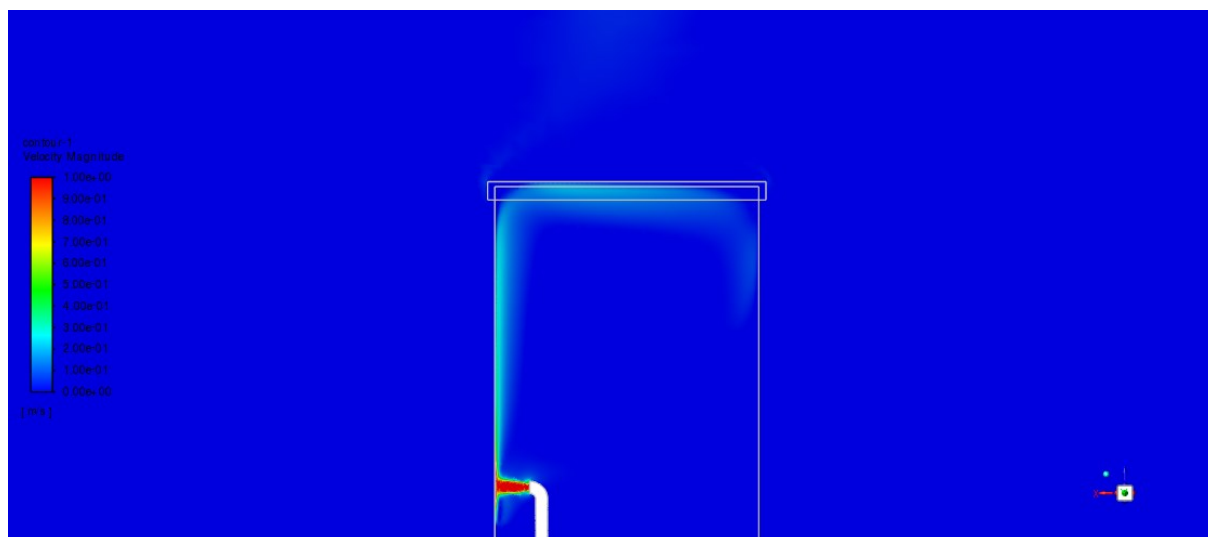
Figuur 49. Contourplots van de concentratie aardgas voor beide-gevallen. Links: 0,45 m<sup>3</sup>(n)/h. Rechts: 3,0 m<sup>3</sup>(n)/h. Tijdswaarden (van boven naar beneden) zijn respectievelijk 1,0 s, 10 s, 100 s, 400 s en 1000 s.



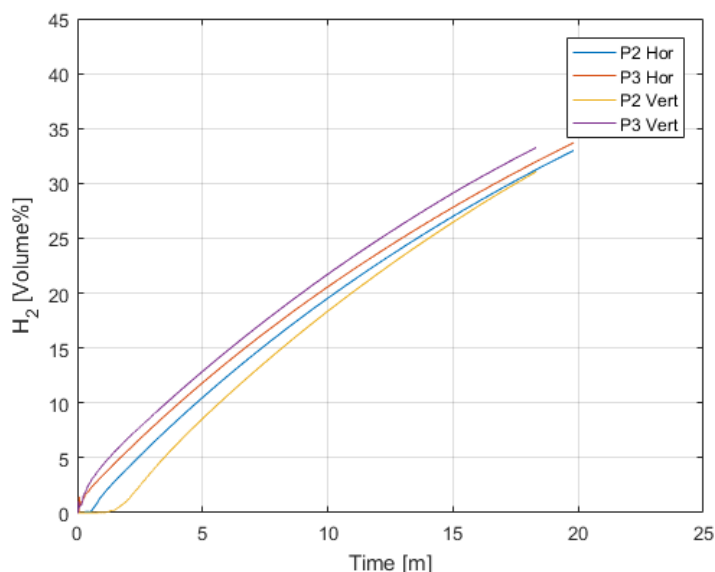
Figuur 50. Concentratie van NG op drie locaties voor zowel de uitstroom van  $3 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  als  $0,45 \text{ Nm}^3 (\text{n})/\text{h}$  aardgas. Ter vergelijking worden ook de experimentele resultaten van de  $3 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  debiet gegeven.

### Simulation-03 – Lekkage in horizontale richting

Er wordt een sensitiviteit scenario gesimuleerd met een horizontale lekkage van waterstof. Het stromingsveld is afgebeeld in Figuur 51. Hier is te zien dat de stroom tegen de wand botst en voornamelijk omhoog stroomt. Een deel stroomt ook naar beneden. Wanneer we kijken naar de concentraties op de meetpunten die worden getoond in Figuur 52, is er weinig verschil tussen de verticale en horizontale gevallen. De waarden van P2 en P3 liggen dicht bij elkaar voor de horizontale lekkage, wat betekent dat er betere menging plaatsvindt binnenin de kast in het geval van horizontale lekkage.



7Figuur 51. Contourplot van het snelheidsveld van simulatie 03, waarbij de lekkage is vrijgegeven in horizontale richting. Deze configuratie is niet met experimenten

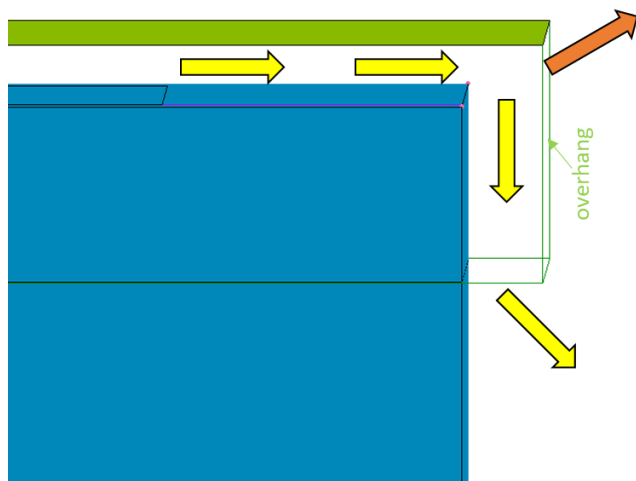


Figuur 527. Concentratie van  $H_2$  op drie locaties voor het geval van een horizontale lekkage-uitstroom, vergeleken met de experimentele metingen van de  $\sim 0.6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  uitstroom van  $H_2$ .

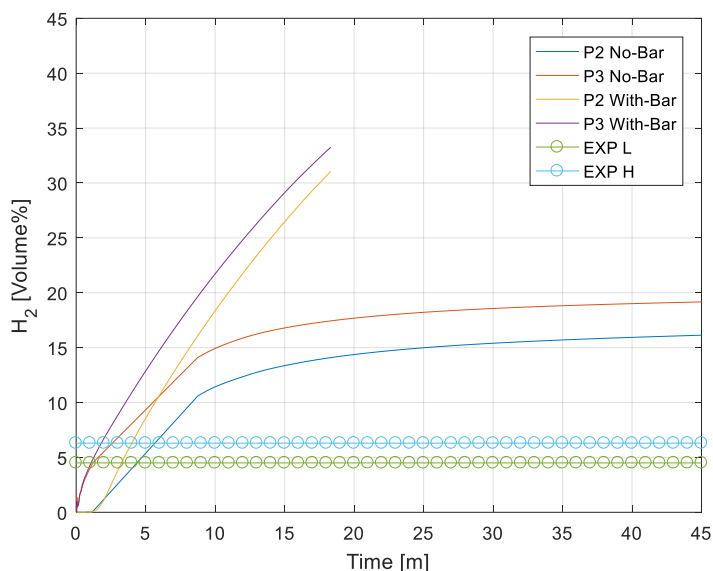
#### Simulatie-04 – Verschillend ventilatieontwerp

In voorgaande secties is besproken dat de geometrie van de ventilatiekanalen van het gasstation weerstand biedt tegen de uitstroom van waterstof in geval van een lek. Een belangrijke barrière is de overhang van het deksel. Waterstof die bovenaan arriveert, moet eerst naar beneden stromen (tegen zijn natuurlijke opwaartse neiging in) om de kast van het gasstation te verlaten. Dat kan alleen gebeuren als er voldoende tegenovergestelde druk is. Alleen wanneer de gasstroom sterk genoeg is, is er voldoende momentum in de stroming (of stagnatiedruk) om de onderkant van de overhang te bereiken en naar buiten te stromen. Het was interessant om te begrijpen in hoeverre de overhang inderdaad een effectieve barrière vormt voor de uitstroom van waterstof. Daarom is een simulatie uitgevoerd waarbij de overhang is verwijderd. Dit wordt getoond in Figuur 53. De gekozen lekdebiet is  $\sim 0,6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ . Praktische gevolgen van het verwijderen van de overhang, zoals bescherming tegen waterindringing of kwaadwillige handelingen, worden momenteel genegeerd.

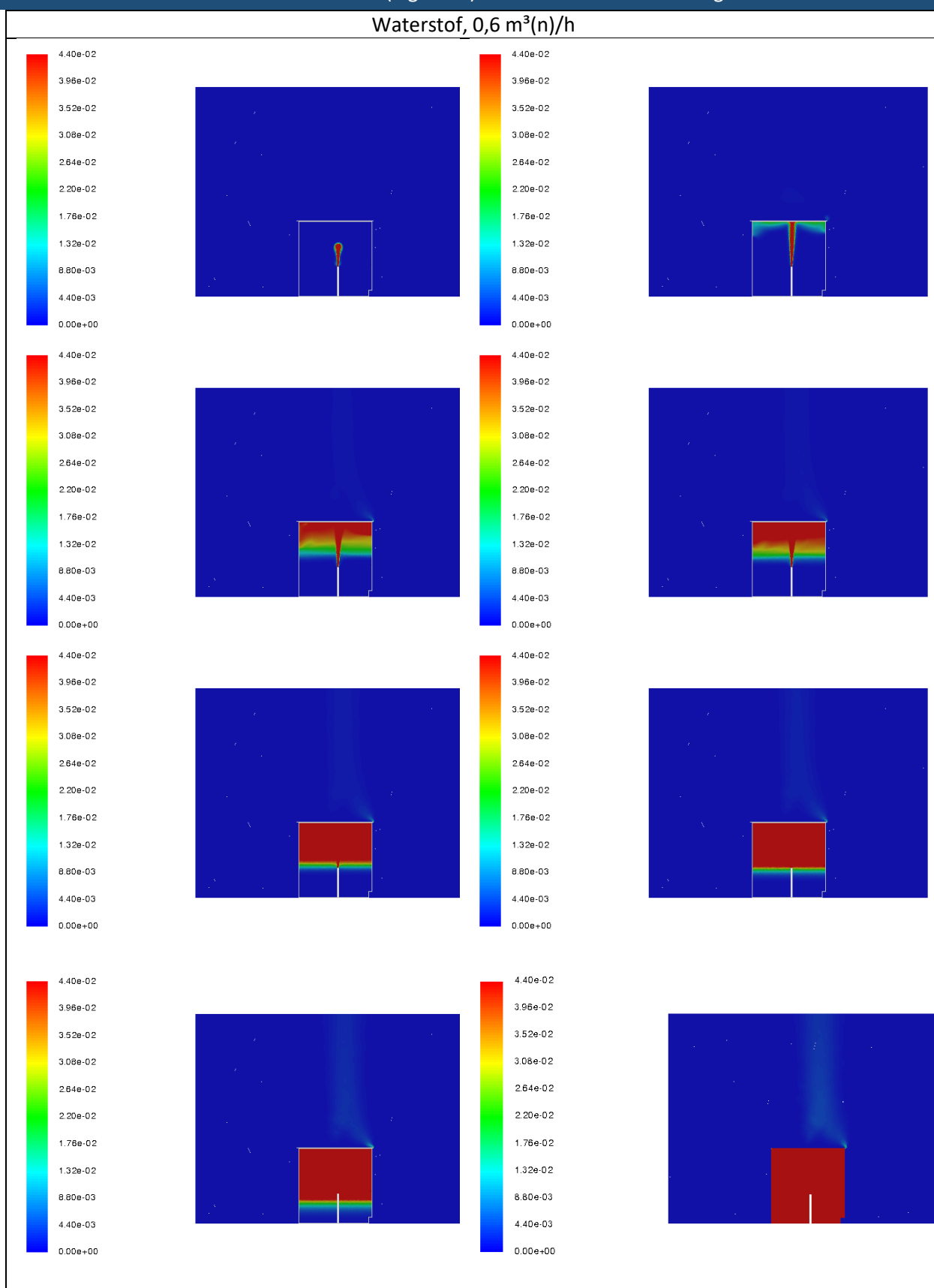
De resultaten van de simulatie worden getoond in Figuur 54 en Figuur 55. Het verwijderen van de overhang heeft een duidelijk effect op het verminderen van de concentratie van waterstof binnen de gasstation behuizing. Zo'n ontwerp zorgt voor een betere ventilatie. Het is daarom aan te bevelen om alternatieve ventilatieontwerpen te onderzoeken die waterstof in staat stellen zijn natuurlijke opwaartse beweging te volgen, terwijl er voldoende bescherming is tegen externe factoren.



Figuur 537. Detail van de ontbrekende overhang die wordt verwijderd in simulatie 04. De wandoppervlakken van het deksel worden weergegeven in groen, wat waterstof dwingt om de gele pijlen te volgen om de kast van het gasstation te verlaten. In simulatie 04 worden de laterale oppervlakken (overhang) verwijderd, waardoor waterstof de behuizing van het gasstation kan verlaten.



7Figuur 54. Concentratie van  $H_2$  op drie locaties voor het geval zonder overhang, vergeleken met de experimentele metingen van de  $\sim 0,6 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  release van  $H_2$ . Ter vergelijking wordt ook het geval met overhang getoond (geldt ook voor experimentele resultaten).



7Figuur 55. Contourplot van de concentratie van H<sub>2</sub> (volume%) op verschillende tijdstippen. t=1, 10, 60, 100, 200, 300, 600 en 900 s. De contour is afgekapt bij 4,4%, de onderste brandbaarheidsgrens van H<sub>2</sub>.

## 7.6 Conclusies CFD

De verschillende modelleringsactiviteiten werden geïntroduceerd om het resultaat van de metingen beter te begrijpen. Om dat te kunnen doen, is een goede overeenstemming tussen de modellen en de experimenten een vereiste. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De modellering gebaseerd op moderne, standaard engineering tools zoals HyRAM+ of de CFD brengen het ontwerp van de ventilatie van behuizing in beeld. Met beide technieken worden voor de gekozen lekdebieten de opbouw van gasconcentratie in kaart gebracht waarbij qua orde grootte dezelfde conclusies getrokken kunnen worden.
- Modellering bevestigt dat de gasconcentraties voor grote lekkages van waterstof-luchtmengsels binnen de kast boven de LFL liggen, zoals gevonden in de experimenten. Ventilatie voor deze scenario's zijn gelimiteerd in het huidige ontwerp.
- De ventilatieroute is belangrijk en zou de stijgende stroom van waterstof gedreven door de opwaartse kracht moeten vergemakkelijken. Een alternatieve geometrie die de overhang van het kastdeksel verwijdert, bevestigt een significante verbetering van de ventilatie.
- Of de lekkage nu in verticale of horizontale richting plaatsvindt, heeft geen sterke invloed op de concentraties binnen de kast.
- De kwaliteit van de CFD-validatie in termen van overeenkomst tussen de gemeten evenwichtsconcentraties en de CFD-modelleringsresultaten wordt niet als bevredigend genoeg beschouwd. Het model is nuttig om te visualiseren welke fenomenen de verspreiding van waterstof binnen de behuizing aandrijven, maar in vergelijking met de experimenten ontbreken nauwkeurige voorspellende capaciteiten. Verschillende redenen zijn mogelijk, zoals het effect van wind (windstoten) of verschillen in temperatuur.

## 7.7 Aanbevelingen CFD

De volgende aanbevelingen voor de modellering worden gegeven met als uiteindelijk doel de ontwerpvereisten van de gasstation kast te bepalen om waterstofconcentraties in de lucht onder de LFL te houden.

- Een breder validatieonderzoek gebaseerd op academische gevallen is essentieel om de oorzaak van de afwijkingen tussen modellering en experimenten tot op dit punt te vinden. In andere woorden, experimenten die uitgevoerd zijn in een zeer gecontroleerde omgeving (vooral zonder wind), zouden gereproduceerd moeten worden met de CFD modelleringstechniek om modelleringsgebreken te onderscheiden van fouten die te wijten zijn aan de complexiteit van deze specifieke zaak.
- Itereer verschillende ontwerpen van ventilatieroosters, zodat de uitstroom van waterstof kan worden vergemakkelijkt. De ontwerpen moeten compatibel zijn met voldoende bescherming van de apparatuur binnenin



## 8. Conclusies

De doelstelling van dit onderzoek was om inzicht te verkrijgen in de geschiktheid van de ventilatie van de bestaande behuizingen van gasstations voor de distributie van waterstof. Om dat inzicht te verkrijgen zijn de volgende deelvragen gesteld:

1. Deelvraag 1: Wat zijn de meest voor de hand liggende typen behuizingen van gasstations voor de toepassing van waterstofdistributie?
2. Deelvraag 2: Aan welke voorwaarden moet een behuizing van een gasstation voldoen voordat deze geschikt is voor de distributie van waterstof? <sup>9</sup>
3. Deelvraag 3: In hoeverre voldoen de meest voor de hand liggende behuizingen aan de voorwaarden, al dan niet met additionele ventilatie? <sup>10</sup>

De eerste deelvraag kan worden beantwoord. Er zijn drie typen behuizingen die een afspiegeling zijn van een substantieel deel van hele populatie: de HAS kast, de ½ m<sup>3</sup> kast en de 4 m<sup>3</sup> kast. Deze zijn geselecteerd na een inventarisatie bij de netbeheerders. Hierbij zijn de behuizingen die in de laatste tien jaar zijn geplaatst, meegenomen en is een inschatting gemaakt welke type behuizing in eerste instantie gebruikt zal gaan worden in een waterstofnetwerk.

Uit de gegevens van de laatste 10 jaar blijkt dat recent vooral kleinere behuizingen zijn geplaatst, deze behuizingen zijn tamelijk uniform. In het bijzonder zijn kasten met een inhoud van 0,5 m<sup>3</sup> en kaststations met een inhoud van 4 m<sup>3</sup> in grote mate vergelijkbaar. Het is hiermee aannemelijk dat de resultaten uit dit onderzoek een goede indicatie zijn voor alle stations met deze inhoudsmaat, zolang deze gelijk zijn met betrekking tot de wijze van ventileren en het ventilatieoppervlakte. De HAS kasten (inhoud < 0,5 m<sup>3</sup>) zijn in mindere mate uniform. Elke netbeheerder heeft zijn eigen standaard die soms veel en soms weinig afwijkt van de standaard van andere netbeheerders.

Ook de tweede deelvraag kan worden beantwoord, al is dit antwoord wel complexer. De belangrijkste voorwaarde is dat (de behuizing van) een gasstation voor waterstof minstens net zo veilig is als (de behuizing van) een gasstation voor aardgas. Om dit te bereiken moet worden zorggedragen dat het gebied dat vrij toegankelijk is voor het algemene publiek kan worden aangeduid als Niet Gevaarlijk Gebied (NGG). Bij aardgas geldt dat binnen de behuizing van een gasstation sprake is van een ATEX zone 2 en dat direct buiten de behuizing het Niet Gevaarlijk Gebied begint. Om die reden wordt er normaal gesproken geen hekwerk geplaatst rondom een station voor de distributie van aardgas. Datzelfde moet ook gelden voor stations met waterstof. Een behuizing (of: de behuizing inclusief een afgeschermd stuk grondoppervlakte) moet geclassificeerd kunnen worden als een ATEX zone 2. Dan is direct naast deze zone geen ATEX zonering meer noodzakelijk en mag dat gebied toegankelijk zijn voor het algemene publiek.

Om een gebied te mogen classificeren als ATEX zone 2, moet aangetoond kunnen worden dat sprake is van een secundaire gevaarbron en dat voldoende ventilatie aanwezig is. Dat betekent dat er in minder dan 0,1% van de tijd sprake mag zijn van een brandbaar mengsel. Om dat aan te kunnen tonen, is kennis nodig van de in de praktijk optredende lekken. Er mogen lekken voorkomen in gasstations die leiden tot een concentratie boven de 100% LEL/LFL, zolang deze maar zelden (< 0,1% van de tijd) voorkomen. Door een gedegen onderhoudsregime moet door de eigenaar immers zorg worden gedragen voor een technisch dichte installatie.

<sup>9</sup> De eisen voor ventilatie van huidige behuizingen is vastgelegd in de NEN1059: 2019 en de NEN12186: 2014 waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende soorten behuizingen. De gekozen lekopening in de NEN1059: 2019 is vastgesteld op 1 mm<sup>2</sup> voor het zoneren van opstellingsruimten. Met de resultaten uit HyDelta 1.0 staat deze lekopening ter discussie voor het uitvoeren van de testen binnen dit werkpakket (voor het beproeven van de ventilatie en het vaststellen van de zonering). In HyDelta 1.0 is expliciet een aanbeveling gemaakt dat er verschil zou moeten zijn tussen een incident en een reguliere lekkage/storing.

<sup>10</sup> Het uitgangspunt voor het toepassen van ventilatie zal in dit onderzoeksprogramma allereerst gebaseerd zijn op bestaande behuizingen en geldende normen. Aanpassingen van de behuizingen ter verbetering van de ventilatie zullen, waar nodig, in samenspraak worden bepaald.

Dat betekent dat lekken die 0,1% van de tijd of vaker voor kunnen komen, niet mogen leiden tot een ontbrandbaar mengsel binnen de fysieke grenzen van de ATEX zone 2. Hier bovenop stelt de NPR7910-1 (2021) dat de ventilatievoud groter moet zijn dan 5 keer per uur. Tevens stelt deze norm: “In het geval van een kleine lekkage zou voldoende ventilatie aanwezig moeten zijn om het ontsnapte gas goed weg te kunnen ventileren” Een praktische interpretatie hiervan is dat de concentratie onder de LEL/LFL moet blijven.

Het is van belang om een getalswaarde te noemen en te onderbouwen voor deze “kleine lekkage”. Bovenstaande leidt tot de vraag hoe groot een lek kan zijn dat wél 0,1% van de tijd of vaker voorkomt. In hoofdstuk 3 van dit rapport wordt een nadere beschouwing gegeven over lekopeningen en daaruit blijkt dat er meerdere definities mogelijk zijn van een “kleine lekkage”:

- De NEN 1059: 2019 noemt een lekopening van 1 mm<sup>2</sup>
- De IGEM/SR/25 noemt een lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup> (P > 100mbar) en 0,025 mm<sup>2</sup> (P < 100 mbar)
- De NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) noemt een lekopening in de range van 0,025 mm<sup>2</sup> t/m 0,25 mm<sup>2</sup>
- Praktijkmetingen tonen aan dat bij de ventilatieopening van districtstations geen gasconcentraties van 100% LEL of hoger voorkomen. Uit aanvullende metingen met een high flow sampler, blijkt ook dat lekkages groter dan 40 l/u niet of nauwelijks voorkomen bij stations op aardgas. Wanneer we dit debiet (aan de veilige kant) omrekenen naar waterstof komen we op 125 l/u.

Binnen dit onderzoek zijn metingen uitgevoerd aan lekkages met openingen van 0,25 mm<sup>2</sup>, 0,025 mm<sup>2</sup> en bij een lekkage van 40 l/u aardgas en 125 l/u waterstof. Om een vergelijk te maken tussen het veiligheidsniveau van stations op aardgas en waterstof moet vooral gekeken worden naar de laatstgenoemde lekopeningen, omdat deze in de praktijk voorkomen.

Dit alles leidt tot de beantwoording van deelvraag 3. Voldoen de behuizingen aan de voorwaarden? Of, met andere woorden, is de situatie met waterstof net zo veilig of met aardgas?

#### ½ m<sup>3</sup> kast, vergelijking aardgas en waterstof

Bij een lek van 40 l/u aardgas is de maximum gasconcentratie in een ½ m<sup>3</sup> kast ongeveer 1 vol%, een mengsel onder de onderste brandbaarheidsgrens. Bij een vergelijkbaar lek voor waterstof (125 l/u), loopt de concentratie op tot 2,7 vol%. Direct bij de ventilatieopeningen worden vergelijkbare concentraties gemeten, met 3,2 vol% als lokale, tijdsafhankelijke uitschieter. Op een halve meter afstand van de behuizing is de concentratie in alle gevallen ver onder de ontbrandbaarheidsgrens. Bij metingen met lekopeningen van 0,25 mm<sup>2</sup> en 0,025 mm<sup>2</sup> zijn brandbare mengsels gemeten bij zowel aardgas als waterstof.

#### 4 m<sup>3</sup> kast, vergelijking aardgas en waterstof

Bij zowel aardgas (40 l/u) als waterstof (125 l/u) blijft de concentratie ver onder de onderste brandbaarheidsgrenzen. De gemeten concentraties bij waterstof zijn wel hoger, maar in beide gevallen veilig.

Bij metingen met lekopeningen van 0,25 mm<sup>2</sup> en 0,025 mm<sup>2</sup> zijn geen brandbare mengsels gemeten bij aardgas. Bij waterstof is een brandbaar mengsel gemeten bij een lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup>.

#### Minikast, vergelijking aardgas en waterstof

Er zijn enkele metingen uitgevoerd bij de mini-kast. Deze hadden als doel om input te geven aan eventueel vervolgonderzoek en zijn te beperkt om harde conclusies aan te verbinden. Een feitelijke waarneming is dat bij aardgas (40 l/u) geen ontbrandbare mengsel zijn gemeten, bij waterstof (125 l/u) wel.

#### Effecten toevoegen extra ventilatie

Vervolgens is onderzocht in hoeverre deze specifieke  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast aangepast kan worden zodat er een groter ventilatieoppervlakte ontstaat. Hierbij is gemeten met lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup> en 0,025 mm<sup>2</sup>. Het toevoegen van extra ventilatieoppervlakte heeft zeker effect, maar niet in die mate dat daarmee alle concentratie boven de 100% LEL/LFL vermeden kan worden. Ook bij een verdubbeling van de bovenventilatie (tot 4% van het vloeroppervlakte) en aanvullende toevoeging van onderventilatie (2% van het vloeroppervlakte) blijven brandbare mengsels waterstof ontstaan wanneer lekdebieten conform kentallen uit de normen worden toegepast. Er zijn geen metingen gedaan bij een lekdebiet van 125 l/u waterstof omdat de concentratie hier al onder 100% LEL/LFL bleven bij standaard ventilatie. Een ander interessant inzicht uit de proeven met additionele ventilatie is invloed op het verspreidingsgedrag van het gasmengsel. Bij aardgas wordt met name de gasconcentratie bovenin de behuizing lager bij het toevoegen van extra ventilatie, bij waterstof wordt juist de concentratie op lagere meetpunten lager. De verklaring hiervoor is dat bij een waterstoflek een “deken” ontstaat van een waterstof/luchtmengsel met een vergelijkbare concentratie. Dat beeld wordt bevestigd door resultaten van de CFD berekeningen. Het toevoegen van extra ventilatie zorgt er wel voor dat die deken dunner wordt maar niet dat de concentratie in die deken omlaag gaat. Het effect hiervan is dat extra ventilatie er wel voor zorgt dat er minder gas in de behuizing aanwezig is.

Er bestaat een sterk vermoeden dat de configuratie van het dak van de behuizing (de rand van het dak) leidt tot een hydraulische weerstand bij het ventileren, dat is ook één van de inzichten uit de CFD berekeningen. Hierdoor heeft zowel aardgas als waterstof onvoldoende mogelijkheid om uit de behuizing te ontsnappen.

## 9. Aanbevelingen

Uit dit onderzoek volgen de volgende aanbevelingen:

- Overweeg om concentratiemetingen in de standaard werkwijze op te nemen door deze te registreren voor onderzoek en monitoring over langere periode. Dit kan interessante inzichten geven in hoe populaties gasdrukregelstations zich ontwikkelen.
- Overweeg om de werkinstructies aan te passen zodat monteurs bij werkzaamheden aan gasstations een gasconcentratiemeting in de ventilatieopening uitvoeren voordat ze de kast openen. Door de gemeten gasconcentratie te registreren krijgen de netbeheerders met een beperkte extra inspanning meer inzicht in daadwerkelijk frequentie van het optreden van grotere lekken.
- Voor toepassing van waterstof in gasstations lijken aanvullende voorzorgsmaatregelen nodig te zijn om hetzelfde veiligheidsniveau te bereiken als voor aardgas. Bij het 4 m<sup>3</sup> kaststation is dit verschil duidelijker dan bij de ½ m<sup>3</sup> kast. Uitgaande van het voorzorgsprincipe, zijn voor zowel de ½ m<sup>3</sup> als de 4 m<sup>3</sup> kast aanvullende voorzorgsmaatregelen verstandig. Hier zijn verschillende mogelijkheden, zoals het verder vergroten van het ventilatieoppervlakte van de behuizing, het aanpassen van de behuizing, het plaatsen van hekwerk rondom minimaal een meter afstand van de behuizing of intensievere controle op lekken dan gebruikelijk is voor stations op aardgas.
- Nader onderzoek op het gebied van HAS-kasten is aan te raden voordat HAS-kasten omgezet worden naar waterstof. Zolang dat onderzoek nog niet is uitgevoerd, is het raadzaam om aanvullende voorzorgsmaatregelen toe te passen wanneer HAS-kasten voor waterstof worden toegepast. Dat onderzoek kan op twee verschillende manieren worden benaderd. Een mogelijkheid is om uit te gaan van de bestaande situatie, waarbij elke netbeheerder zijn eigen standaard behuizing heeft. Elke behuizing zal dan onderzocht worden d.m.v. CFD berekeningen en/of metingen. Een tweede aanpak is om te werken naar een nieuw ontwerp voor behuizingen van mini-kasten. Dan zullen een aantal concepten worden bedacht (in samenspraak met de constructeurs) en de effectiviteit van deze nieuwe concepten worden gecontroleerd met CFD berekeningen en/of metingen.
- Het is belangrijk dat de normcommissie van de NEN 1059 een uitspraak doet voor welke lekdebieten (voor welke specifieke situatie) de ventilatie een effectieve maatregel moet zijn. Lekopeningen en praktijkmetingen lijken nog factoren van elkaar af te staan.

## Referenties

- [1] NEN1059, *Gasvoorzieningssystemen - Gasdrukregel- en meetstations voor transport en distributie*, Nederlandse Norm, 2019.
- [2] van Woudenberg, "HyDelta 1.0 - WP1B Gasstations - Ventilatie," New Energy Coalition - TKI2020 - HyDelta, 2022.
- [3] G. Gaikhorst, O van Uchelen, "Ventilatie in kaststations - VEG gasinstituut," *GAS*, pp. 433 - 441, November 1971.
- [4] Ir. O. van Uchelen, "de Hinderwet en gasdrukregel- en meetstations," *GAS*, pp. 49-92, Februari 1968.
- [5] 2, IGM/SR/25 Edition, "HAZARDOUS AREA CLASSIFICATION OF NATURAL GAS," Institute of gas engineers and managers, 2010.
- [6] NEN-EN-IEC60079-10-1, "Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - explosive gas atmospheres (IEC-60079-10-1:2020, IDT)," Nederlandse norm, 2021.
- [7] Dr M J Ivings, Mr S Clarke, Dr S E Gant,, "Area classification for secondary releases from low pressure natural gas systems," HSE, 2008.
- [8] N. Vermeltfoort, M. van der Laan, "GT-220257 Concentratiemetingen in ventilatieopeningen van districtregelstations," Kiwa Technologie BV, 2022.
- [9] N. Vermeltfoort, M.van der Laan, "GT-220349 HI FLOW Sampler metingen bij gasstations," Kiwa Technology, 2022.
- [10] Charlotte Große, Melanie Eyßer, Stefanie Lehmann, Jenny Sammüller, Marco Behnke, Klaus Peters, "Research Project Methane Emission DSO Has Been Completed," *Energy, Wasser-praxis*, Vols. 5 - 2022, pp. 1 - 8, 2022.
- [11] DBI, "Methane emission estimation methode for the gas distribution grid (MEEM)," 2018.
- [12] Nestor Gonzalez Diez, "Impact of high speed hydrogen flow on system integrity and noise," TNO, 2021.
- [13] K. Pulles, M. van der Laan, "Zonering van gasstations, fase 2," Kiwa Technology, 2017.
- [14] Jaewon Lee, Sunghyun Cho, Hyungtae Cho, Seungsik Cho, Il Moon, Jungkwam Kim, "CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 161, pp. 436-446, 2022.
- [15] S. Giannissi, V. Shentsov, D. Melideo, B. Cariteau, D. Baraldi, A. Venetsanos and V. Molkov, "CFD benchmark on hydrogen release and dispersion in confined, naturally ventilated space with one vent," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, p. 2415–2429, 2015.
- [16] S. Giannissi, J. Hoyes, B. Chernyavskiy, P. Hooker, J. Hall, A. Venetsanos and V. Molkov, "CFD benchmark on hydrogen release and dispersion in a ventilated enclosure: passive ventilation and

the role of an external wind,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 6465-6477, 2015.

- [17] I. Toliás, S. Giannissi, A. Venetsanos, J. Keenan, V. Shentsov, D. Makarov, S. Coldrick, A. Kotchourko, K. Ren, O. Jedicke and D. Melideo, “Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 17, pp. 9050-9062, 2019.
- [18] S. Giannissi, I. Toliás, D. Melideo, D. Baraldi, V. Shentsov, D. Makarov, V. Molokov and A. Venetsanos, “On the CFD modelling of hydrogen dispersion at low-Reynolds number release in closed facility,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29745-29761, 2021.
- [19] J. Lee, S. Cho, H. Cho, S. Cho, I. Lee, I. Moon and J. Kim, “CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 161, pp. 436-446, 2022.
- [20] C. S. E. S. H. B. B. S. K. M. G. J. T. R. a. G. W. W. Brian D. Ehrhart, *HyRAM+ (Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models), Version 4.1.*, Sandia National Laboratories, April 2022.
- [21] S. van Woudenberg, “WP 1B Gas Stations D1B.3a Ventilation,” HyDelta, 2022.
- [22] NPR7910-1, *Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar - Deel 1: gasexplosiegevaar, gebaseerd op NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2015)*, Nederlandse Praktijkrichtlijn, 2021.
- [23] T. Sniffers, “High Flow Sampler report HAS-kasten / Kiwa 2020. Projectnr. 200600A,” 2018.
- [24] G. H. C. S. a. M. S. B. Lowesmith, “Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 5932-5939, 2009.



## I Overzicht samenstelling begeleidings- en sparringsgroep

Tabel 9 – Samenstelling begeleidingsgroep/sparringsgroep

| Naam   | Werkgever       | Begeleidingsgroep | Sparringsgroep |
|--|-----------------|-------------------|----------------|
| R. den Hartog  | Westland        | V                 |                |
| F. Verweij   | Westland        |                   | V              |
| J. Jonkman   | Rendo           | V                 |                |
| R. Scholten  | Rendo           | V                 |                |
| P. Verstegen   | Alliander       | V                 |                |
| R. Nispeling   | Alliander       |                   | V              |
| R. Verhoeve  | Stedin          | V                 |                |
| J. Palmers   | Coteq           |                   | V              |
| J. Voogt   | Enexis          | V                 |                |
| W. Koppenol  | Enexis          | V                 |                |
| R. van Hooijdonk   | Enexis          |                   | V              |
| M. van der Laan  | Kiwa Technology | V                 |                |
| S. van Woudenberg  | Kiwa Technology | V                 |                |
| <i>De sparringsgroep is betrokken bij het beoordelen van de concept-rapportages.</i> |                 |                   |                |

## II Berekening van ventilatie effecten

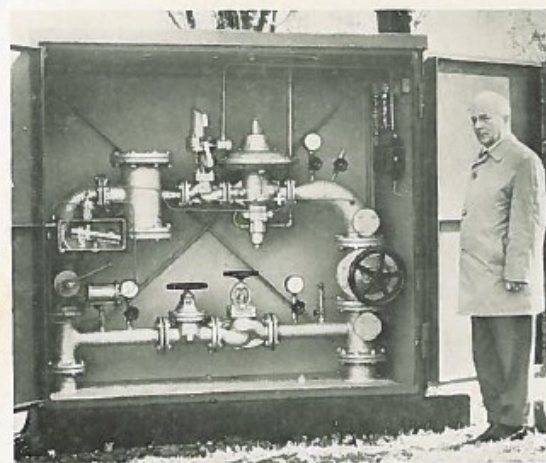
### 3. Berekening van ventilatie-effecten

Helmann<sup>1)</sup> denkt zich een ruimte met een inhoud van  $V \text{ m}^3$ .

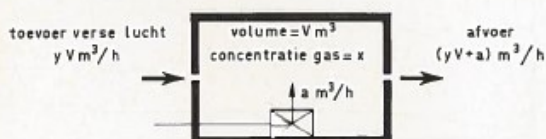
<sup>1)</sup> P. R. Helmann, Ingenieur Chef de Service au CERGA



Figuur 3 Kaststation voorzien van een hek



Figuur 4 Kaststation met geopende deuren, zodat de ingebouwde installatie is te zien (GAMOG, Zutphen)



Figuur 5 Schematische voorstelling van de ventilatie van een ruimte

waarin constant een hoeveelheid gas van  $a \text{ m}^3/\text{h}$  wordt gebracht. Het aantal malen dat een volume  $V$  verse lucht per uur wordt toegevoerd, stelt hij  $y$ , d.w.z. in een uur wordt aan het vertrek  $y V \text{ m}^3$  verse lucht toegevoerd en een volume van  $(y V + a) \text{ m}^3$  afgevoerd. Schematisch is dit voor te stellen als weergegeven in fig. 5.

Aangenomen dat de druk in de beschouwde ruimte gelijk blijft, kunnen wij de gasconcentratie  $x$  in deze ruimte na een tijd  $t$  berekenen door van de uitgestroomde gashoeveelheid af te trekken de hoeveelheid die is afgevoerd als gevolg van de ventilatie, dus:

$$V x = \int_0^t a dt - \int_0^t (y V + a) x dt$$

$$V x = at - (y V + a) \int_0^t x dt \text{ of}$$

$$\int_0^t x dt = -\frac{Vx - at}{yV + a} = \frac{at - Vx}{yV + a}$$

$$x = \frac{d}{dt} \frac{at - Vx}{yV + a} = \frac{1}{yV + a} \frac{d}{dt} (at - Vx)$$

$$x = \frac{a}{yV + a} - \frac{V}{yV + a} \frac{dx}{dt}$$

Deze vergelijking is ook te schrijven als:

$$\frac{dx}{dt} + \frac{yV + a}{V} x - \frac{a}{V} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

Wanneer wij voor  $\frac{yV + a}{V} = p$  en voor  $-\frac{a}{V} = q$  invullen, dan krijgt de vergelijking de gedaante van een lineaire differentiaalvergelijking, nl.

$$\frac{dx}{dt} + px + q = 0.$$

De algemene oplossing hiervoor is:

$$x = e^{-\int p dt} (C_1 - qe^{\int p dt} dt) \dots\dots\dots (2)$$

die men kan schrijven als:

$$x = e^{-(pt + C_2)} (C_1 - q \int e^{pt} dt + C_2 dt).$$

In deze vergelijking is  $\int e^{pt} dt = \frac{1}{p} e^{pt} + C_2 + C_3$

Stellen wij  $C_1 - C_3 q = C_4$ , dan wordt de vergelijking:

$$x = e^{-(pt + C_2)} (C_4 - \frac{q}{p} e^{pt} + C_2),$$

of uitgewerkt:

$$x = C_4 e^{-(pt + C_2)} - \frac{q}{p} e^{-(pt + C_2)} \cdot e^{pt} + C_2$$

$$x = C_4 e^{-(pt + C_2)} - \frac{q}{p} \text{ of}$$

$$x = C_4 e^{-C_2} \cdot e^{-pt} - \frac{q}{p}.$$

Wanneer wij  $C_1 e^{-C_2 t}$  vervangen door  $K$ , dan gaat de vergelijking over in:

$$x = K e^{-pt} - \frac{q}{p}$$

Vullen wij nu weer de oorspronkelijke waarde van  $p$  en  $q$  in, dan gaat de vergelijking over in:

$$x = K e^{-\frac{yV+a}{V}t} + \frac{a}{yV+a} \quad (3)$$

Om de waarde voor  $K$  te vinden, gaan wij uit van de voorwaarde dat voor  $t = 0$  ook  $x = 0$  moet worden gevonden, waaruit volgt dat:

$$K = -\frac{a}{yV+a}$$

Wanneer wij deze waarde in de vergelijking 3 invullen, dan krijgen wij:

$$x = \frac{a}{yV+a} (1 - e^{-\frac{yV+a}{V}t}) \quad (4)$$

Wanneer wij voor  $t$  oneindig invullen, vinden wij de gasconcentratie in de eindtoestand en gaat formule 4 over in:

$$x = \frac{a}{yV+a} \quad (5)$$

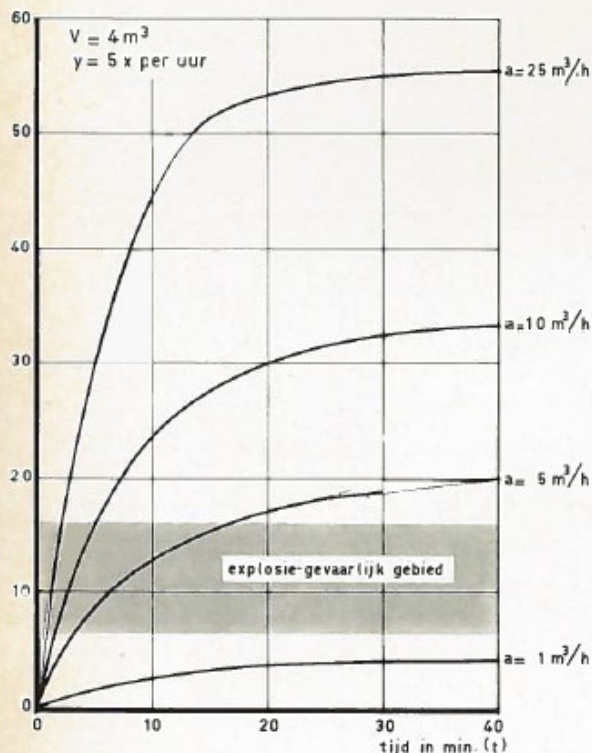
Is het ventilatievoud gelijk aan nul, dan wordt  $x$  gelijk aan 1 (d.w.z. de gasconcentratie 100%). Als  $a$  klein is t.o.v.  $yV$ , dan mogen wij stellen:

$$x = \frac{a}{yV} \quad (6)$$

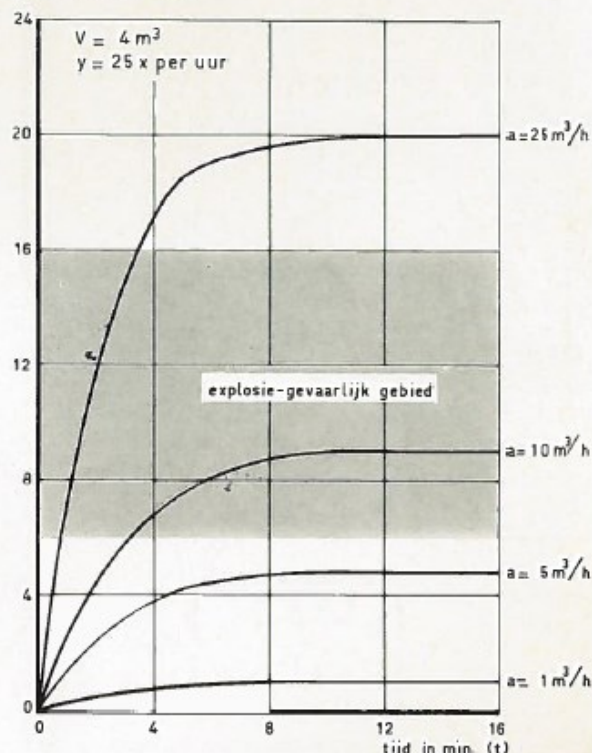
Met vergelijking 4 kan men het verloop van de gasconcentratie met de tijd berekenen bij een bepaalde gasuitstroming in de ruimte en een bepaald ventilatievoud van die ruimte. De uitkomst van deze berekening is weergegeven in fig. 6 voor een ruimte met een inhoud van  $4 \text{ m}^3$  (gedacht is aan een kaststation), bij een ventilatievoud van 5 en een ventilatievoud van 25.

Bij een slechte ventilatie (5-voudig) in een kaststation kan met een gaslek van  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  de onderste explosiegrens niet worden bereikt, terwijl bij een lek van  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  na 15 min de bovenste explosiegrens al overschreden en het mengsel on-

gasconcentratie in %



gasconcentratie in %



Figuur 6 Het verloop van de gasconcentratie in een ruimte van  $4 \text{ m}^3$  met de tijd bij een uitstroming van  $1 - 25 \text{ m}^3/\text{h}$  gas bij een 5-voudige en 25-voudige ventilatie



gevaarlijk wordt. Is de ventilatie normaal - waarmee wij een 20 - 25-voudige verversing van het volume per uur bedoelen - wordt, zoals wij zullen zien, bij een gaslek van  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  de onderste explosiegrens niet bereikt. Is het lek  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ , dan wordt na 3 min de bovenste explosiegrens reeds overschreden. Men bedenke wel dat bij de berekening steeds een volledige menging van gas en lucht is aangenomen.

Kortweg gezegd bereikt men bij een vergroting van het ventilatievoud van 5 naar 25, dat het gaslek mag toenemen van 1 naar  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  om nog net niet in het explosiegebied terecht te komen; m.a.w. men bereikt maar een kleine vergroting van de veiligheid door de toeneming van de ventilatie.

In fig. 7 is de berekening uitgevoerd voor een vertrek van  $25 \text{ m}^3$ , waarbij gedacht is aan een keuken. Aan de linkerzijde is een ventilatievoud = 1 gekozen, d.w.z. een keuken waarbij men heeft gezorgd dat de ventilatie gering is (kieren dichtgemaakt, ventilatie-openingen afgesloten). Ruwweg zien wij ook hier bij een vijfvoudige ventilatie dat er vijfmaal zoveel gas ( $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) kan ontsnappen vóórdat sprake is van een gevaarlijke situatie in vergelijking met een enkelvoudige ventilatie. Bij een keuken is deze vergroting wel belangrijk, omdat de kans op ontsnapping van gas in hoeveelheden van  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  nog veel minder aannemelijk is dan bij een kaststation.

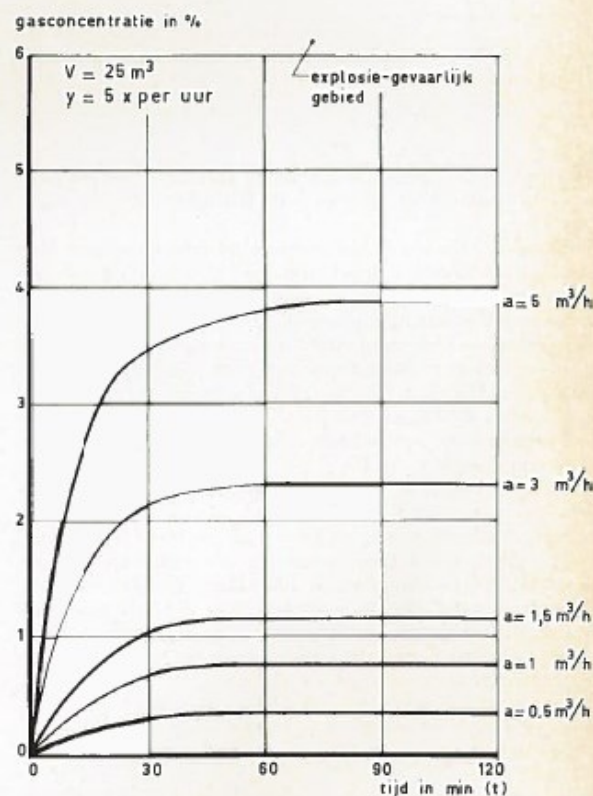
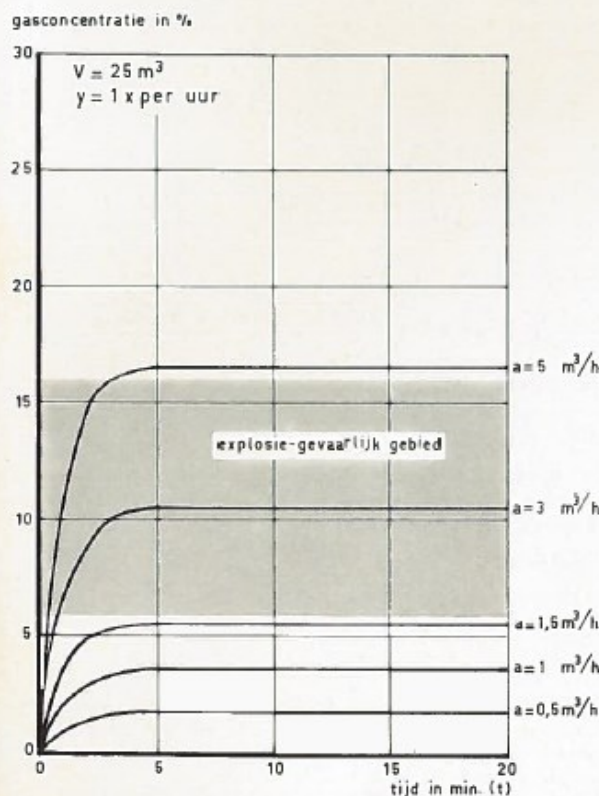
#### 4. Oorzaken van ventilatie

De natuurlijke ventilatie wordt (in tegenstelling tot mechanische ventilatie) in het algemeen veroorzaakt door drie omstandigheden:

- een verschil in druk voor de verschillende ventilatie-openingen als gevolg van windstromingen buiten de ruimte;
- temperatuurverschillen tussen het gas of gas-luchtmengsel in de ruimte en die van de lucht daarbuiten;
- verschil in soortelijke massa en gewicht tussen het gas of gas-luchtmengsel in de ruimte en die van de lucht daarbuiten.

#### 5. Ventilatie door de wind

Ventilatie tengevolge van de wind is in het algemeen het belangrijkste bij een kaststation. Kaststations staan in Nederland bijna uitsluitend op de grond opgesteld tussen een min of meer dichte bebouwing. Derhalve wisselt de wind om zulk een station in de praktijk zeer sterk, zowel in grootte als in richting. Doordat in de kast een zekere demping optreedt van de buiten de kast voorkomende verschijnselen, schommelen de te meten waarden niet zo sterk. Met enig geduld en het herhalen van de metingen vindt men gemiddelde waarden, die meer dan voldoende nauwkeurig zijn ten aanzien



Figuur 7 Het verloop van de gasconcentratie in een ruimte van  $25 \text{ m}^3$  met de tijd bij een uitstroming van  $1 - 5 \text{ m}^3/\text{h}$  bij een enkelvoudige en 5-voudige ventilatie

### III Zonebepaling

#### NPR-7910-1 (2021)

In de richtlijn wordt een reguliere lekkage in een gasstation geclassificeerd als secundaire gevarenbron met als definitie “een secundaire gevarenbron is een gevarenbron van waaruit het vrijkomen van een brandbare stof onder normaal bedrijf niet waarschijnlijk is, en indien dit wel gebeurt, niet frequent en slechts gedurende korte perioden” (zie par 5.5.2 van de NPR7910-1 (2021)). Daarbij is te denken aan minder dan 0,1% van de bedrijfsduur van een installatie of van de duur van een activiteit, waarbij de langste duur bepalend is zoals benoemd in de ATEX153 richtlijn. Tevens wordt in de IGEM/SR/25 Edition 2 (2010) [5] in appendix 7 aangehaald wat richtinggevende getallen zijn voor het falen van componenten in gasdrukregelstations. Deze genoemde waarden zijn vele malen lager dan 0,1% van de bedrijfsduur en mogen in die context als kort gezien worden. Van de Nederlandse situatie zijn dergelijke gegevens op het moment van schrijven niet voor alle netbeheerders beschikbaar.

Tevens dient opgemerkt te worden dat de basis voor bovenstaande situatie altijd een installatie in bedrijf betreft (en dus niet tijdens werkzaamheden). Tijdens in bedrijf wordt de volgende definitie genoemd in de NEN1059 (2019), paragraaf 7.3.11 een gasdrukregelinstallatie een secundaire gevarenbron is. De installatie moet bij in bedrijfname en tijdens bedrijf technisch gasdicht zijn. De opstellingsruimte van de gasdrukregelinstallatie wordt geclassificeerd als gevarenzone 1, of als gevarenzone 2 indien kan worden aangetoond dat het ventilatievoud van de opstellingsruimte groter is dan  $5 \text{ h}^{-1}$  (classificatie volgens NEN-EN-IEC 60079-10-1).

Naast de bepaling van de gevarenbron, speelt ook de ventilatie een belangrijke rol. Wanneer voor een behuizing wordt gekeken naar ventilatie, kan dit gedaan worden met behulp van de NPR7910-1 (2021)(Nederlandse Praktijkrichtlijn – gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar) [24]. In paragraaf 8 (ventilatie in de omgeving van een gevarenbron) wordt volgens praktijkrichtlijn wordt geëvalueerd welke ventilatiecapaciteit een behuizing zou moeten hebben. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen gematigde capaciteit ( $k = 0,25$ ) en voldoende capaciteit ( $k = 0,1$ ) waarbij de relatie tot het percentage LEL/LFL een maat is voor de beoordeling van deze capaciteit zoals beschreven in paragraaf 8.4.2.2 van de NPR. Tevens staat hier beschreven dat “bij voldoende capaciteit er bij de gevarenzone-indelingen geen rekening wordt gehouden met de kans dat het gas blijft hangen, aangezien de omstandigheden die daartoe kunnen leiden, slechts zelden voorkomen en dan gedurende korte tijd optreden”.

De berekening in de NPR7910-1 (2021) bestaat uit een beknopt stappenplan.

In stap 1 wordt de benodigde ventilatiecapaciteit van de behuizing berekend (zie 8.4).

$$VC = a \times \frac{100}{LEL} \times \frac{100}{k}$$

Met;

$$a = a_m \times \frac{1}{M} \times 25 \times 3,6$$

Voor gematigde capaciteit geldt dat  $k$  gelijk is aan 25% en voor voldoende capaciteit geldt dat  $k$  gelijk is aan 10%. Op deze manier zit in stap 1 een beoordeling van de LEL/LFL waarde (25% LEL of 10% LEL) voor de eis met betrekking tot de ventilatie, welke ventilatiecapaciteit is nodig om een lekdebiet terug te ventileren naar respectievelijk 25% LEL of 10% LEL. Daar dient wel opgemerkt te worden dat er vanuit wordt gegaan dat gas uniform verdund wordt, hetgeen beschreven wordt in paragraaf 8.4.2 van de NPR7910.

In stap 2 wordt de benodigde ventilatiecapaciteit gekoppeld aan het volume van de behuizing. Deze berekening behoort een ventilatievoud van de ruimte op te leveren die groter of gelijk is aan 5. De ventilatievoud, het aantal malen dat de lucht per uur wordt verversd (VV), wordt bepaald met de onderstaande formule;

$$VV = \frac{VC}{V}$$

Is de ventilatievoud VV groter dan 1 en kleiner dan 5, dan wordt de ventilatiecapaciteit beschouwd als een gematigde capaciteit (verdunding tot 25% LEL/LFL mogelijk). Wanneer de ventilatievoud VV groter of gelijk is aan 5, dan wordt de ventilatiecapaciteit beschouwd als voldoende capaciteit (verdunding tot 10% LEL/LFL mogelijk). Deze classificatie zegt vooral iets over de benodigde mate van verdunding bij een lekkage, de lokaal heersende concentratie in en rond de behuizing volgt niet uit deze analyse. Ook volgt niet uit deze analyse of de gebouwde geometrie van een behuizing geschikt is om adequaat te kunnen ventileren. Het legt enkel een eis neer waaraan de behuizing zou moeten voldoen.

### **Invloed van wind en temperatuur**

Natuurlijke ventilatie is gedreven door een verschil in druk (binnen en buiten de behuizing) of een verschil in concentratie. Men spreekt hier van convectie of diffusie. Beide processen verlopen relatief langzaam en worden eerder gedomineerd door externe factoren zoals wind en/of temperatuur. Ventilatie kan bijvoorbeeld plaatsvinden door wind die tegen de behuizing blaast en via de ventilatieopeningen de lucht in de behuizing verversd. De effectieve windsnelheid heeft dus invloed op de verversing van lucht door natuurlijke trek.

In het eerder aangehaalde artikel uit GAS [3] is eerder een conclusie gepresenteerd dat de ventilatie van een kaststation grotendeels door windinvloeden ontstaat waarbij vooral het totale oppervlak van de ventilatieopeningen en de mogelijkheid tot kruisventilatie van belang zijn. Ook wordt gesteld dat de kwaliteit van ventilatie maximaal rendeert wanneer de ventilatie openingen 5-10% van de kasthoogte onder het dak worden aangebracht. Plaatst men de ventilatie openingen te hoog, dan strijkt de dwarswind teveel over het gasmengsel in de kast en dient men het oppervlak van de ventilatieopeningen met een factor 2 of 3 te vermenigvuldigen om hetzelfde effect te krijgen.

Tevens kan een behuizing ventileren door een gering verschil in temperatuur. Op warme dagen is de temperatuur in de behuizing hoger dan in de buitenlucht. Dit leidt tot een drijvende kracht die vele malen kleiner is dan middels natuurlijke trek.

Met behulp van de effectieve windsnelheid kan dus de verversing van lucht in de behuizing berekend worden. Door de vereiste ventilatievoud (uit bovenstaande berekening) te vergelijken met de praktische ventilatievoud kan bepaald worden of de behuizing voldoende zal ventileren bij een bepaalde windsnelheid. In de NEN-EN-60079-10-1 (2021) wordt als stelregel 0,5 m/s aangehouden voor de windsnelheid in zowel een belemmerde als onbelemmerde gebied op een hoogte van 2 meter of minder boven het maaiveld (voor gas- en dampuitstromingen lichter dan lucht).

Binnen in een behuizing zal de effectieve windsnelheid in de behuizing echter aanzienlijk lager liggen. Hiervoor kan met behulp van de NEN-EN-60079-10-1 (2021), formule C.2 een inschatting worden gemaakt die rond de 0,1 tot 0,2 m/s ligt wanneer de windsnelheid buiten de behuizing 0,5 m/s bedraagt. In de NEN1059;2019 wordt als stelregel aangehouden dat het beschikbare ventilatieoppervlak voor kasten/kaststations minimaal 2% van het vloeroppervlak moet bedragen. Vanuit andere standaarden zoals de EN12186;2014 wordt een referentiewaarde van slechts 1% van het vloeroppervlak genoemd. Op basis van de windsnelheid en het beschikbare ventilatie oppervlak kan bepaald worden hoe vaak een inhoud van de behuizing per tijdseenheid verversd kan worden. Dit is de combinatie van ventilatiecapaciteit (wat is nodig) en effectieve windsnelheid (wat is beschikbaar).



Deze berekening is gemaakt voor de  $1/2\text{m}^3$  kast in appendix IV voor verschillende lekdebieten bij aardgas en waterstof. Het resultaat van deze berekening is een oordeel over de geometrie op basis van ventilatiecapaciteit (wat is minimaal nodig voor het verlagen van de concentratie onder 25% LEL/LFL of 10% LEL/LFL) bij een specifieke lekkage. De kleurcode groen geeft aan dat de behuizing theoretisch voldoende kan ventileren bij de gestelde lekkages, de kleur oranje geeft aan dat de ventilatie bij die omstandigheden onvoldoende kan ventileren. Deze waarden kunnen met de experimenten vergeleken worden om te kijken of dit bij benadering overeenkomt.

Ook kan met de bovenstaande gegevens (het type lekkage en de kwaliteit van de ventilatie) op basis van paragraaf 9.4 uit de NPR7910 (2021), tabel 7 worden vastgesteld wat de zonering bij de beschouwde situatie hoort.

In het geval van een lekkage vanuit een secundaire bron in een gesloten gebouw met beperkte ventilatie volgens paragraaf 8.4.2 en een gematigde capaciteit ( $1 \leq VV \leq 5$ ) leidt deze situatie tot een ATEX zonering 2. Ditzelfde geldt wanneer voldoende capaciteit ( $VV \geq 5$ ) beschikbaar is waarbij de afmeting van de zone in alle gevallen de gehele binnenzijde van een gasstation zal beslaan<sup>11</sup>.

Hierin verschilt de aanpak van aardgas ten opzichte van waterstof slechts in het feit dat de brandbaarheidsgrenzen anders zijn en dat de uitstroom van gas in het geval van een lekkage groter zal zijn voor waterstof in vergelijking met aardgas waardoor de afmetingen van de zone ook anders zullen uitpakken. Hiervoor is op moment van schrijven nog geen onderzoek beschikbaar.

Het veranderen van de zonering zal enkel plaats moeten vinden wanneer de classificering van de bron verandert van secundair naar primair. Ook kan gekeken worden naar het toepassen van een zone 2 NE (negligible extent, verwaarloosbare mate) waarbij de classificering wordt afgezwakt tot een verwaarloosbaar risico. Echter gaat men er dan vanuit dat een gasstation altijd technisch dicht is, waarbij uit eerder onderzoek [8] is gebleken dat dit in de praktijk niet haalbaar blijkt.

#### **Relatie veiligheidsafstanden en ATEX zonering**

In paragraaf 6.2 van de NEN 1059-2019 zijn veiligheidsafstanden bepaald voor alle categorieën gasstations ten opzichte van kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten. De vraag of en hoe deze veiligheidsafstanden aangepast moeten worden voor stations op waterstof ligt buiten de scope van dit onderzoek.

---

<sup>11</sup> De genoemde afstanden in tabel 7 zijn van toepassing bij lekdebieten tussen de 1 gram en 10 gram per seconde. Deze waarden refereren vooral naar de huidige situatie met aardgas en zullen in de toekomst met waterstof heroverwogen moeten worden.

### **NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021)**

De NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) (Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - explosive gas atmospheres) bevat een gedetailleerde beschrijving voor de zone bepaling van een technische installatie. Hierbij worden berekeningen gepresenteerd die, waar mogelijk, gecomplementeerd worden met praktische ervaring (of meetwaarden) als deze beschikbaar is.

In appendix C en D van deze internationale standaard staat in stappen beschreven hoe een dergelijke analyse moet worden uitgevoerd. Een typische analyse bestaat uit de volgende stappen;

- ✓ Bepaal het type van de lekbron (continue/ primair/ secundair).
- ✓ Bepaal het lekdebiet van de lekbron.
- ✓ Bepaal de mate van verdunning aan de hand van lekdebiet en ventilatie.
- ✓ Bepaal de bijbehorende ATEX zonering aan de hand de mate van de mate van verdunning, de beschikbaarheid van ventilatie (betrouwbaarheid) en het type van de lekbron.

Aan de hand van deze stappen is de zone bepaling van een gasdrukregelstation uitgevoerd. De stappen zijn genummerd om een duidelijke link te maken met bovenstaande lijst die zo als checklist gebruikt kan worden .

Stap 1; voor aardgas en waterstoflekkages wordt uitgegaan van een secundaire lekbron (“een secundaire gevaarbron is een gevaarbron van waaruit het vrijkomen van een brandbare stof onder normaal bedrijf niet waarschijnlijk is, en indien dit wel gebeurt, niet frequent en slechts gedurende korte perioden”).

Stap 2; voor aardgas en waterstof kiezen we even een kleine lekkage, dus bijvoorbeeld een lekbron van  $0,025 \text{ mm}^2$  bij een voordruk van 8 bar. Dit leidt tot een lekdebiet van  $0,18 \text{ m}^3/\text{h}$  aardgas en  $0,56 \text{ m}^3/\text{h}$  waterstof.

Normaliter zou in stap 3 aan de hand van figuur C.1 uit de NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) een inschatting gemaakt worden van de mate van verdunning in de behuizing. Op basis van experimenten zullen we leren dat bij een lekkage aardgas (of waterstof) bij  $0,025 \text{ mm}^2$  bij een voordruk van 8 bar de concentraties in de  $1/2 \text{ m}^3$  behuizing oplopen tot respectievelijk 6.0 vol% (voor aardgas) en 6.9 vol% (voor waterstof).

In paragraaf 3.6.2 van de norm wordt gesteld dat de mate van verdunning moet als laag worden beschouwd als de achtergrondconcentratie hoger is dan 25 % van de LEL/LFL. De volgende stap in het proces is het vellen van een oordeel over de beschikbaarheid van ventilatie.

De kwaliteit van de ventilatie wordt beïnvloed door de geometrie van de behuizing. Daarvoor wordt een kental voor de ventilatie-inefficiëntie toegevoegd (de f-waarde). De ventilatie-inefficiëntie is de mate waarin de lucht in de behuizing buiten de invloedssfeer van de lekopening goed gemengd wordt.

$f=1$ : de achtergrondconcentratie is uniform en de lekopening is ver verwijderd van de ventilatie openingen, zodat de concentratie bij de ventilatie openingen de gemiddelde achtergrond weergeeft concentratie.

$f>1$ : er is een gradiënt van achtergrondconcentratie in de behuizing als gevolg van inefficiënte menging en de ventilatie opening is “ver” verwijderd van de lekkage zelf, zodat de concentratie bij de uitlaat kleiner is dan de gemiddelde achtergrondconcentratie. De waarde van f kan tussen 1,5 liggen voor licht inefficiënt mengen en 5 voor zeer inefficiënt mengen. Deze factor zorgt voor correctie van niet

uniformiteit in luchtstromingspatronen in een behuizing met obstakels waar ventilatieopeningen niet optimaal gepositioneerd zijn voor maximale ventilatie effect.

Uit eerdere experimenten in HyDelta is gebleken dat de aanwezige gasconcentratie in een behuizing verschilt. Er is een concentratiegradiënt aanwezig die oploopt met de verticale positie in de behuizing voor veel van de uitgevoerde metingen. De ventilatie-inefficiëntie zal dus als hoog moeten worden ingeschat voor de 1/2m<sup>3</sup> behuizing.

Wanneer tabel D.1 “Zones for grade of release and effectiveness of ventilation” uit de NEN-EN-IEC-60079-10-1 (2021) wordt geraadpleegd, blijkt dat met het strikt volgen van de werkwijze en de resultaten uit de experimenten geconcludeerd zou moeten worden dat de mate van verdunning laag is (de achtergrondconcentratie hoger is dan 25 % van de LEL/LFL) waarbij een ATEX zone 1 moet worden toegekend. De sleutel tot succes ligt hier in het verbeteren van de ventilatie en het opschuiven naar links in de onderstaande tabel.

| Grade of release       | Effectiveness of Ventilation           |  |                                 |                 |                              |                 |                                     |
|------------------------|--|--|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|                        | High Dilution                          |  |                                 | Medium Dilution |                              |                 | Low Dilution                        |
|                        | Availability of ventilation            |  |                                 |                 |                              |                 |                                     |
|                        | Good                                   | Fair                                   | Poor                            | Good            | Fair                         | Poor            | Good, fair or poor                  |
| Continuous             | Non-hazardous (Zone 0 NE) <sup>a</sup> | Zone 2 (Zone 0 NE) <sup>a</sup>        | Zone 1 (Zone 0 NE) <sup>a</sup> | Zone 0          | Zone 0 + Zone 2 <sup>c</sup> | Zone 0 + Zone 1 | Zone 0                              |
| Primary                | Non-hazardous (Zone 1 NE) <sup>a</sup> | Zone 2 (Zone 1 NE) <sup>a</sup>        | Zone 2 (Zone 1 NE) <sup>a</sup> | Zone 1          | Zone 1 + Zone 2              | Zone 1 + Zone 2 | Zone 1 or zone 0 <sup>c</sup>       |
| Secondary <sup>b</sup> | Non-hazardous (Zone 2 NE) <sup>a</sup> | Non-hazardous (Zone 2 NE) <sup>a</sup> | Zone 2                          | Zone 2          | Zone 2                       | Zone 2          | Zone 1 and even Zone 0 <sup>d</sup> |

<sup>a</sup> Zone 0 NE, 1 NE or 2 NE indicates a theoretical zone which would be of negligible extent under normal conditions.

<sup>b</sup> The Zone 2 area created by a secondary grade of release may exceed that attributable to a primary or continuous grade of release; in this case, the greater distance should be taken.

<sup>c</sup> Zone 1 is not needed here. I.e. small Zone 0 is in the area where the release is not controlled by the ventilation and larger Zone2 for when ventilation fails.

<sup>d</sup> Will be Zone 0 if the ventilation is so weak and the release is such that in practice an explosive gas atmosphere exists virtually continuously (I.e. approaching a 'no ventilation' condition).

'+' signifies 'surrounded by'.

Availability of ventilation in naturally ventilated enclosed spaces is commonly not considered as good.

Deze hele redenatie staat of valt met het kiezen van het lekdebiet en het definiëren van een realistische lekkage. Onderzoek naar lekkages bij gasstations toont aan dat lekken in de praktijk kleiner zijn dan in normen genoemde lekkages [10] [9]. Voor deze specifieke lekdebieten zou de conclusie dus anders kunnen uitpakken. Dit is een belangrijk onderdeel van dit onderzoek, welke keuze leidt tot welke gevolgen en wat weten we op dit moment vanuit de praktijk.

## IV Berekening ventilatievoud geteste behuizingen

1/2m<sup>3</sup> kast – aardgas bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup>

| Afmetingen kast                              |         |            | Inputs                                       |           |            |
|--|---------|------------|--|-----------|------------|
| Lengte                                       | 1000    | [mm]       | k1 (NPR)                                     | 10        | %          |
| Breedte                                      | 500     | [mm]       | k2 (NPR)                                     | 25        | %          |
| Hoogte                                       | 1000    | [mm]       | LEL (aardgas)                                | 5,0       | vol%       |
| Inhoud - bruto                               | 0,5000  | [m3]       | M (aardgas)                                  | 18,636    | [g/mol]    |
| Af   | 0,0750  | [m3]       | Windsnelheid                                 | 0,5       | [m/s]      |
| Inhoud - netto                               | 0,4250  | [m3]       | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,1       | [m/s]      |
| Vloeroppervlak                               | 0,5     | [m2]       | Aard van lekkage volgens NPR7910             | secundair |            |
| Ventilatie                                   | 2,0%    |            | ATEX zonering volgens tabel 7, NPR7910       | zone 2    |            |
| Ventilatie oppervlak                         | 0,01    | [m2]       |  |           |            |
| Berekeningen                                 |         |            | 0,025 [mm2] bij 8 [bar]                      |           |            |
| WINDLUW                                      |         |            | 0,025 [mm2] bij 1 [bar]                      |           |            |
| Lekopening                                   | 0,025   | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,025     | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,04139 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,00917   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 0,17889 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,03996   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 14,31   | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 3,1968    | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 35,78   | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 7,992     | (goed)     |
| Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10    | [m/s]      | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6     |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6       |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5     |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5       |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 14,3    | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 3,2       | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 35,8    | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 8,0       | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5     |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Ja        |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Ja        |            |
| Concentratie in behuizing (experiment)       |         |            | Concentratie in behuizing (experiment)       |           |            |
| 6,0% (max)                                   |         |            | 1,0% (max)                                   |           |            |
| WIND bij 0,5m/s                              |         |            |  |           |            |
| Lekopening                                   | 0,025   | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,025     | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,04139 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,00917   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 0,17889 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,03996   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 14,31   | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 3,1968    | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 35,78   | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 7,992     | (goed)     |
| Windsnelheid                                 | 0,50    | [m/s]      | Windsnelheid                                 | 0,50      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0    |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0      |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4    |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4      |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 14,3    | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 3,2       | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 35,8    | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 8,0       | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4    |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4      |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Ja      |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Ja        |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Ja      |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Ja        |            |

## 1/2m<sup>3</sup> kast – aardgas bij een lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup>

| Afmetingen kast                              |         |            | Inputs                                       |           |            |
|--|---------|------------|--|-----------|------------|
| Lengte                                       | 1000    | [mm]       | k1 (NPR)                                     | 10        | %          |
| Breedte                                      | 500     | [mm]       | k2 (NPR)                                     | 25        | %          |
| Hoogte                                       | 1000    | [mm]       | LEL (aardgas)                                | 5,0       | vol%       |
| Inhoud - bruto                               | 0,5000  | [m3]       | M (aardgas)                                  | 18,636    | [g/mol]    |
| Af   | 0,0750  | [m3]       | Windsnelheid                                 | 0,5       | [m/s]      |
| Inhoud - netto                               | 0,4250  | [m3]       | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,1       | [m/s]      |
| Vloeroppervlak                               | 0,5     | [m2]       | Aard van lekkage volgens NPR7910             | secundair |            |
| Ventilatie                                   | 2,0%    |            | ATEX zonering volgens tabel 7, NPR7910       | zone 2    |            |
| Ventilatie oppervlak                         | 0,01    | [m2]       |  |           |            |
| Berekeningen                                 |         |            | 0,25 [mm2] bij 8 [bar]                       |           |            |
| WINDLUW                                      |         |            | 0,25 [mm2] bij 1 [bar]                       |           |            |
| Lekopening                                   | 0,25    | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,25      | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,41389 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,09167   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 1,78890 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,3996    | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 143,11  | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 31,97     | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 357,78  | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 79,92     | (goed)     |
| Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10    | [m/s]      | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6     |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6       |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5     |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5       |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 143,1   | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 32,0      | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 357,8   | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 79,9      | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5     |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee       |            |
| Concentratie in behuizing (experiment)       |         |            | Concentratie in behuizing (experiment)       |           |            |
| 26,6% (max)                                  |         |            | 11,9% (max)                                  |           |            |
| WIND bij 0,5m/s                              |         |            |  |           |            |
| Lekopening                                   | 0,25    | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,25      | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,04139 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,00917   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 1,78890 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,3996    | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 143,11  | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 31,97     | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 357,78  | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 79,92     | (goed)     |
| Windsnelheid                                 | 0,50    | [m/s]      | Windsnelheid                                 | 0,50      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0    |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0      |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4    |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4      |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 143,1   | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 32,0      | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 357,8   | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 79,9      | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4    |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4      |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Ja        |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee       |            |

## 1/2m<sup>3</sup> kast – waterstof bij een lekopening van 0,025 mm<sup>2</sup>

| Afmetingen kast                              |         |            | Inputs                                       |           |            |
|--|---------|------------|--|-----------|------------|
| Lengte                                       | 1000    | [mm]       | k1 (NPR)                                     | 10        | %          |
| Breedte                                      | 500     | [mm]       | k2 (NPR)                                     | 25        | %          |
| Hoogte                                       | 1000    | [mm]       | LEL (waterstof)                              | 4,0       | vol%       |
| Inhoud - bruto                               | 0,5000  | [m3]       | M (waterstof)                                | 2,016     | [g/mol]    |
| Af   | 0,0750  | [m3]       | Windsnelheid                                 | 0,5       | [m/s]      |
| Inhoud - netto                               | 0,4250  | [m3]       | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,1       | [m/s]      |
| Vloeroppervlak                               | 0,5     | [m2]       | Aard van lekkage volgens NPR7910             | secundair |            |
| Ventilatie                                   | 2,0%    |            | ATEX zonering volgens tabel 7, NPR7910       | zone 2    |            |
| Ventilatie oppervlak                         | 0,01    | [m2]       |  |           |            |
| Berekeningen                                 |         |            | 0,025 [mm2] bij 8 [bar]                      |           |            |
| WINDLUW                                      |         |            | 0,025 [mm2] bij 1 [bar]                      |           |            |
| Lekopening                                   | 0,025   | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,025     | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,01389 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,00306   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 0,55800 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,12500   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 55,80   | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 12,5      | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 139,50  | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 31,25     | (goed)     |
| Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10    | [m/s]      | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6     |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6       |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5     |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5       |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 55,8    | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 12,5      | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 139,5   | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 31,3      | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5     |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee       |            |
| WIND bij 0,5m/s                              |         |            |  |           |            |
| Lekopening                                   | 0,025   | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,025     | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,01389 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,00306   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 0,55800 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 0,12500   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 55,80   | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 12,5      | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 139,50  | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 31,25     | (goed)     |
| Windsnelheid                                 | 0,50    | [m/s]      | Windsnelheid                                 | 0,50      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0    |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0      |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4    |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4      |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 55,8    | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 12,5      | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 139,5   | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 31,3      | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4    |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4      |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Ja        |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Ja        |            |

## 1/2m<sup>3</sup> kast – waterstof bij een lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup>

| Afmetingen kast                              |         |            | Inputs                                       |           |            |
|--|---------|------------|--|-----------|------------|
| Lengte                                       | 1000    | [mm]       | k1 (NPR)                                     | 10        | %          |
| Breedte                                      | 500     | [mm]       | k2 (NPR)                                     | 25        | %          |
| Hoogte                                       | 1000    | [mm]       | LEL (waterstof)                              | 4,0       | vol%       |
| Inhoud - bruto                               | 0,5000  | [m3]       | M (waterstof)                                | 2,016     | [g/mol]    |
| Af   | 0,0750  | [m3]       | Windsnelheid                                 | 0,5       | [m/s]      |
| Inhoud - netto                               | 0,4250  | [m3]       | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,1       | [m/s]      |
| Vloeroppervlak                               | 0,5     | [m2]       | Aard van lekkage volgens NPR7910             | secundair |            |
| Ventilatie                                   | 2,0%    |            | ATEX zonering volgens tabel 7, NPR7910       | zone 2    |            |
| Ventilatie oppervlak                         | 0,01    | [m2]       |  |           |            |
| Berekeningen                                 |         |            | 0,25 [mm2] bij 8 [bar]                       |           |            |
| 0,25 [mm2] bij 1 [bar]                       |         |            |  |           |            |
| WINDLUW                                      |         |            |  |           |            |
| Lekopening                                   | 0,25    | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,25      | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,13944 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,03111   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 5,58000 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 1,25000   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 558,00  | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 125       | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 1395,00 | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 312,5     | (goed)     |
| Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10    | [m/s]      | Gehinderde windsnelheid, 20% effectief       | 0,10      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6     |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 3,6       |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5     |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 8,5       |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 558,0   | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 125,0     | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 1395,0  | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 312,5     | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5     |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 8,5       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee       |            |
| Concentratie in behuizing (experiment)       |         |            | Concentratie in behuizing (experiment)       |           |            |
| 24,0% (max)                                  |         |            | 11,0% (max)                                  |           |            |
| WIND bij 0,5m/s                              |         |            |  |           |            |
| Lekopening                                   | 0,25    | [mm2]      | Lekopening                                   | 0,25      | [mm2]      |
| Druk   | 8       | [bar]      | Druk   | 1         | [bar]      |
| Flow   | Sonic   |            | Flow   | Sonic     |            |
| Formula for flow correct ?                   | VALID   |            | Formula for flow correct ?                   | VALID     |            |
| Lekdebiet (a_m)                              | 0,13944 | [g/s]      | Lekdebiet (a_m)                              | 0,03111   | [g/s]      |
| Lekdebiet (a)                                | 5,58000 | [m3/h(n)]  | Lekdebiet (a)                                | 1,25000   | [m3/h(n)]  |
| VC (25%) - minimaal nodig                    | 558,00  | (gematigd) | VC (25%) - minimaal nodig                    | 125       | (gematigd) |
| VC (10%) - minimaal nodig                    | 1395,00 | (goed)     | VC (10%) - minimaal nodig                    | 312,5     | (goed)     |
| Windsnelheid                                 | 0,50    | [m/s]      | Windsnelheid                                 | 0,50      | [m/s]      |
| Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0    |            | Ventilatiecapaciteit obv windsnelheid        | 18,0      |            |
| Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4    |            | Ventilatievoud (Vv)                          | 42,4      |            |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 558,0   | (gematigd) | Wat is minimaal nodig als VC (voor 25% LEL)  | 125,0     | (gematigd) |
| Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 1395,0  | (goed)     | Wat is minimaal nodig als VC (voor 10% LEL)  | 312,5     | (goed)     |
| Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4    |            | Welke Vv is beschikbaar obv windsnelheid     | 42,4      |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 25% LEL ? | Nee       |            |
| Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee     |            | Is de Vv voldoende voor minder dan 10% LEL ? | Nee       |            |



## V Foto's van de testopstelling



Figuur 56. De 1/2 m3 kast in een buitensituatie



Figuur 57. De 1/2 m3 kast met daarin het gasregelstation



Figuur 58. Het 4m<sup>3</sup> kaststation in een buitensituatie



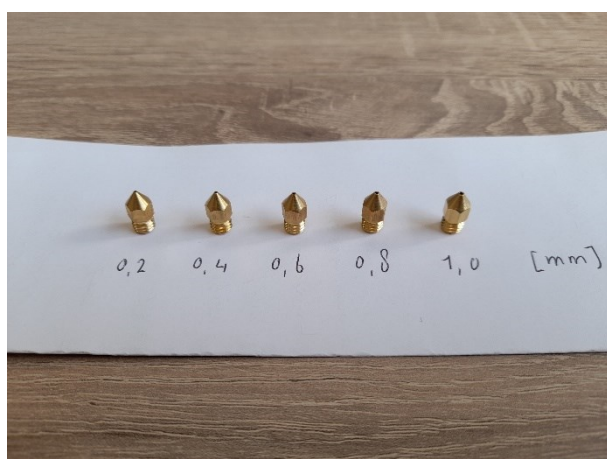
Figuur 59. Het 4m<sup>3</sup> kaststation met daarin het gasdrukregelstation



Figuur 60. De HAS kast in een buitensituatie



Figuur 61. De HAS kast met daarin de hogedrukafleverstation



Figuur 62. Set nozzles met verschillende diameters



Figuur 63. Nozzle met lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup> in de 1/2m<sup>3</sup> kast



Figuur 64. MultiRAE Lite IR Aardgasdetector



Figuur 65. Riken Keiki NP 1000 Waterstofdetector



## VI Gebruikte meetapparatuur

Tabel 10 – Gebruikte meetapparatuur details

| Omschrijving             | Fabrikaat en type                        | Kiwa-nr |
|--------------------------|--|---------|
| Aardgasdetector          | MultiRAE - Lite IR                       | 114033  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114034  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114036  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114037  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114038  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114039  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114040  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114041  |
| Aardgasdetector          | MultiRAE Lite IR                         | 114043  |
| Waterstofdetector        | Riken Keiki NP 1000                      | -       |
| MFC (aardgas/ waterstof) | Bronkhorst,<br>type F-201CV-RAD-22-V     | -       |
| MFC (aardgas/ waterstof) | Bronkhorst,<br>type F-203AV-M50-RBD-FF-V | -       |

### Aardgas

- De Multirae hebben een meetbereik van 0 - 100% LEL/LFL en 0-100vol% aardgas).
- De vier Multirae sensoren die zijn gebruikt als meetpunt op grotere afstand (op 0,5 m en 1 m benedenwinds) van het gasdrukregelstation hebben een meetbereik van 0 - 100% LEL/LFL en 0-100vol% aardgas.

### Waterstof

- De Riken Keiki sensoren hebben een meetbereik van 0 – 100 vol% waterstof.
- De vier Multirae sensoren die zijn gebruikt als meetpunt op grotere afstand (op 0,5 m en 1 m benedenwinds) van het gasdrukregelstation hebben een meetbereik van 0-1000 ppm waterstof. Tevens zijn deze specifieke Multirae sensoren uitgerust met een 0 – 100% LEL/LFL sensor voor waterstof.

## VII Overzicht alle metingen

### 1/2m<sup>3</sup> kast

Tabel 6 – 1/2m<sup>3</sup> kast resultaten – windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas ≥ 5 vol% en LEL/LFL waterstof ≥ 4 vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |             | 1/2m <sup>3</sup> kast             |  |       |       |       |          |       |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|-------|-------|-------|----------|-------|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |       |       |       |          |       |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |
| 0,179                            | 8           | 6,0%                               | 6,0%                                       | 6,0%  | 2,0%  | 0,1%  | -        | 100   |
| 0,04                             | 1           | 1,0%                               | 1,0%                                       | 0,5%  | 0,1%  | 0,4%  | -        | -     |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |       |       |       |          |       |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |
| 1,8 *                            | 8           | 26,6%                              | 21,5%                                      | 25,1% | 2,7%  | 23,1% | 7,0%     | >1000 |
| 0,4                              | 1           | 11,9%                              | 11,3%                                      | 11,6% | 4,0%  | 10,8% | -        | -     |
| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |             | 1/2m <sup>3</sup> kast             |  |       |       |       |          |       |
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |       |       |       |          |       |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |
| 0,558                            | 8           | 6,9%                               | 6,3%                                       | 6,4%  | 4,5%  | 6,4%  | -        | 580   |
| 0,125                            | 1           | 2,7%                               | 2,9%                                       | 2,6%  | 1,4%  | 3,2%  | -        | 260   |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |       |       |       |          |       |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |       |       |       | op 0,5 m |       |
|                                  |             |                                    | N  | O     | Z     | W     | %LFL     | ppm   |
| 5,8                              | 8           | 24,0%                              | 20,0%                                      | 20,0% | 18,0% | 21,0% | 18,0%    | >1000 |
| 1,25                             | 1           | 11,0%                              | 10,0%                                      | 11,0% | 6,5%  | 11,0% | -        | 580   |

\*) lekkage levert aardgas concentraties op boven de UEL maar omdat altijd ergens een overgang in concentratie zal zijn die binnen de brandbaarheidsgrenzen van het gas valt, zijn deze waarden rood weergegeven.

## 4m<sup>3</sup> kaststation

Tabel 7 – 4m<sup>3</sup> kaststation resultaten - windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas  $\geq 5$  vol% en LEL/LFL waterstof  $\geq 4$  vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |             | 4m <sup>3</sup> kaststation        |  |      |      |      |          |     |
|----------------------------------|-------------|------------------------------------|--|------|------|------|----------|-----|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |      |      |      |          |     |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |
| 0,179                            | 8           | 0,8%                               | 0,2%                                       | 0,7% | 0,4% | 0,4% | -        | -   |
| 0,04                             | 1           | 0,1%                               | 0,0%                                       | 0,0% | 0,0% | 0,1% | -        | -   |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |      |      |      |          |     |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |
| 1,8                              | 8           | 4,3%                               | 2,6%                                       | 1,0% | 3,7% | 3,7% | -        | -   |
| 0,4                              | 1           | 1,1%                               | 0,9%                                       | 0,3% | 0,5% | 1,8% | -        | -   |
| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |             | 4m <sup>3</sup> kaststation        |  |      |      |      |          |     |
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |             |                                    |  |      |      |      |          |     |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |
| 0,558                            | 8           | 2,2%                               | 0,9%                                       | 1,6% | 1,1% | 1,3% | -        | 70  |
| 0,125                            | 1           | 1,0%                               | 0,3%                                       | 0,4% | 0,4% | 0,4% | -        | 10  |
| Lekopening 0,25 mm <sup>2</sup>  |             |                                    |  |      |      |      |          |     |
| Lekdebiet<br>nm <sup>3</sup> /hr | Druk<br>bar | Max concentratie behuizing<br>vol% | Max concentratie ventilatieopening<br>vol% |      |      |      | op 0,5 m |     |
|                                  |             |                                    | N  | O    | Z    | W    | %LFL     | ppm |
| 5,8                              | 8           | 12,0%                              | 9,1%                                       | 4,0% | 9,3% | 6,0% | -        | 570 |
| 1,25                             | 1           | 5,5%                               | 4,1%                                       | 4,0% | 3,6% | 4,1% | -        | 120 |

## HAS kast

De inhoud van de HAS kast bedraagt circa 0,06 m<sup>3</sup>. Alleen gemeten met 0,025 mm<sup>2</sup>, geen data beschikbaar voor de lekopening van 0,25 mm<sup>2</sup>.

Tabel 8 – HAS kast resultaten – windluwe situatie voor aardgas (boven) en waterstof (onder). LEL/LFL aardgas ≥ 5 vol% en LEL/LFL waterstof ≥ 4 vol%. Buiten de behuizing is gemeten op 0,5 meter afstand.

| <b>Aardgas/ natural gas</b>      |      | HAS kast                   |                                    |        |          |     |
|----------------------------------|------|----------------------------|------------------------------------|--------|----------|-----|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |      |                            |                                    |        |          |     |
| Lekdebiet                        | Druk | Max concentratie behuizing | Max concentratie ventilatieopening |        | op 0,5 m |     |
| nm <sup>3</sup> /hr              | bar  | vol%                       | vol%                               |        |          |     |
|                                  |      |                            | Links                              | Rechts | %LFL     | ppm |
| 0,179                            | 8    | 10,3%                      | 9,1%                               | 7,9%   | 0,0%     | 0   |
| 0,04                             | 1    | 3,3%                       | 3,9%                               | 2,7%   | 0,0%     | 0   |

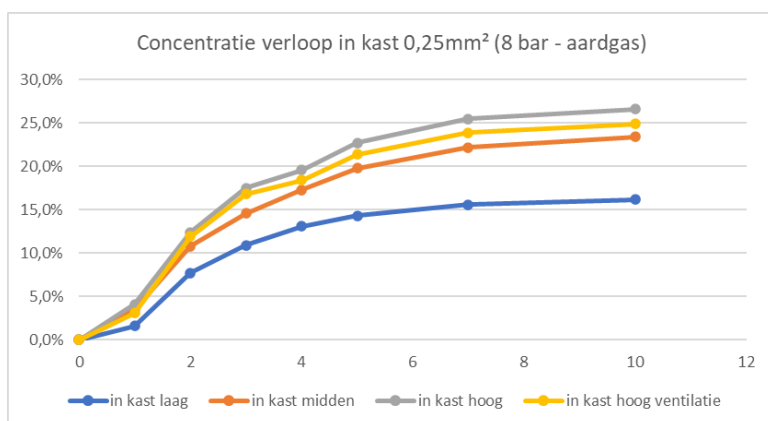
| <b>Waterstof/ hydrogen</b>       |      | HAS kast                   |                                    |        |          |     |
|----------------------------------|------|----------------------------|------------------------------------|--------|----------|-----|
| Lekopening 0,025 mm <sup>2</sup> |      |                            |                                    |        |          |     |
| Lekdebiet                        | Druk | Max concentratie behuizing | Max concentratie ventilatieopening |        | op 0,5 m |     |
| nm <sup>3</sup> /hr              | bar  | vol%                       | vol%                               |        |          |     |
|                                  |      |                            | Links                              | Rechts | %LFL     | ppm |
| 0,558 *                          | 8    | 12,0%                      | 12,0%                              | 12,0%  | 0,0%     | 410 |
| 0,125                            | 1    | 4,8%                       | 5,6%                               | 4,1%   | 0,0%     | 20  |

\* experiment voortijdig gestopt (ivm veiligheid) door snelle opbouw van waterstof concentratie.

## VIII Meetresultaten – $\frac{1}{2}$ m<sup>3</sup> kast

### Lekdebiet 1,8 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – aardgas (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 8 bar

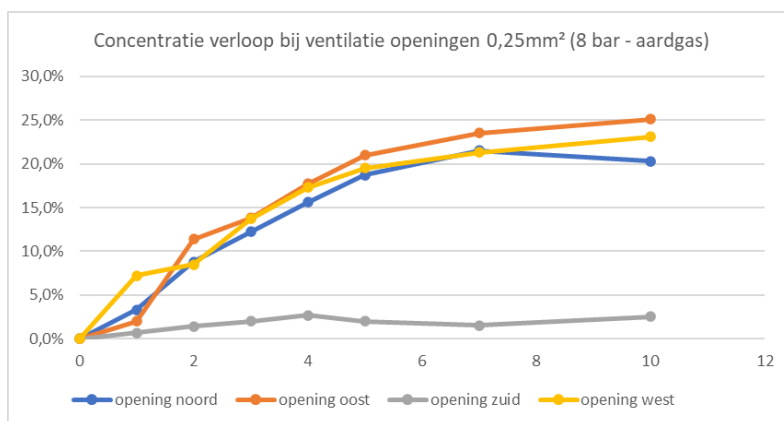
Bij een lek van 1,8 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h loopt de aardgas concentratie in de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> behuizing op tot een maximum concentratie van 13 vol%. De test is korter dan andere testen in verband met de aanzienlijke gasconcentratie die in korte tijd opbouwt in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 66. Concentratie (vol % CH<sub>4</sub>) in de  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,8 m<sup>3</sup>(n)/h

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord    | Oost     | Zuid    | West     |
|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| Concentratie aardgas | 21,5vol% | 25,1vol% | 2,7vol% | 23,1vol% |



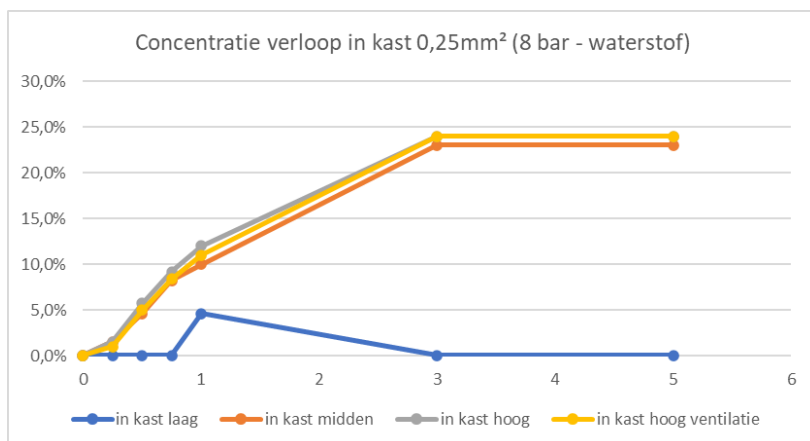
Figuur 67. Concentratie (vol% CH<sub>4</sub>) bij de ventilatieopeningen van een  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,8 m<sup>3</sup>(n)/h

Gedurende het experiment loopt de concentratie aardgas buiten het gasdrukregelstation incidenteel op tot maximaal 7% LEL/LFL. Deze concentratie wordt gemeten op 0,5 meter (west) afstand van de behuizing op 1 meter hoogte vanaf de grond.



## Lekdebiet 5,6 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – waterstof (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 8 bar

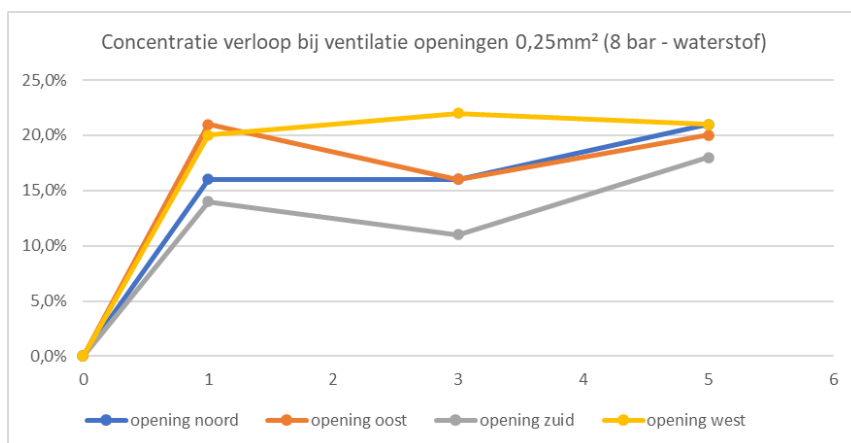
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 5,6 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 22 vol% in de behuizing. De test is korter dan andere testen in verband met de aanzienlijke gasconcentratie die in korte tijd opbouwt in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is geen beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten. Door de hoge concentratie is de experiment na korte tijd gestopt.



Figuur 68. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 5,6 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Noord     | Oost      | Zuid      | West      |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Concentratie waterstof | 21,0 vol% | 21,0 vol% | 18,0 vol% | 22,0 vol% |

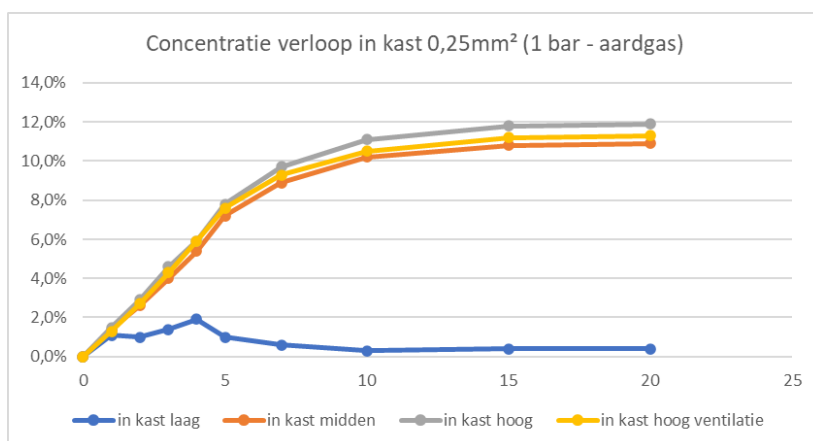


Figuur 69. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 5,6 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Gedurende het experiment loopt de concentratie waterstof buiten het gasdrukregelstation incidenteel op tot maximaal 18% LEL/LFL. Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en die werd ook bereikt.

## Lekdebiet $0,40 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,25 \text{ mm}^2$ ) – 1 bar

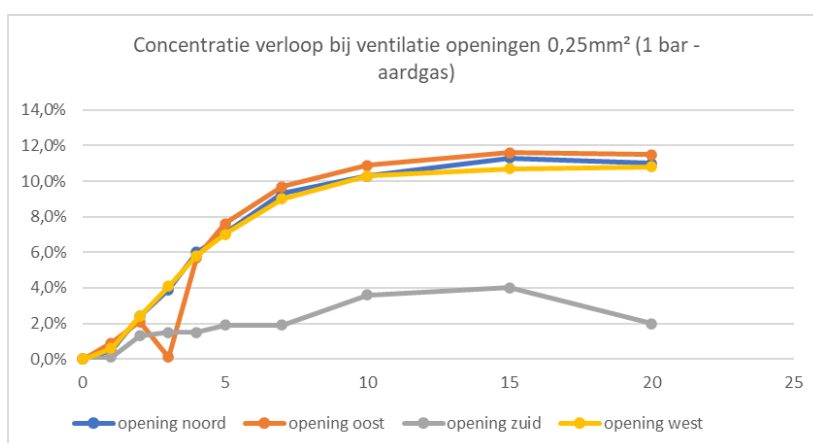
Bij een lek van  $0,40 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  behuizing op tot een maximum concentratie van 11,9 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is geen invloed van wind waargenomen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 70. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,40 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord    | Oost     | Zuid    | West     |
|----------------------|----------|----------|---------|----------|
| Concentratie aardgas | 11,3vol% | 11,6vol% | 4,0vol% | 10,8vol% |

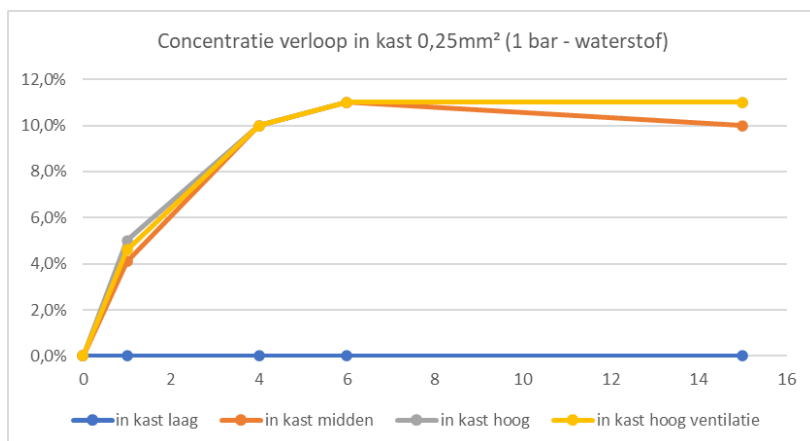


Figuur 71. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatieopeningen van een  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,40 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de 0,1% LEL/LFL gebleven.

## Lekdebiet $1,25 \text{ m}^3/\text{hr}$ – waterstof (lekopening $0,25 \text{ mm}^2$ ) – 1 bar

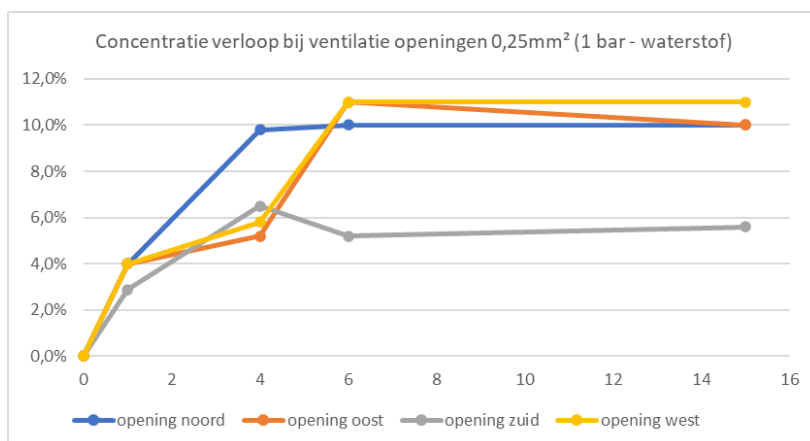
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa  $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 11 vol% in de behuizing. De test is korter dan andere testen in verband met de aanzienlijke gasconcentratie die in korte tijd opbouwt in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is geen beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden). Door de hoge concentratie is de experiment na korte tijd gestopt.



Figuur 72. Concentratie (vol %  $\text{H}_2$ ) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $1,25 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).

|                        | Noord     | Oost      | Zuid     | West      |
|------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Concentratie waterstof | 10,0 vol% | 11,0 vol% | 6,5 vol% | 11,0 vol% |



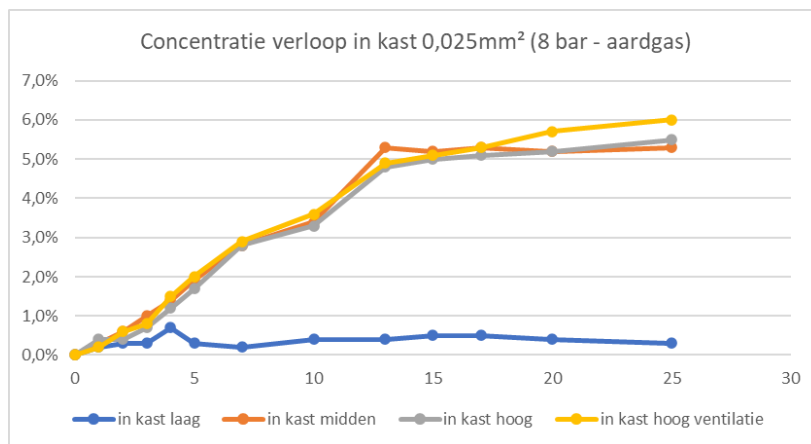
Figuur 73. Concentratie (vol %  $\text{H}_2$ ) bij de ventilatie openingen in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $1,25 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 580 ppm bereikt.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.

## Lekdebiet $0,18 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 8 bar

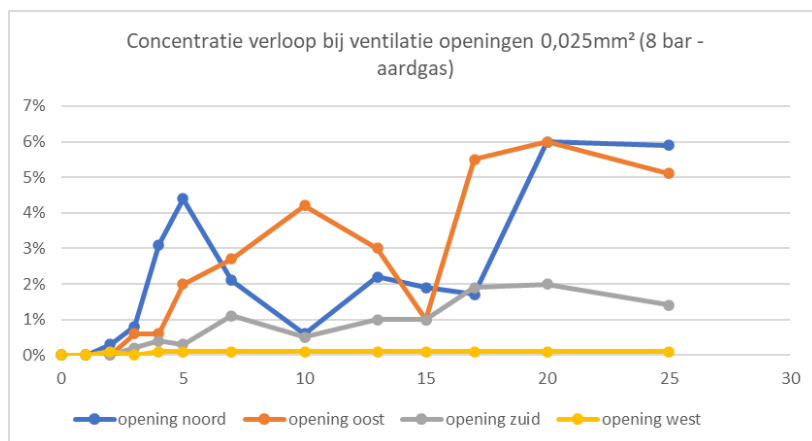
Bij de eerste test is de kleinste lekopening conform de IGEM/SR/25 Edition 2 gecreëerd bij een voordruk van 8 bar in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  behuizing waarbij de concentratie oploopt tot maximaal 6,0 vol%. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 74. Concentratie (vol% aardgas) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lek van  $0,025 \text{ mm}^2$  bij 8 bar

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatieopeningen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 6,0vol% | 6,0vol% | 2,0vol% | 0,1vol% |



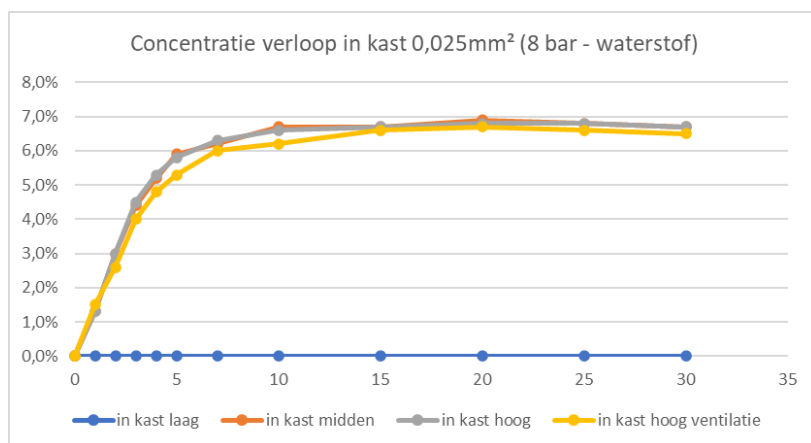
Figuur 75. Concentratie bij de ventilatie openingen (vol% aardgas) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lek van  $0,025 \text{ mm}^2$  bij 8 bar

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met sensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd incidenteel 100 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werden geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

## Lekdebiet $0,56 \text{ m}^3/\text{hr}$ – waterstof (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 8 bar

Wanneer met dezelfde voordruk het gedefinieerde lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa  $0,56 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 6,9 vol% in de behuizing.

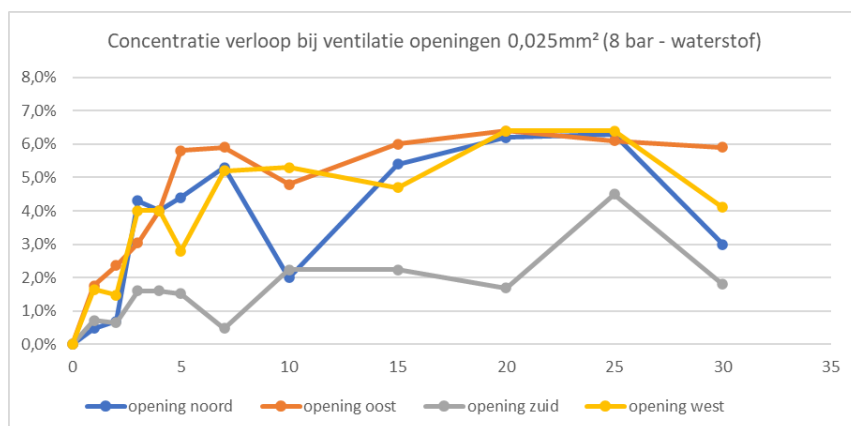
De concentratie op alle meetpunten in de behuizing stabiliseert na ongeveer 10 minuten en blijft daarna nagenoeg gelijk tijdens de hele test. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 76. Concentratie (vol %  $\text{H}_2$ ) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,56 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie waterstof | 6,3vol% | 6,4vol% | 4,5vol% | 6,4vol% |



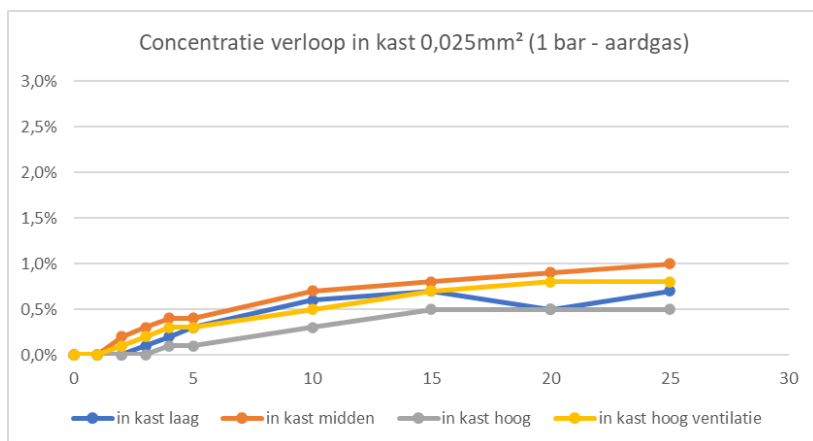
Figuur 77. Concentratie (vol%  $\text{H}_2$ ) bij de ventilatie openingen in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet  $0,56 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werden waarden tot 580 ppm bereikt aan de westzijde van de behuizing. Op een afstand van 0,5 meter werden geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.

### Lekdebiet $0,04 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 1 bar

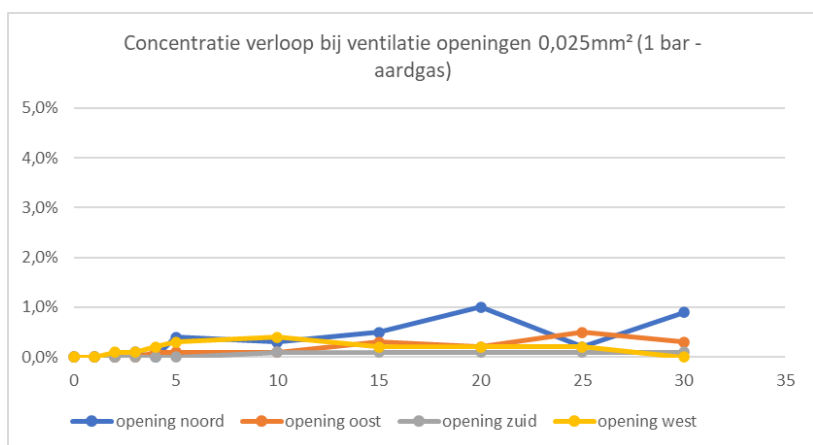
Bij een lek van  $0,040 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  behuizing op tot een maximum concentratie van 1 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is minimale invloed van wind waargenomen waardoor lichte preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 78. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,040 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 1,0vol% | 0,5vol% | 0,1vol% | 0,4vol% |

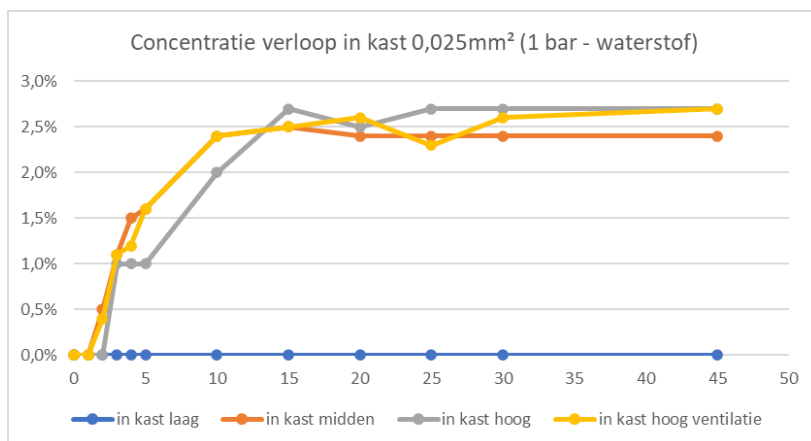


Figuur 79. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatieopeningen van een  $\frac{1}{2} \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,040 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de 0,1% LEL/LFL gebleven.

## Lekdebiet 0,125 m<sup>3</sup>/hr – waterstof (lekopening 0,025 mm<sup>2</sup>) – 1 bar

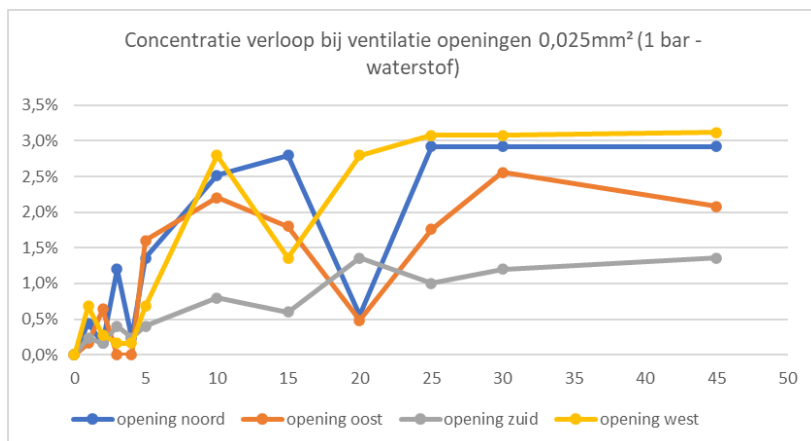
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 0,125 m<sup>3</sup>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 2,7 vol% in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoort. Gedurende deze meting is geen beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).



Figuur 80. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).

|                        | Noord    | Oost     | Zuid     | West     |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Concentratie waterstof | 2,9 vol% | 2,6 vol% | 1,4 vol% | 3,1 vol% |



Figuur 81. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de ½ m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 260 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

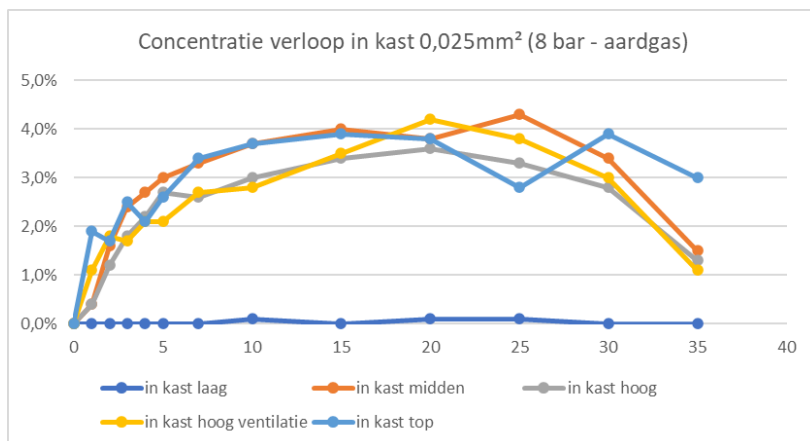
\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.



## IX Meetresultaten – 4 m<sup>3</sup> kaststation

### Lekdebiet 1,8 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – aardgas (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 8 bar

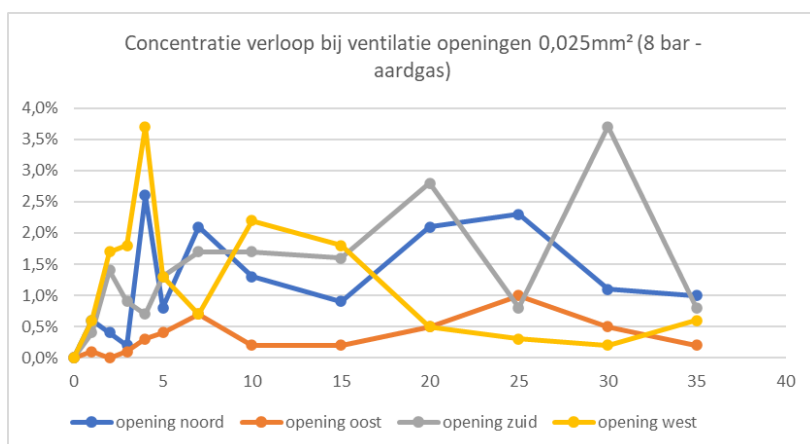
Bij een lek van 1,8 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h loopt de aardgas concentratie in de 4 m<sup>3</sup> behuizing op tot een maximum concentratie van 4,3 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 82. Concentratie (vol % CH<sub>4</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,8 m<sup>3</sup>(n)/h

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 2,6vol% | 1,0vol% | 3,7vol% | 3,7vol% |

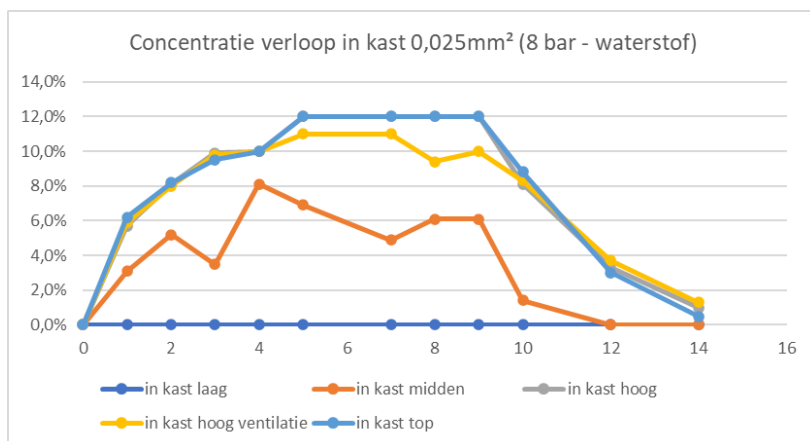


Figuur 83. Concentratie (vol% CH<sub>4</sub>) bij de ventilatieopeningen van een 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,8 m<sup>3</sup>(n)/h

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met sensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd incidenteel 100 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werden geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

## Lekdebiet 5,6 m<sup>3</sup>/hr – waterstof (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 8 bar

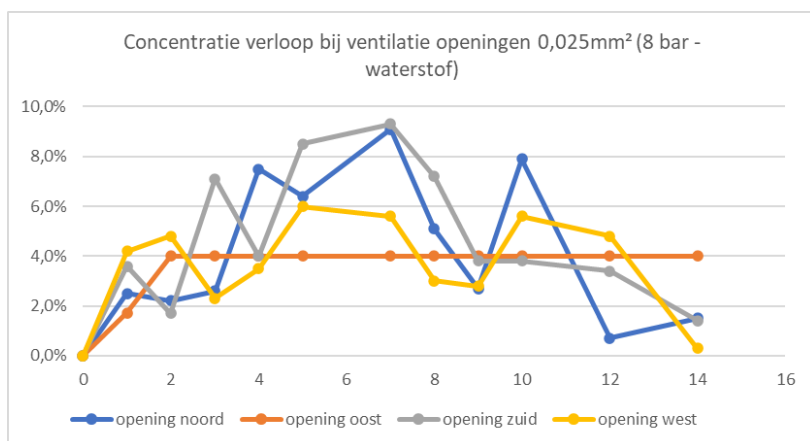
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 5,6 m<sup>3</sup>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 12 vol% in de behuizing. De test is korter dan andere testen in verband met de aanzienlijke gasconcentratie die in korte tijd opbouwt in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoort. Gedurende deze meting is slechts een geringe beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).



Figuur 84. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 5,6 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).

|                        | Noord    | Oost     | Zuid     | West     |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Concentratie waterstof | 9,1 vol% | 4,0 vol% | 9,3 vol% | 6,0 vol% |



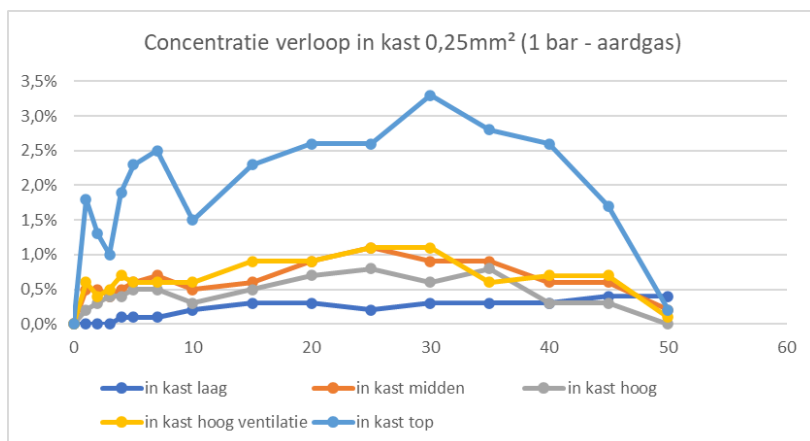
Figuur 85. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 5,6 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 570 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.

## Lekdebiet 0,4 m<sup>3</sup>/hr – aardgas (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 1 bar

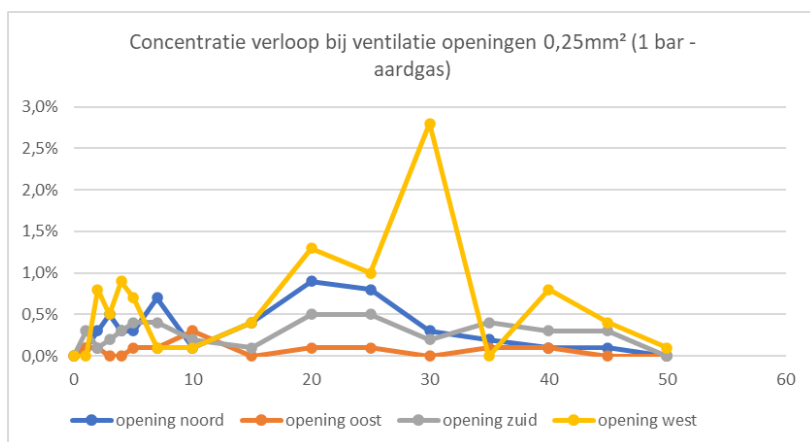
Bij een lek van 0,4 m<sup>3</sup>/h loopt de aardgas concentratie in de 4 m<sup>3</sup> behuizing op tot een maximum concentratie van 3,3 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 86. Concentratie (vol % CH<sub>4</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,4 m<sup>3</sup>(n)/h

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 0,9vol% | 0,3vol% | 0,5vol% | 2,8vol% |

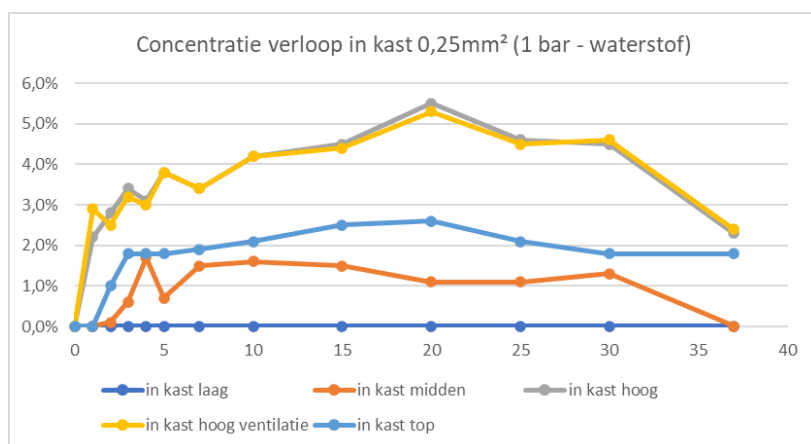


Figuur 87. Concentratie (vol% CH<sub>4</sub>) bij de ventilatieopeningen van een 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,4 m<sup>3</sup>(n)/h

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de 0,1% LEL/LFL gebleven.

## Lekdebiet 1,25 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – waterstof (lekopening 0,25 mm<sup>2</sup>) – 1 bar

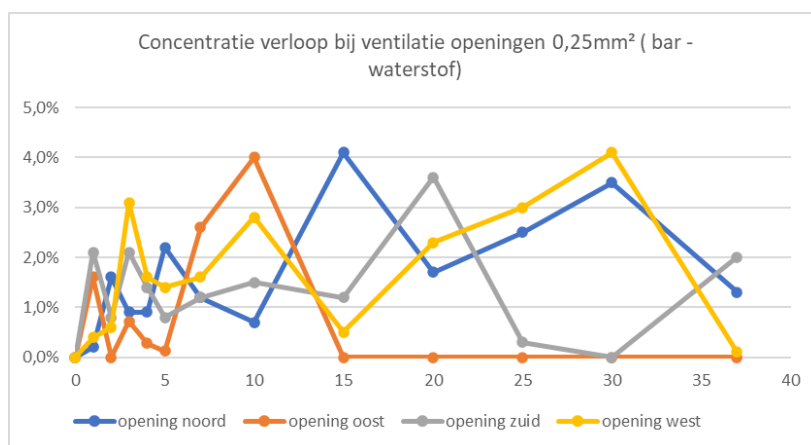
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 1,25 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 5,5 vol% in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een geringe beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden). Door de hoge concentratie is de experiment na korte tijd gestopt.



Figuur 88. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,25 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).

|                        | Noord    | Oost     | Zuid     | West     |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Concentratie waterstof | 4,1 vol% | 4,0 vol% | 3,6 vol% | 4,1 vol% |



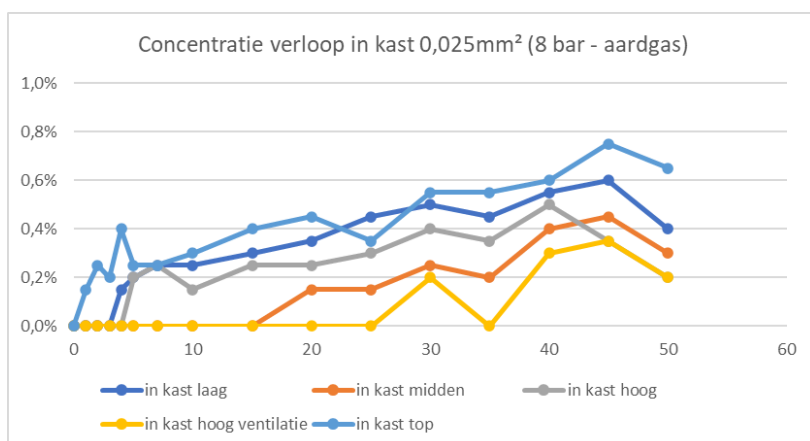
Figuur 89. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 1,25 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 120 ppm bereikt.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.

## Lekdebiet $0,18 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 8 bar

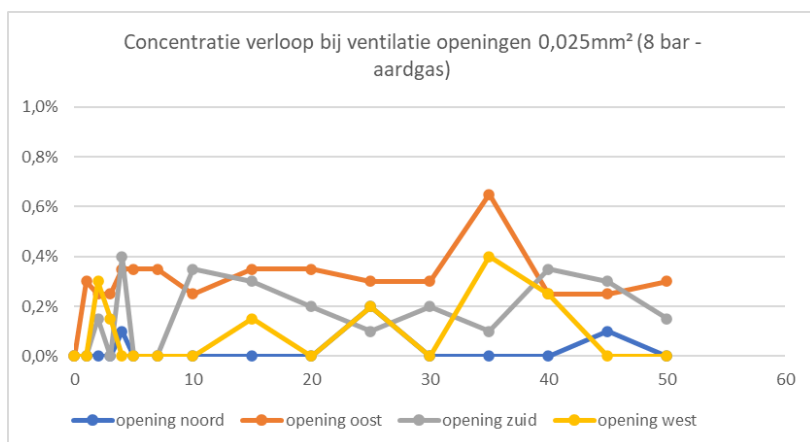
Bij een lek van  $0,18 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de  $4 \text{ m}^3$  behuizing op tot een maximum concentratie van  $0,8 \text{ vol\%}$ . De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 90. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de  $4 \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,18 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord               | Oost                | Zuid                | West                |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Concentratie aardgas | $0,2 \text{ vol\%}$ | $0,7 \text{ vol\%}$ | $0,4 \text{ vol\%}$ | $0,4 \text{ vol\%}$ |

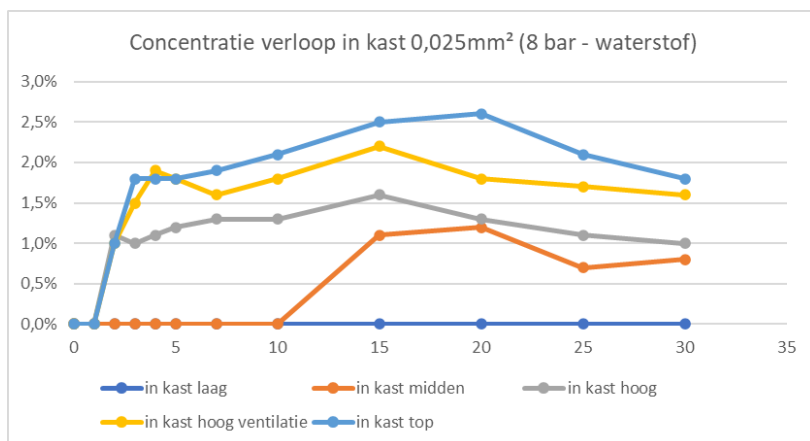


Figuur 91. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatie openingen van een  $4 \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,18 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van  $0,5$  meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de  $0,1\% \text{ LEL/LFL}$  gebleven.

## Lekdebiet 0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – waterstof (lekopening 0,025 mm<sup>2</sup>) – 8 bar

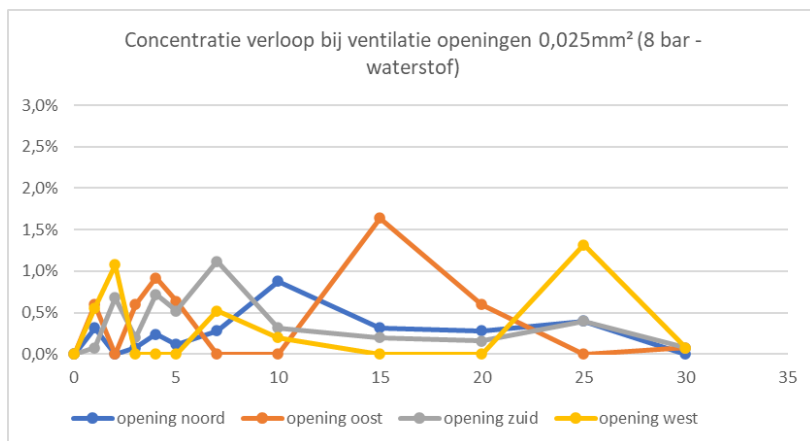
Wanneer met dezelfde voordruk het gedefinieerde lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 0,56 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 2,6 vol% in de behuizing. De concentratie op alle meetpunten in de behuizing stabiliseert na ongeveer 10 minuten en blijft daarna nagenoeg gelijk tijdens de hele test. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 92. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,56 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie waterstof | 0,9vol% | 1,6vol% | 1,1vol% | 1,3vol% |



Figuur 93. Concentratie (vol% H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet 0,56 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

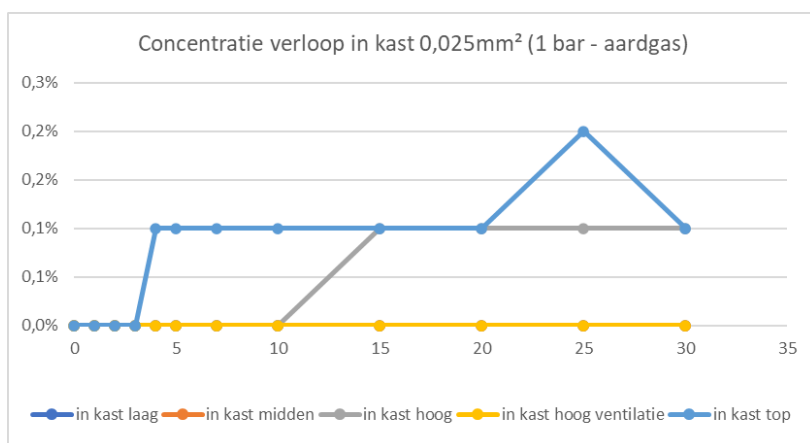
Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 70 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.



## Lekdebiet $0,04 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 1 bar

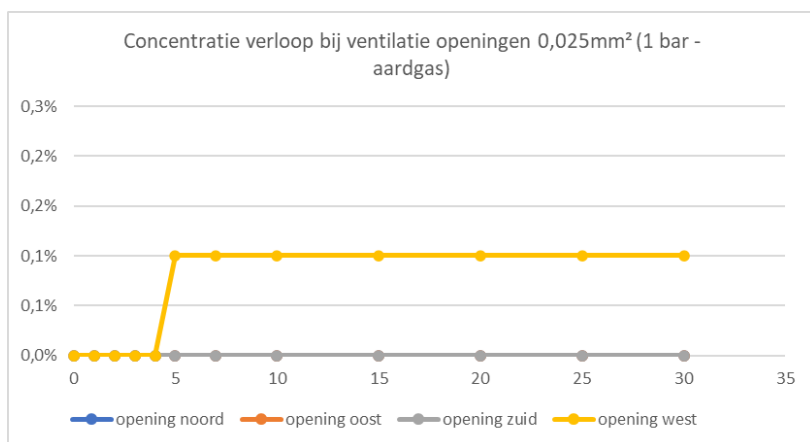
Bij een lek van  $0,04 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de  $4 \text{ m}^3$  behuizing op tot een maximum concentratie van  $0,2 \text{ vol\%}$ . De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 94. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de  $4 \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,04 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Noord   | Oost    | Zuid    | West    |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Concentratie aardgas | 0,0vol% | 0,0vol% | 0,0vol% | 0,1vol% |

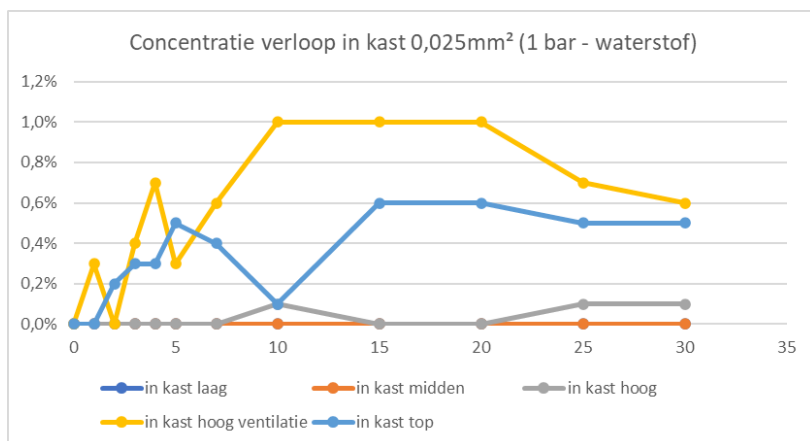


Figuur 95. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatieopeningen van een  $4 \text{ m}^3$  kast bij een lekdebiet van  $0,04 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de  $0,1\% \text{ LEL/LFL}$  gebleven.

## Lekdebiet 0,125 m<sup>3</sup>/hr – waterstof (lekopening 0,025 mm<sup>2</sup>) – 1 bar

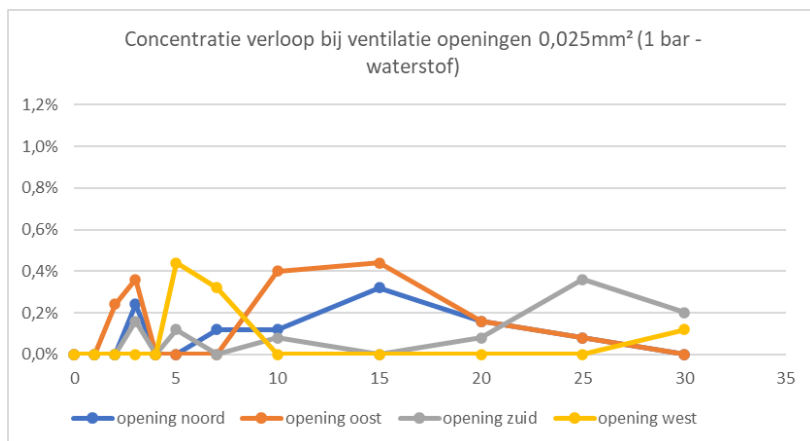
Wanneer met dezelfde voordruk een lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 0,125 m<sup>3</sup>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie van maximaal 1,0 vol% in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoorde. Gedurende deze meting is geen beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).



Figuur 96. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof \*

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten (en seconden).

|                        | Noord    | Oost     | Zuid     | West     |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Concentratie waterstof | 0,3 vol% | 0,4 vol% | 0,4 vol% | 0,4 vol% |



Figuur 97. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de 4 m<sup>3</sup> kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

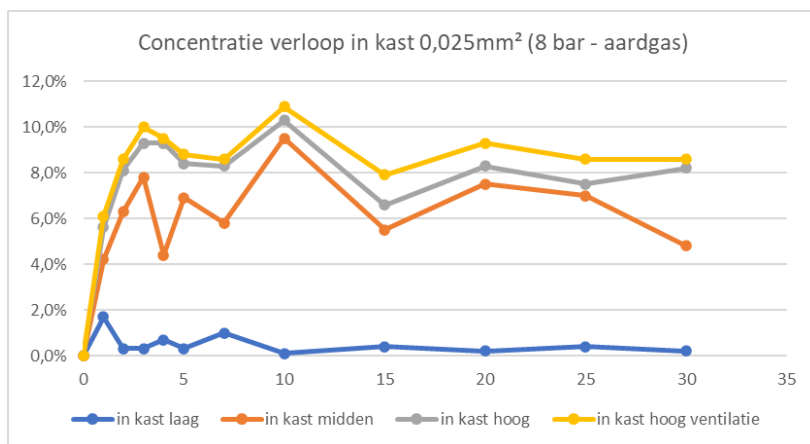
Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd slechts 10 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

\*) de sensor laag in de behuizing heeft alleen nulwaarden geregistreerd gedurende deze test.

## X Meetresultaten – HAS kast

### Lekdebiet $0,18 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 8 bar

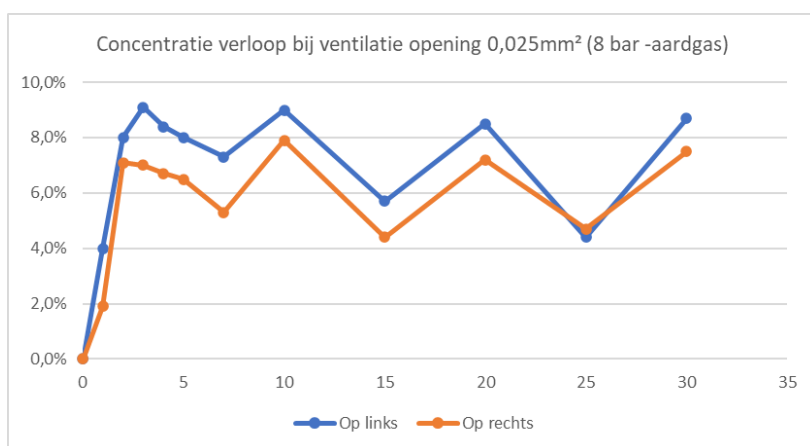
Bij een lek van  $0,18 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de HAS kast op tot een maximum concentratie van 10,9 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 98. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de HAS kast bij een lekdebiet van  $0,18 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Links voor | Rechts voor |
|----------------------|------------|-------------|
| Concentratie aardgas | 9,1vol%    | 7,9vol%     |

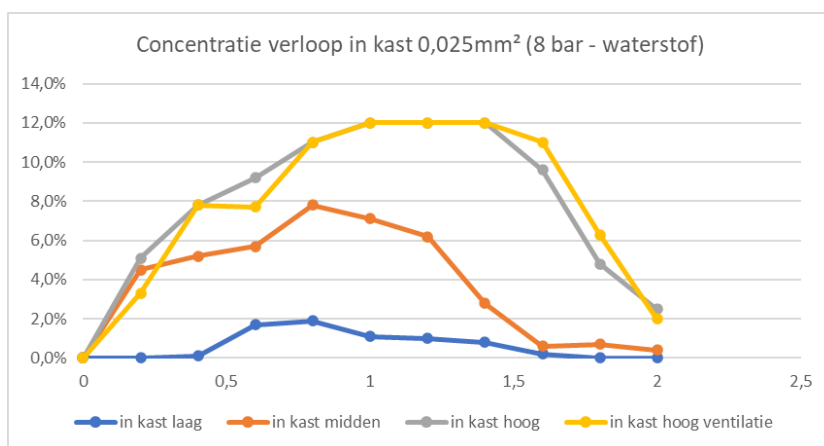


Figuur 99. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatieopeningen van een HAS kast bij een lekdebiet van  $0,18 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de 0,1% LEL/LFL gebleven.

### Lekdebiet $0,56 \text{ m}^3/\text{hr}$ – waterstof (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 8 bar

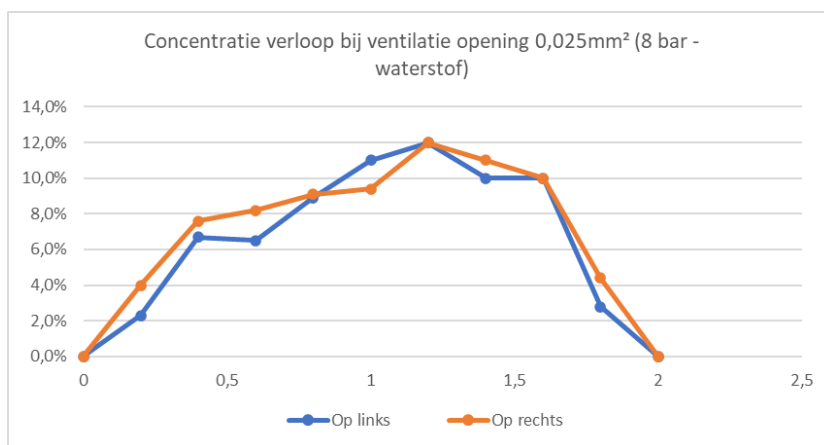
Wanneer met dezelfde voordruk het gedefinieerde lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa  $0,56 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dit lek leidde tot een waterstof concentratie in de HAS kast van maximaal 12 vol%. De test is korter dan andere testen in verband met de aanzienlijke gasconcentratie die in korte tijd opbouwt in de behuizing. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoort. Gedurende deze meting is een geringe beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 100. Concentratie (vol % waterstof) in de HAS kast bij een lekdebiet van  $0,56 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Links voor | Rechts voor |
|------------------------|------------|-------------|
| Concentratie waterstof | 12,0vol%   | 12,0vol%    |

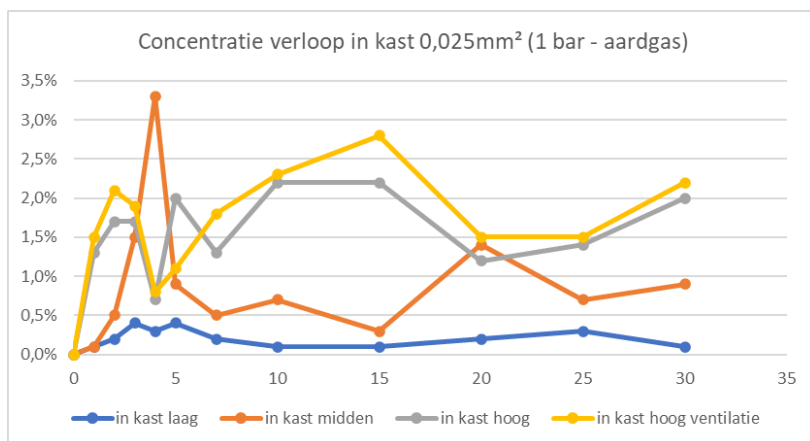


Figuur 101. Concentratie (vol %  $\text{H}_2$ ) bij de ventilatie openingen in de HAS kast bij een lekdebiet van  $0,56 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$  waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd 410 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.

## Lekdebiet $0,04 \text{ m}^3/\text{hr}$ – aardgas (lekopening $0,025 \text{ mm}^2$ ) – 1 bar

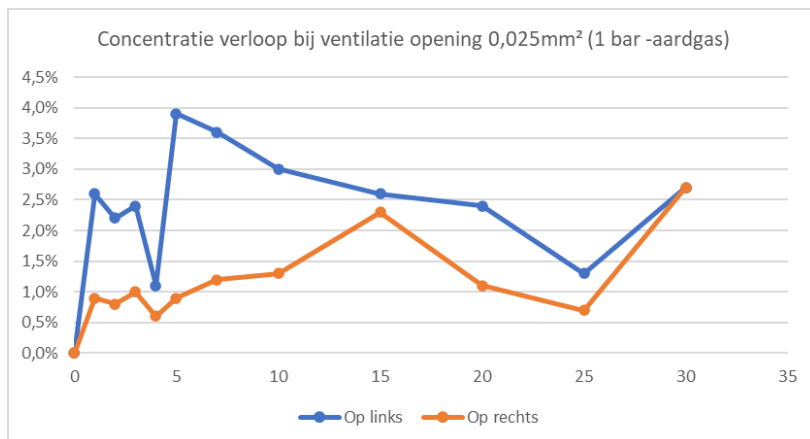
Bij een lek van  $0,04 \text{ m}^3/\text{h}$  loopt de aardgas concentratie in de HAS kast op tot een maximum concentratie van 3,3 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een kleine invloed van wind waargenomen waardoor preferentie ontstaat op de ventilatieopeningen. In de onderstaande grafiek is de concentratie aardgas (in vol%) weergegeven als functie van de tijd in minuten.



Figuur 102. Concentratie (vol %  $\text{CH}_4$ ) in de HAS kast bij een lekdebiet van  $0,04 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie aardgas (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie aardgas weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                      | Links voor | Rechts voor |
|----------------------|------------|-------------|
| Concentratie aardgas | 3,9vol%    | 2,7vol%     |

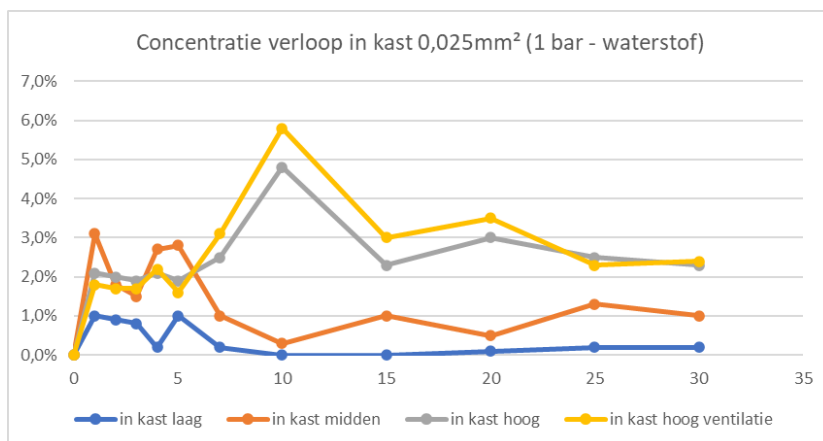


Figuur 103. Concentratie (vol%  $\text{CH}_4$ ) bij de ventilatieopeningen van een HAS kast bij een lekdebiet van  $0,04 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$

Op een afstand van 0,5 meter van de kast, is op geen enkel moment een aardgas concentratie gemeten, deze is daarmee onder de 0,1% LEL/LFL gebleven.

## Lekdebiet 0,125 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/hr – waterstof (lekopening 0,025 mm<sup>2</sup>) – 1 bar

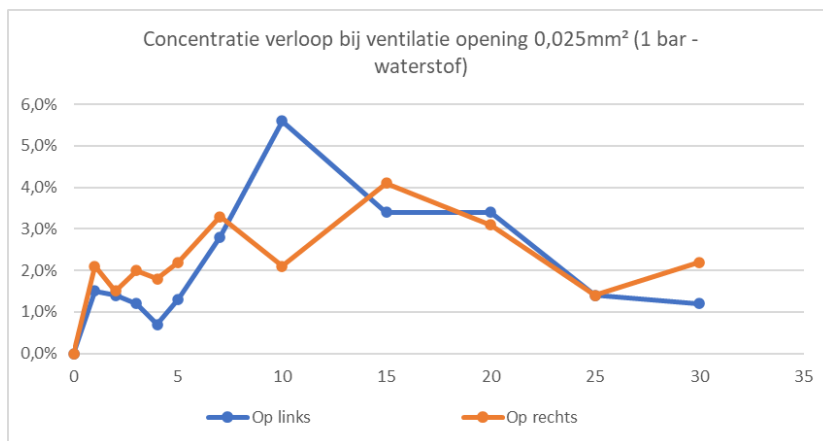
Wanneer met dezelfde voordruk het gedefinieerde lek met waterstof wordt gecreëerd, is het gemeten lekdebiet circa 0,125 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h. Dit lek leidde tot een waterstof concentratie in de HAS kast van maximaal 5,8 vol%. De invloed van wind is enkel bekeken als deze experimenten in de windluwe situatie verstoord. Gedurende deze meting is een geringe beïnvloeding waargenomen. In onderstaande grafiek is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten en seconden.



Figuur 104. Concentratie (vol % waterstof) in de HAS kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Onderstaande grafiek en tabel laat het tijdsafhankelijke beeld van de gemeten concentratie waterstof (in vol%) aan de ventilatie openingen met de maximale concentratie in rood. Wederom is de concentratie waterstof weergegeven als functie van de tijd in minuten.

|                        | Links voor | Rechts voor |
|------------------------|------------|-------------|
| Concentratie waterstof | 5,6vol%    | 4,1vol%     |



Figuur 105. Concentratie (vol % H<sub>2</sub>) bij de ventilatie openingen in de HAS kast bij een lekdebiet van 0,125 m<sup>3</sup>(n)/h waterstof

Op een afstand van 0,5 meter van de behuizing is ook gemeten met waterstofsensoren op 1 meter hoogte. Deze hebben een meetbereik tot 1000 ppm en werd slechts 20 ppm bereikt. Op een afstand van 0,5 meter werd geen LEL/LFL waarden gedetecteerd.