

# HyDelta

## **WP1A – Veiligheid en waterstof**

### D1A.2 – Opzet QRA, effect van ventilatie bij kleine lekkages en aanbevelingen voor maatregelen

Status: Final

## Document samenvatting

### Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Albert van den Noort
Verbonden aan	DNV
Email adres	Albert.vandenNoort@dnv.com

### Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	04-01-2022	AvdN	DNV	Eerste draft
2	18-03-2022	AvdN	DNV	Draft voor review EAG
3	8-04-2022	AvdN	DNV	Verwerkt commentaar EAG; voor review brede reviewgroep en supervisory board
4	29-4-2022	AvdN	DNV	Verwerkt commentaar brede review group; voor review supervisory board
5	1-5-2022	AvdN	DNV	Final

### Verspreidingsniveau

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

### Document review

Partner	Naam
Alliander	P. te Morsche / P. Versteegen / E. Rikken
Enexis	R. van Hooijdonk / W. de Rooij
Stedin	R. van den Brink / F. van Alphen
Coteq	S. Buruma
Westland Energie	R. den Hartog
N-tra	B. Meijer
Gasunie	M. van Agteren
NIPV	M. Spoelstra
Kiwa Technology	R. v. Aerde; H. Salomons; K. Pulles, P. Postma; S. Delnooz; H. Rijpkema
DNV	J. Knijp

## Samenvatting

Om een inschatting te kunnen maken van de risico's bij het gebruik van waterstof in het distributienet en de gebouwde omgeving in vergelijking met het gebruik van aardgas, is het van belang de verschillen in kans en gevolg te weten. De kans heeft met name betrekking op de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet; de gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade die ontstaat als gevolg van die gevaarlijke situatie (typisch brand of explosie). Mitigerende maatregelen zijn erop gericht om de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie of de gevolgen ervan te verkleinen.

In het Hydella programma is daartoe het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' gedefinieerd waarin de hoofddoelstelling als volgt geformuleerd is:

*Risico's in kaart brengen van waterstof lekkages in huizen en in het distributienet en aan de hand van de risico's beheersmaatregelen definiëren.*

Om antwoord te kunnen geven op deze hoofdvraag, wordt in deze rapportage sterk geleund op eerder gepubliceerd werk vanuit het Verenigd Koninkrijk (VK) waar soortgelijk onderzoek is uitgevoerd. In de eerste fase van het onderzoek is een analyse gemaakt van het werk uit het VK en is een vertaalslag gemaakt naar de Nederlandse situatie. Om een uitspraak te doen over de risico's van waterstof in het Engelse distributienet, is een kwantitatieve risicoanalyse gemaakt (QRA), waarbij ondersteund experimenteel onderzoek is uitgevoerd ter verbetering van dit QRA-model. Op basis van de uitkomsten van het model zijn voor het VK aanbevelingen gedaan voor mitigerende maatregelen, die ervoor zorgen dat de risico's van de waterstofinfrastructuur niet groter zijn dan de risico's van de huidige aardgasinfrastructuur.

In het Hydella werkpakket is dezelfde aanpak gevolgd om een eerste inschatting te maken van de risico's in de Nederlandse situatie. In de eerste deliverable van het werkpakket [1] zijn de onderzoeken in het VK geanalyseerd en zijn verschillen met de Nederlandse situatie geïdentificeerd. Op basis van deze analyse en bestaande vragen rond de veiligheid van waterstof in de gebouwde omgeving vanuit de Nederlandse netbeheerders is in de tweede fase van het onderzoek in het werkpakket een start gemaakt met een QRA-model voor het Nederlandse (waterstof)distributienet. Daarnaast is een experimenteel programma opgezet om inzicht te verschaffen in het effect van ventilatie op de opbouw van gevaarlijke concentraties bij kleine lekkages. Opgemerkt wordt dat het hier gaat om een eerste verkenning: gezien de beschikbare tijd binnen het Hydella programma zal nader onderzoek in volgende fasen van Hydella nodig zijn om de modellen verder te valideren en te finetunen met aanvullend onderzoek.

De rapportage is onderverdeeld in een drietal samenhangende delen. Deel I beschrijft een QRA-model. Het effect van ventilatie bij kleine lekkages wordt beschreven in Deel II, op basis van een set aan experimenten die zijn uitgevoerd. Tenslotte geeft Deel III een overzicht van mitigerende maatregelen die overwogen kunnen worden bij het opzetten van pilotprojecten.

### **Deel I "Kwantitatieve risicoanalyse"**

Het model dat ontwikkeld is beschouwt het gasdistributiesysteem voor drukken tot en met 8 bar, zoals dat door de regionale netbeheerders wordt bedreven. Meer specifiek focussen we in het model op de ondergrondse hoofdleidingen in het distributienet en de aansluitleidingen tussen de

hoofdleiding en de meteropstelling in woning. Het model is gebaseerd op de samenstelling van het Nederlandse distributienet, met verschillende drukregimes, materiaaltypen, diameters en lengtes, alsmede op de storingsdata van de afgelopen jaren voor het aardgasnet. In dit rapport wordt het model beschreven. De gebruikte aannames voor de Nederlandse situatie en de daarbij horende uitkomsten van de kwantitatieve risicoanalyse zullen in de volgende fase van HyDelta verder beschreven worden.

## Deel II “Effect van mitigerende maatregelen op ophoping waterstof”

Naast het aanpassen van de lokale situatie en statistiek, is uit de onderzoeken uit het VK bekend dat het grootste risico ontstaat door een explosie ten gevolge van ophoping van waterstof bij concentraties boven de 10 vol%. Om deze ophoping te voorkomen, is ventilatie een belangrijke parameter. Uit de workshops gehouden met de Nederlandse netbeheerders kwam naar voren dat vooral de verspreiding van waterstof bij lekkages in woningen en de bijbehorende invloed van ventilatie aanvullende aanbevelingen vraagt voor de uitvoering van pilots op korte termijn. Om hier meer inzicht in te verschaffen, is binnen HyDelta een proefopstelling in een container gemaakt waarmee het effect van (lage) ventilatievoud op de ophoping in verschillende ruimtes bij kleine lekkages wordt gemeten. In de experimenten zijn zowel de uitstroom van waterstof (tot 20 dm<sup>3</sup>/uur)<sup>1</sup> en methaan (tot 15 dm<sup>3</sup>/uur) onderzocht. De huidige norm voor toegestane lekkages voor aardgas is 5 dm<sup>3</sup>/uur. De resultaten leiden tot de volgende conclusies:

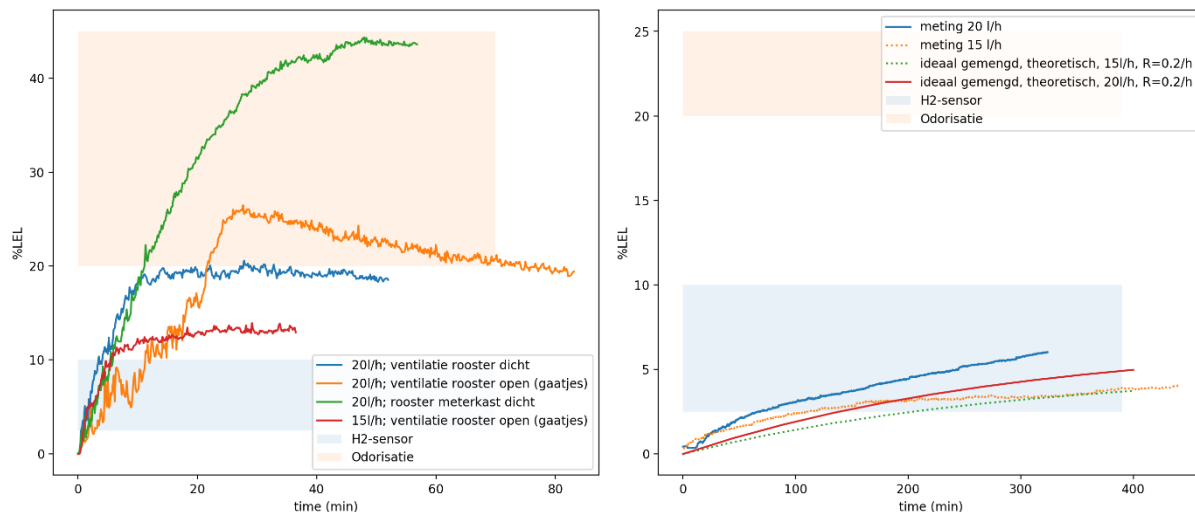
1. *Opbouw van concentraties blijft ruim onder de LEL in de grootste geteste ruimte (36m<sup>3</sup>).* De LEL<sup>2</sup> voor waterstof is 4 vol% gas in lucht. In de experimenten in de volledige ruimte van de container (36 m<sup>3</sup>) worden maximale concentraties van 6% LEL (=0.24 vol% H<sub>2</sub> in lucht) gemeten. Voor zowel waterstof als methaan is de concentratie boven in de container het hoogst. In geen van de experimenten is een gevaarlijke concentratie gemeten (nabij of boven LEL).
2. *Openen van een deur of ventilatierooster is een efficiënte manier om de concentratie te verlagen.* Getracht is de container zo gasdicht mogelijk te maken om daarmee een zeer slecht geventileerde ruimte te simuleren. Wanneer de ventilatievoud groter is dan 5 keer per uur mag deze worden beschouwd als “Goed” (NPR7910-1). Aangezien binnen woningen de ventilatievoud vaak niet verder komt dan 2 keer per uur, moet deze als gematigd worden beschouwd (NPR7910-1) of als “geen ventilatie” wanneer de verversingsgraad minder dan 1 keer per uur is (NPR7910-1). Door na een uitstroomproef te meten hoe snel de concentratie verlaagd, is de ventilatievoud van de container bepaald. Voor waterstof was deze 0.2 /uur. Het openen van een ventilatierooster aan de zijkant van de container resulteert in een ventilatievoud van 1 /uur, terwijl het openen van de deur van de container leidt tot een ventilatievoud van 15-20 /uur. Het openen van een deur doet de concentratie halveren in ongeveer 1-2 minuten. Ventileren via het openen van een ventilatierooster duurt ongeveer een half uur, terwijl bij geen ventilatie de concentratie na stoppen van de aanvoer in een aantal uur halveert.
3. *Lekkage in een meterkast leidt ook tot concentraties lager dan de LEL.* In de tweede fase van de experimenten is de container opgesplitst in 2 ruimten (10 en 26 m<sup>3</sup>) waarbij in de kleine ruimte een meterkast met deur met ventilatie roosters is aangebracht. De 10 m<sup>3</sup> vertegenwoordigt daarmee een typische hal. De uitstroom van het gas is telkens onderin de

<sup>1</sup> Met dm<sup>3</sup>/hr wordt in deze rapportage normaal dm<sup>3</sup>/hr bedoeld. In de experimenten is een massflowcontroller gebruikt waardoor de maximale uitstroom voor waterstof iets hoger is dan voor methaan.

<sup>2</sup> Met LEL wordt de onderste ontbrandingslimiet van gas in lucht bedoeld in deze rapportage en is daarmee ook te vertalen als LFL (lower flammability limit). Voor waterstof is de LEL 4vol%, voor methaan wordt 5 vol% aangehouden.

meterkast. Hierbij valt op dat de grootste toename van de concentratie in het bovenste deel van de meterkast is, maar dat deze gedurende de experimenten afvlakt. De concentratie in de aanpalende ruimte neemt dan toe door verspreiding van het gas door de roosters van de meterkast naar deze ruimte. De hoogste waterstofconcentratie in de meterkast wordt bereikt wanneer zowel de ventilatieroosters in de meterkastdeur als de ventilatieopening in de container gesloten zijn, waarbij bij de testen met waterstof de concentratie afvlakt tot een waarde van ongeveer 45 %LEL. Het openen van de ventilatieroosters in de meterkastdeur leidt tot een significante afname in de gemiddelde waterstofconcentratie in de meterkast (43% naar 20% van de LEL). Ook een afname in de uitstroomsnelheid van 20 dm<sup>3</sup>/uur naar 15 dm<sup>3</sup>/uur heeft een verlaging van de gemiddelde waterstofconcentratie in de meterkast tot gevolg. Alleen als de roosters in de deur van de meterkast worden afgeplakt en de maximale gastoevoer wordt gebruikt, wordt de voor de experimenten ingestelde veiligheidswaarde van 50% LEL bereikt en is het experiment afgebroken. In de experimenten is dit alleen bij methaan met een uitstroom van 15 dm<sup>3</sup>/uur voorgekomen, de maximale concentratie bovenin de meterkast is bij waterstof over het algemeen lager.

4. *Sluiten van de gastoevoer leidt tot een snelle daling, daarna normale ventilatie.* In zowel de experimenten met waterstof als met methaan wordt geconstateerd dat zodra de gastoevoer in de meterkast wordt afgesloten, de concentratie in de meterkast snel daalt. Het gas verspreid zich, zelfs bij afgeplakte roosters, snel naar de naast gelegen ruimte. Dit lijkt sneller te gebeuren bij waterstof dan bij methaan. Zodra de concentraties in de meterkast en aanpalende ruimte gelijk zijn, is de ventilatie van de aanpalende kleine ruimte leidend in een verdere verlaging van de concentratie.
5. *De gemeten concentraties zouden kunnen worden gedetecteerd door H<sub>2</sub>-sensoren of odorisatie.* De concentraties waterstof gemeten in de experimenten zijn over het algemeen erg laag, ver onder de LEL. In de analyse zover blijkt dat bij de kleine lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/uur geen gevaarlijke situaties ontstaan. Om echter zeker te zijn dat dergelijke kleine lekkages opgemerkt worden en niet over veel langere tijd uitstromen dan de uren die in deze experimenten gebruikt worden, is het van belang te weten of detectie mechanismen effectief zijn. Op basis van eerder onderzoek is een inschatting gemaakt van de grenzen waarop CO-sensoren, die als waterstofsensoren worden ingezet, zullen alarmeren, alsmede wanneer het gas te ruiken is. Onderstaande figuur geeft de gemiddelde concentratie in de meterkast weer (links) en in de grotere ruimte (rechts). Tevens worden de concentratiebanden waarin verwacht wordt dat de H<sub>2</sub>-sensoren zullen reageren en de grenzen voor ruikbaarheid van het gas weergegeven.



Figuur 1 Gemeten gemiddelde concentraties waterstof en onderste concentratiegrenzen waarop H2-sensoren alarmeren of odorant de concentraties laat opmerken. De meterkast (links) en de 36 m<sup>3</sup> ruimte (rechts)

Waarschijnlijk zal al bij lagere concentraties dan de 20 %LEL een gaslucht waarneembaar zijn. Overwogen kan worden om sensoren boven in de ruimte op te hangen, waar de hogere concentraties heersen. Hiermee zal tijdig een kleine lekkage worden opgemerkt en kan daarmee het risico verder verkleind worden.

Bij lekkage is ventilatie door middel van een rooster of het openen van een deur een effectieve manier om de concentratie te verlagen.

### Deel III “Veiligheidsaanbevelingen voor waterstof pilotprojecten”

Gedurende de looptijd van Hydelta worden in Nederland een aantal pilotprojecten opgezet om ervaring op te doen met waterstof in de gebouwde omgeving. Het is van groot belang om deze pilots en demonstratieprojecten op een veilige manier uit te voeren. Op basis van de uitkomsten van het werkpakket en de kennis die al opgedaan is in verschillende pilotprojecten, is een overzicht gemaakt van de maatregelen die voor toekomstige pilots overwogen kunnen worden. Dit betreft beheersmaatregelen voor een infrastructuur met een maximale werkdruk van 8 bar bij de overgang van een aardgas naar een waterstofinfrastructuur, bij pilotprojecten en bij permanente installaties. Initieel ligt de focus daarbij op de pilotprojecten en zijn deze maatregelen conservatief ingestoken. Uitgangspunten bij deze set met aanbevelingen en aandachtspunten is dat het merendeel van de werkwijzen zoals deze bekend is bij het ontwerp/aanleg en beheer van de aardgasinfrastructuur ook geschikt zijn voor de, in de toekomst, nieuw aan te leggen waterstofinfrastructuur, waarbij extra aandacht zal moeten zijn voor het beperken van “grote lekkages”. De aanbevelingen zijn gegroepeerd rond de verschillende fasen van het project: voorbereiding, ontwerp, implementatie en operationeel. Zowel maatregelen voor het distributienet als ‘achter de meter’ in de woningen worden benoemd. Op basis van de ervaringen uit de pilots en voortschrijdend inzicht kan in een later stadium bepaald worden in hoeverre al deze maatregelen ook toegepast dienen te worden in een toekomstig regulier waterstof distributienet.

## Summary

To estimate the risks associated with the use of hydrogen in the distribution network and the built environment compared to the use of natural gas, it is important to know the differences in chances and consequence. The chance relates in particular to the probability of a dangerous situation occurring; the consequences can be expressed in damage caused by that hazardous situation (typically fire or explosion). Mitigating measures are aimed at reducing the chance of a dangerous situation arising or lowering its consequences.

To this end, the Hydelta programme defines the 'Hydrogen and Safety' work package in which the main objective is formulated as:

*Identifying the risks of hydrogen leaks in homes and in the distribution network and defining mitigating measures on the basis of the risks.*

To answer this main question, this report relies heavily on previously published work from the United Kingdom (UK) where similar research has been conducted. In the first phase of the research, an analysis was made of the work from the UK and a translation was made to the Dutch situation. In order to give insight in the risks of hydrogen in the English distribution network, a quantitative risk analysis was made (QRA). Supporting experimental research was carried out to improve this QRA model. Based on the results of the model, recommendations have been made for mitigating measures for the UK, that ensure that the risk of the hydrogen infrastructure does not exceed the risks of the current natural gas infrastructure.

In the Hydelta work package, the same approach was followed to make an initial assessment of the risks in the Dutch situation. In the first deliverable of the work package, [1] the studies in the UK were analysed and differences with the Dutch situation were identified. Based on this analysis and existing questions about the safety of hydrogen in the built environment from the Dutch grid operators, a start was made in the second phase of the research in the work package with a QRA model for the Dutch (hydrogen) distribution network. In addition, an experimental programme has been set up to provide insight into the effect of ventilation on the accumulation of dangerous concentrations in the event of small leaks. It should be noted that this is an initial exploration: given the time available within the Hydelta programme, further research in next phases of Hydelta will be needed to further validate and fine-tune the models with additional research.

The report is divided into three coherent parts. Part I describes the setup of the QRA model. The effect of ventilation on small leaks is described in Part II, based on a set of experiments that have been carried out. Finally, Part III provides an overview of mitigating measures that can be considered in the pilot projects.

### **Part I 'Quantitative risk analysis'**

The model that has been developed considers the gas distribution system for pressures up to and including 8 bar, as operated by the distribution grid operators. More specifically, in the model we focus on the underground mains in the distribution network and the service pipes between the mains and the meter setup in the houses. The model is based on the composition of the Dutch distribution network, with different pressure regimes, material types, diameters and lengths, as well as on the failure data of recent years for the corresponding natural gas network. This report describes the model. The assumptions used for the Dutch situation and the associated results of the quantitative risk analysis will be further described in the next phase of HyDelta.

## Part II "Effect of mitigating measures on hydrogen accumulation"

It is known from the studies from the UK that the greatest risk for the use of hydrogen in the built environment is caused by an explosion due to accumulation of hydrogen at concentrations above 10 vol%. To prevent this build-up of the concentration, ventilation is an important parameter. The workshops held with the Dutch grid operators showed that the dispersion of hydrogen in the event of leaks inside homes and the associated influence of ventilation require additional recommendations for the implementation of pilots in the short term. To provide more insight into this issue, a test set-up has been built in a container that measures the effect of (low) ventilation rates on the accumulation in different rooms in the event of small leaks. In the experiments, both the outflow of hydrogen (up to 20 dm<sup>3</sup>/hour) and methane (up to 15 dm<sup>3</sup>/hour<sup>3</sup>) were investigated. The current limit for permitted leaks for natural gas is 5 dm<sup>3</sup>/hour. The results lead to the following conclusions:

1. *Build-up of concentrations remains well below the LEL in the largest tested room (36m<sup>3</sup>).* The LEL<sup>4</sup> for hydrogen is 4 vol% gas in air. In the experiments in the entire space of the container (36 m<sup>3</sup>), maximum concentrations of 6% LEL (= 0.24 vol% H<sub>2</sub> in air) are measured. For both hydrogen and methane, the concentration at the top of the container is the highest. In none of the experiments a dangerous concentration was measured (near or above LEL).
2. *Opening a door or ventilation opening is an efficient way to reduce concentration.* We tried to make the container as gas-tight as possible in order to simulate a very poorly ventilated room. When the ventilation rate is greater than 5 times per hour, it may be considered "Good" (NPR7910-1). In homes the ventilation rate often does not exceed 2 times per hour, where it should be considered moderate (NPR7910-1). In cases where the ventilation rate is less than 1 time per hour it is referred to as "no ventilation" (NPR7910-1). By measuring how fast the concentration decays after an outflow test, the ventilation rate of the container was determined. For hydrogen, it was 0.2 /hour. Opening a ventilation slot on the side of the container results in a ventilation rate of 1 /hour, while opening the door of the container leads to a ventilation rate of 15-20 / hour. Opening the door halves the concentration in about 1-2 minutes. Ventilation by opening a ventilation slot it takes about half an hour, while with no ventilation the concentration halves in a few hours after stopping the supply.
3. *Leakage in a meter cupboard also results in concentrations lower than the LEL.* In the second phase of the experiments, the container was divided into 2 rooms (10 and 26 m<sup>3</sup>) with a meter cupboard with door with ventilation slots in the small space. The 10 m<sup>3</sup> thus represents a typical hall. The outflow of the gas is always at the bottom of the meter cupboard. It is observed that the largest increase in concentration is in the upper part of the meter cupboard, but that it flattens out during the experiments. The concentration in the adjacent room then increases by the gas dispersing through the opening of the meter cupboard door to this room. The highest hydrogen concentration in the meter cupboard is achieved when both the ventilation slots in the meter cupboard door and the ventilation opening in the container are closed, with the concentration levelling off to a value of approximately 45 %LEL in the hydrogen tests. Opening the ventilation in the meter cupboard door leads to a significant decrease in the average hydrogen concentration in the meter cupboard (43% to 20% of the LEL). A decrease in the outflow rate from 20 dm<sup>3</sup>/hour to 15 dm<sup>3</sup>/hour also results in a decrease in the average hydrogen concentration in the meter

<sup>3</sup> In this report dm<sup>3</sup>/hr refers to normal dm<sup>3</sup>/hr. In the experiments, a mass flow controller is used that has a slightly higher maximum flow rate for hydrogen than for methane.

<sup>4</sup> LEL refers to the lower explosion limit of gas in air and can also be translated LFL (lower flammability limit). For hydrogen the LEL is 4vol%, for methane 5% vol. is used.



cupboard. Only if the ventilation slots in the door of the meter cupboard are closed and the maximum gas supply is used, the safety value of 50% LEL set for the experiments is reached and the experiment is aborted. In the experiments, this only occurred with methane with an outflow of 15 dm<sup>3</sup>/hour. The maximum concentration at the top of the meter cupboard is generally lower for hydrogen compared to methane.

4. *Closing the gas supply leads to a rapid decay, followed by normal ventilation.* In both the experiments with hydrogen and methane, it is observed that as soon as the gas supply in the meter cupboard is closed, the concentration in the meter cupboard drops rapidly. The gas disperses quickly, even with closed ventilation openings in the door, to the adjacent room. This seems to happen faster with hydrogen than with methane. As soon as the concentrations in the meter cupboard and adjacent room are equal, the ventilation of the adjacent small space is leading in a further reduction of the concentration.
5. *The measured concentrations could be detected by H<sub>2</sub> sensors or odorization.* The concentrations of hydrogen measured in the experiments are generally very low, far below the LEL. In the analysis it appears that with the small leaks up to 20 dm<sup>3</sup>/hour no dangerous situations arise. However, to be sure that such small leaks are noticed and do not extend over much longer periods of time than the hours used in these experiments, it is important to know whether detection mechanisms are effective. Based on previous research, an estimate has been made of the limits at which CO sensors, which can be used as hydrogen sensors, will alarm, as well as when the gas can be smelled. The figure below shows the average concentration in the meter cupboard (left) and in the larger room (right). It also shows the concentration bands in which the H<sub>2</sub> sensors are expected to react and the limits for smellability of the gas.

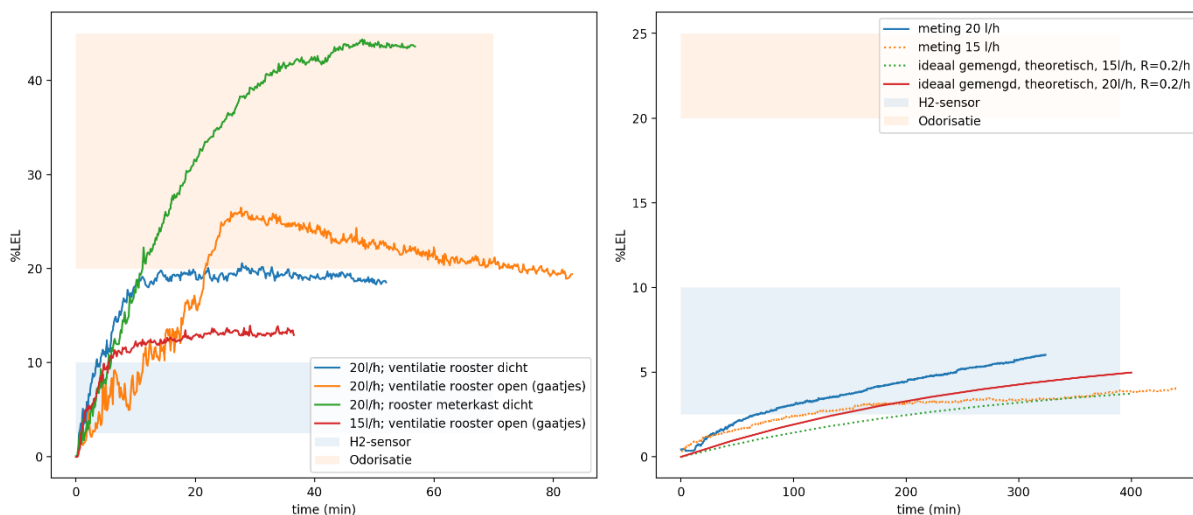


Figure 2 Measured average concentrations of hydrogen and lower concentration limits at which H<sub>2</sub> sensors alarm or odorantly detect the concentrations. The meter cupboard (left) and the 36 m<sup>3</sup> space (right)

It is likely that gas air will already be detectable at concentrations lower than 20 %LEL . It could be recommended to place sensors at the top of the room, where the higher concentrations prevail. With this, a small leak will be noticed in time and the risk can be further reduced. In case of leakage, ventilation by means of a grid or opening a door is an effective way to reduce concentration.

During the Hydelta programme, a number of pilot projects will be set up in the Netherlands to gain experience with hydrogen in the built environment. It is of great importance to execute these pilots and demonstration projects in a safe manner. Based on the results of this work and the knowledge already gained in various pilot projects, an overview has been made of the mitigating measures that can be considered for future pilots. We focus on measures for an infrastructure with a maximum working pressure of 8 bar in transition from natural gas to a hydrogen, for pilot projects and for permanent installations. Initially, the focus is on the pilot projects and these measures are conservatively inclined. Basis for this set of recommendations is that the majority of the methods that are used for the design/construction and operation of the natural gas infrastructures are also suitable for hydrogen. Extra attention is required to limiting "large leaks". The recommendations are grouped around the different phases of the project: preparation, design, implementation and operation. Both measures for the distribution network and 'behind the meter' in the homes are mentioned. Based on the experiences from the pilots and future insights, we need to re-assess at a later stage to what extent these measures should also be applied in a future regular hydrogen distribution network.

## Inhoudsopgave

Document samenvatting .....	2
Samenvatting.....	3
Summary 7	
Inhoudsopgave .....	11
1 Inleiding .....	13
2 Methode .....	14
Deel I. model.....	17
3 Inleiding .....	18
3.1 Randvoorwaarden van het model.....	18
4 Methodologie .....	18
4.1 Achtergrond.....	18
4.2 Beschrijving Risicomodel .....	19
5 Vervolg.....	23
Deel II. Effect van mitigerende maatregelen op ophoping waterstof.....	24
6 Inleiding en doelstelling .....	25
7 Experimentele opstelling.....	25
7.1 Indeling van de container .....	26
7.2 Simulatie van een gas lekkage.....	28
7.3 Ventilatie .....	29
8 Gasuitstroom experimenten in container .....	30
8.1 Fase 1. Uitstroomexperimenten zonder opdeling binnenruimte .....	32
8.2 Fase 2: Uitstroomexperimenten met meterkast, 10m <sup>3</sup> en 26m <sup>3</sup> ruimten .....	42
9 Discussie van de resultaten van de experimenten.....	48
10 Conclusies en aanbevelingen uit de experimenten .....	53
Deel III. Veiligheidsaanbevelingen voor waterstof pilotprojecten .....	55
11 Introductie.....	56
12 Generieke aanbevelingen.....	57
12.1 Voorbereiding fase .....	57
12.2 Ontwerpfase .....	58
12.3 Implementatiefase .....	62
12.4 Operationele fase .....	64
13 Lekkage.....	65
13.1 Lekkage algemeen - distributienetwerken en stations .....	65
13.2 Lekkage algemeen – Binneninstallatie .....	68

14	Verspreiding .....	70
14.1	Gas lekt naar gebouw - Distributienetwerk .....	70
14.2	Gas komt gebouw binnen - Binneninstallatie (achter de meter).....	70
15	Overzichtslijst met mogelijke maatregelen.....	71
16	Referenties .....	73

## 1 Inleiding

Waterstof heeft andere eigenschappen dan aardgas. Voor zover het de ‘harde’ fysisch/chemische kenmerken betreft, zijn deze in detail bekend. Wat echter ontbreekt is de specifieke kennis omtrent welk verschil in veiligheidsrisico dit oplevert in de praktijk van de gasdistributie en in het gastransport. Er is wel uitgebreide kennis van aardgas en die kennis kan als referentie dienen.

Om een inschatting te kunnen maken van de risico's bij het gebruik van waterstof in het distributienet en transportnet in vergelijking met aardgas, is het van belang de verschillen in kans en gevolg te weten. De kans heeft met name betrekking op de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet; de gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade die ontstaat bij een brand of explosie. Mitigerende maatregelen zijn er vervolgens op gericht om de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie of de gevolgen daarvan te verkleinen.

In het Hydelta programma is daartoe het werkpakket ‘Waterstof en Veiligheid’ gedefinieerd waarin de hoofddoelstelling als volgt geformuleerd is:

*Risico's in kaart brengen omtrent het gedrag van waterstof bij lekkages in huizen en in het distributienet en aan de hand van de risico's beheersmaatregelen definiëren.*

De vraag naar de omvang van de relatieve veiligheidsrisico's (waterstof vs aardgas) is in de volgende deelvragen op te splitsen:

- In hoeverre is er verschil in de kans (en omvang) op het ontstaan van een gevaarlijke situatie bij vrije uitstroom door lekkage of tijdens werkzaamheden aan het net?
- In hoeverre is er verschil in verspreiding (of evt. ophoping) van de gaswolken?
- In hoeverre is er verschil in de ontsteekkans in de praktijk?
- In hoeverre is er verschil in de gevolgen van branden en van explosies?
- In hoeverre is er verschil in de benodigde mitigerende maatregelen?

Met behulp van (bestaande) risicomodellen kunnen kansen en gevolgen kwantitatief worden gemodelleerd voor zowel aardgas als waterstof. Echter voor waterstof is het model nog niet ver genoeg ontwikkeld om de kwantitatieve inschatting te kunnen maken voor de Nederlandse situatie [2]. In Hydelta wordt hier een eerste aanzet mee gemaakt.

Uit de analyse van de huidige internationale literatuur blijkt dat de vraag of de risico's van aardgas en waterstof vergelijkbaar zijn, situatieafhankelijk is. Binnen de H21 en Hy4heat projecten in het VK zijn diverse experimenten uitgevoerd, onder andere aan: de opbouw aan concentratie van waterstof in huizen, verspreiding door de bodem, en de ontsteking door verschillende bronnen. Beide projecten vertalen de uitkomsten van de experimenten naar kwantitatieve risicomodellen (Quantitative Risk Models; QRA). Een gecombineerd model voor het risico van waterstof vanuit het distributienet (H21) en voor de woning (Hy4heat) wordt momenteel wel ontwikkeld, maar is nog niet beschikbaar. HyDelta deliverable D1a.1 [1] vat deze onderzoeken samen en vergelijkt deze met de Nederlandse situatie. De rapportage concludeert onder andere dat:

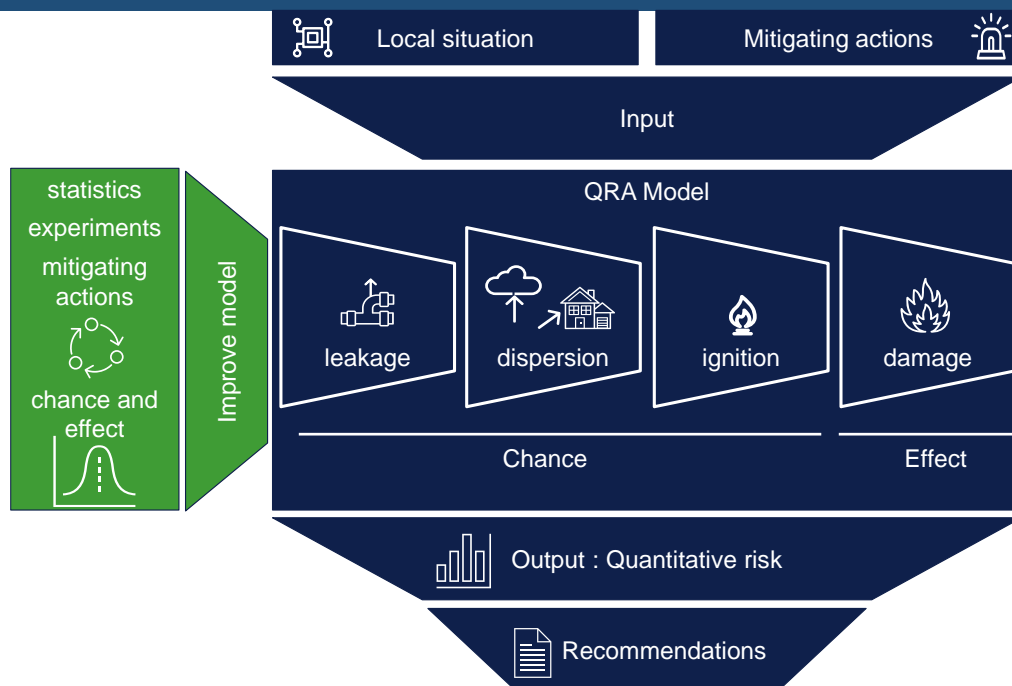
1. Het lagedruk distributienet in het Verenigd Koninkrijk (VK) is opgebouwd uit veelal dezelfde materialen als in Nederland, echter wel in andere verhoudingen qua lengtes, diameters en drukken. Voor berekening van het risico dient het QRA-model voor

- Nederland aangepast te worden voor de gebruikte materialen, drukken, diameters en leidinglengtes.
2. De typische indeling van Nederlandse huizen verschilt van die van Engeland. Ook de locatie van de meterkast in de woning is vaak anders. In VK zijn verhoudingsgewijs meer verouderde huizen in vergelijking met Nederland: dus meer kieren, minder mechanische ventilatie en vaker ventilatie die niet voldoet aan regelgeving. Ventilatie heeft grote invloed op het totale risico.
  3. Verspreiding in besloten ruimtes is onderzocht in hy4heat, Hyhouse en het Gas Dispersion Analysis report; hierbij is primair geredeneerd vanuit een lekkage in het leidingwerk in de binneninstallatie. Bij een waterstoflekkage vormen zich eerst boven in de ruimte hogere gasconcentraties (gasstratificatie). Het volume waterstof dat bij lekkage in een leiding vrijkomt, is 1,2 tot 1,8 keer groter dan bij methaan. De invloed van natuurlijke ventilatie- is aanzienlijk groter dan bijvoorbeeld mechanische ventilatie. Bij het grootste lekdebiet (78,6 m<sup>3</sup>/uur) zorgt ruimteventilatie ervoor dat de concentratie boven in de ruimte verlaagd wordt van een rijk mengsel (~ 60 %vol) naar stoichiometrisch mengsel (~ 40% vol). Indien waterstof zich verspreidt naar andere ruimtes, wordt de waterstofconcentratie daardoor ook snel kleiner: het vormen van een explosief mengsel bij de meest voorkomende kleine lekken en natuurlijke ventilatie is onwaarschijnlijk. Bij een waterstoflekkage in een ruimte zonder ventilatie en gesloten/deuren ramen kan een explosief mengsel ontstaan. De meest effectieve maatregelen om te voorkomen dat een explosief mengsel zich vormt, is de combinatie van kastventilatie (bijvoorbeeld luchtrooster in meterkast) en ruimteventilatie: de ontstekingsgrens in de bronruimte (ruimte waar de lekkage optreedt) wordt niet overschreden en door ruimteventilatie wordt deze kans verder verlaagd. Daarnaast wordt in het VK vooralsnog aanbevolen om - net als bij aardgas – een waterstofinstallatie niet in een kelder te plaatsen, vanwege de kans op onvoldoende ventilatie (en dus snellere ophoping) aanzienlijk is. Deze situatie komt in het VK minder vaak voor.
  4. Bij aardgas wordt het merendeel van lekkages opgemerkt door de aanwezige geur en verholpen voordat een ontsteking plaats kan vinden. Vanuit onderzoek uit het VK wordt dan ook gesteld dat: odorisatie is bij waterstof ook een effectief middel, naast een doorstroombeveiliging zoals een EFV of gasstopper afgesteld op het maximale verbruik van een toestel.

Om de hoofdvraag te beantwoorden, wordt in deze rapportage een vertaalslag gemaakt naar de Nederlandse situatie, waarbij de hierna beschreven methode gehanteerd wordt.

## 2 Methode

Om de risico's in kaart te brengen omtrent het gedrag van waterstof bij lekkages in huizen en in het distributienet en om aan de hand van de risico's beheersmaatregelen te definiëren, wordt gebruik gemaakt van de schematische aanpak zoals weergegeven in Figuur 3. In deze aanpak zijn 2 processen te herkennen: een verticaal proces waarin via een kwantitatieve risicoanalyse aanbevelingen worden gedaan om tot een acceptabel risico te komen, en een horizontaal proces dat erop gericht is om het risicomodel te verbeteren voor de gegeven situatie.



Figuur 3 Modelmatige aanpak risicoanalyse

Logischerwijs zal het model eerst geschikt gemaakt moeten worden voor de gegeven situatie, het Nederlandse waterstofdistributienetwerk, voordat deze toegepast kan worden. Het oorspronkelijke model is ontwikkeld voor de situatie in het VK en is gevalideerd voor de risico's van aardgas. Om de toepasbaarheid van een dergelijk model aan te tonen voor de Nederlandse situatie, is in deze fase van HyDelta een eerste aanzet gemaakt tot de vertaling van het model naar de Nederlandse situatie. Er is daarbij vooral gefocust op de onderdelen die een groot effect op het risico hebben en die duidelijk afwijken in Nederland ten opzichte van de situatie in het VK. De opzet van deze analyse wordt beschreven in **Deel I "Kwantitatieve risicoanalyse"**. De uitkomsten van de kwantitatieve risicoanalyse zullen in de volgende fase van HyDelta verder beschreven worden.

Naast het aanpassen van de lokale situatie en statistiek, is uit de onderzoeken uit het VK bekend dat het grootste risico ontstaat door het grote effect van een mogelijke explosie door ophoping van waterstof tot concentraties boven de 10 vol%. Om deze ophoping te voorkomen, is het effect van ventilatie in gesloten ruimtes een belangrijke parameter. Vanuit workshops met Nederlandse netbeheerders kwam naar voren dat vooral de verspreiding van waterstof bij lekkages in woningen en de bijbehorende invloed van ventilatie aanvullende aanbevelingen vraagt voor de uitvoering van pilots op korte termijn. Om hier meer inzicht te verschaffen, is binnen HyDelta een experimentele opstelling gemaakt waarmee het effect van (lage) ventilatievoud op de ophoping in verschillende ruimtes bij kleine lekkages kan worden gemeten. De experimenten worden beschreven in **Deel II "Effect van mitigerende maatregelen op ophoping waterstof"** van deze rapportage.

Gedurende de looptijd van het project wordt in Nederland een aantal pilotprojecten opgezet om ervaring op te doen met waterstof in de gebouwde omgeving. Het is van groot belang om deze pilots en demonstratieprojecten op een veilige manier uit te voeren. Het beschreven risicomodel in deel I en de aanvullende informatie uit de experimenten zoals gerapporteerd in deel II vormen input voor het bepalen van de maatregelen in de pilots. Omdat het model op dit moment nog niet volledig de Nederlandse situatie beschrijft en de pilotprojecten daarnaast ook weer meer kennis inbrengen om een nog beter begrip van de risico's te krijgen, is in de tussentijd een rondgang gemaakt langs de lopende pilotprojecten. In **Deel III "Veiligheidsaanbevelingen voor waterstofpilotprojecten"** van

deze rapportage geven we aanbevelingen voor de te nemen beheersmaatregelen voor infrastructuur met een maximale werkdruk van 16 bar bij de overgang van een aardgas- naar een waterstofinfrastructuur, bij pilotprojecten en bij permanente installaties. Initieel ligt de focus daarbij op de pilotprojecten en zijn deze maatregelen conservatief ingestoken. Op basis van de ervaringen uit de pilots en voortschrijdend inzicht kan in een later stadium bepaald worden in hoeverre deze maatregelen ook toegepast dienen te worden in een toekomstig regulier waterstof distributienet.

Tenslotte wordt opgemerkt dat door vertraging in het vrijgeven van de rapportages in het VK de analyse uit de eerste fase van het werkpakket vertraging opgelopen heeft. In deze rapportage is daarom voor zowel het risicomodel als voor de experimenten een eerste aanzet gemaakt. In de volgende fase van het Hydelta project zullen zowel het model als de experimenten verder uitgebreid worden om daarmee een nog beter beeld te kunnen geven van de manier waarop waterstof op een veilige manier kan worden toegepast in de gebouwde omgeving. De genoemde pilotprojecten spelen daarbij een grote rol. Daarin zal immers de nodige ervaring worden opgebouwd voor de toepasbaarheid van waterstof en zal statistiek worden opgebouwd rond risico's, zoals we die in de afgelopen tientallen jaren ook opgebouwd hebben voor de veilige toepassing van aardgas. De aanbevelingen voor verder onderzoek worden in de discussie gededd.



# Kwantitatieve risicoanalyse model

### 3 Inleiding

Om een eerste inschatting te kunnen maken van de risico's van waterstof in het Nederlandse distributienet, is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) gemaakt. Daarin wordt het risico vergeleken tussen het huidige aardgasdistributiesysteem en het toekomstige waterstofdistributiesysteem. De uitkomsten van een dergelijke analyse geven een kwantitatieve basis of de waterstofdistributie meer risico oplevert voor de maatschappij en indien dit het geval is, welke maatregelen de meeste invloed hebben om dit risico te verkleinen. Het QRA-model dat door DNV is ontwikkeld voor een soortgelijke analyse in het Verenigd Koninkrijk, vormt de basis voor deze analyse.

*In Hydelta is een eerste aanpassing gemaakt van het VK-model voor de Nederlandse situatie. In deze rapportage worden de randvoorwaarden en structuur van deze analyse beschreven. In de volgende fase van Hydelta zullen de gebruikte aannames en uitkomsten verder beschreven worden.*

#### 3.1 Randvoorwaarden van het model

Het model dat in Hydelta is ontwikkeld, beschouwt het gasdistributiesysteem voor drukken tot en met 8 bar, zoals dat door de regionale netbeheerders wordt bedreven. Het regionale en hogedruktransportnet van Gasunie valt buiten deze analyse. Meer specifiek focussen we in deze eerste versie van het model op de

- Ondergrondse hoofdleidingen in het distributienet
- Aansluitleidingen tussen de hoofdleiding en de meteraansluiting in de woning (en nog exclusief de binneninstallatie).

Het model is gebaseerd op de samenstelling van het Nederlandse distributienet, met verschillende drukregimes, materiaaltypen, diameters en lengtes, alsmede op de storingsdata van de afgelopen jaren voor het aardgasnet.

## 4 Methodologie

### 4.1 Achtergrond

In een kwantitatieve risicoanalyse worden voor een gegeven situatie of configuratie van het netwerk en aangesloten woningen de kansen op lekkage en de gevolgen daarvan berekend. Het ontwikkelde model houdt daarbij voor het distributienetwerk rekening met een aantal parameters:

- Gebruikte drukken
- Variatie in diameter van de hoofdleidingen
- Gebruikte materialen in de hoofdleidingen (bv. staal of PE)
- Constructiemethode van de hoofdleiding (bv. wanddikte)
- PE koppelingen (bv. elektrolassen)
- Diepte van de leidingen in de grond
- Opbouw van de aansluitleidingconstructie
- Permeabiliteit van de bodem

In het ontwikkelde QRA-model voor Nederland worden bovenstaande parameters geschat. Daarbij is initieel vooral gefocust op de variatie in drukken, diameters en materialen en de afstand van de woningen tot de hoofdleiding

#### 4.2 Beschrijving Risicomodel

Binnen DNV is een gestandaardiseerde risicoanalyse methode ontwikkeld voor risico's van het distributienet (CONIFER: Calculation of Networks and Installations Fire and Explosions Risk). Het model is oorspronkelijk ontwikkeld als risicoanalyse model voor het gasnetwerk van de VK om de prioritering te bepalen in het vervangen van gietijzeren leidingen door polyethyleen (PE). Het model is in de loop der jaren doorontwikkeld. Het model is gebaseerd op incidentdata, meetdata (specifiek voor het model) en gevalideerde modeldata. Als onderdeel van het H21 project in het VK is het model momenteel aangepast en gevalideerd voor waterstoftransportsystemen. Hiertoe zijn in het VK aanvullende experimenten uitgevoerd en zijn de resultaten daarvan geïmplementeerd in modules in het model.

Details voor het model en de ontwikkeling ervan worden gegeven in de QRA-rapporten voor H21 [3] [4] [5]. De modules in het model zijn in een softwarepakket gebouwd door DNV en bieden de mogelijkheid tot modelering van het risico gegeven de volgende invoerparameters:

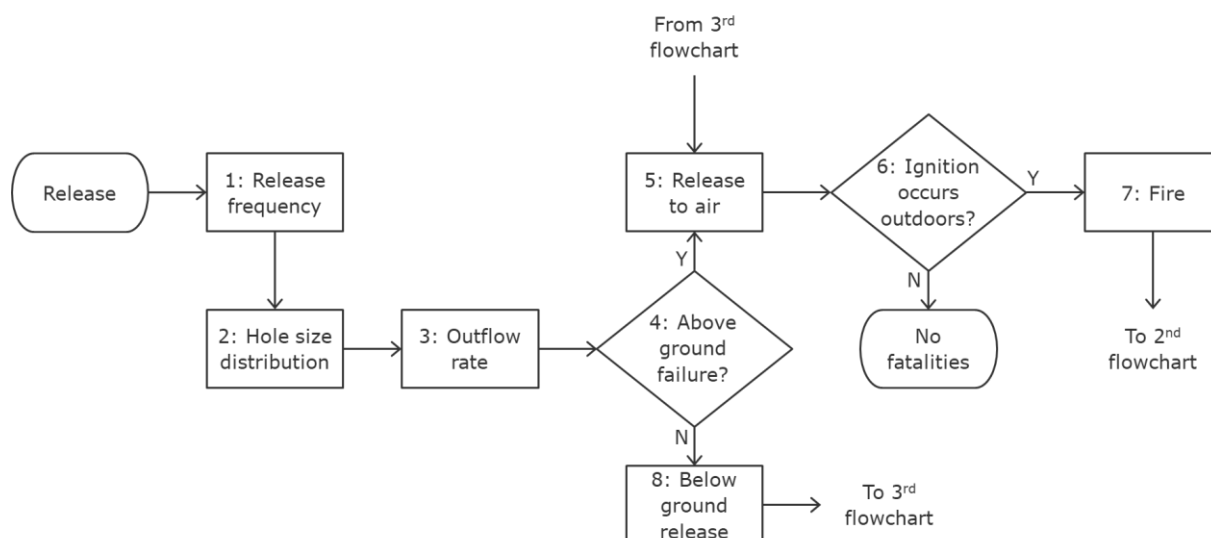
- Metalen en polyetheen (PE) leidingen.
- Aardgas, volledig waterstof en alle blends daartussen
- Verschillende oorzaken van lekkage: Spontaan en schade door derden (externe interferentie)<sup>5</sup>. De faalfrequentie voor deze oorzaken is input voor het model.
- Fysische verschijnselen zoals uitstroom, dispersie en ophoping van gassen
- Aansluitleidingen en gasleidingen na de meter (binneninstallatie)
- Verschillende samenstellingen van woningen, zoals type woningen (bungalows, rijtjeshuizen, twee-onder-een-kap huizen en vrijstaande huizen) inclusief verschillende groottes van kamers, aanwezigheid van kelders en aanwezigheid van bewoners
- Uitkomsten, inclusief explosies en branden, vertaald naar individuele of maatschappelijke risico's.

Het model kan gebruikt worden voor zowel lekken door externe interferentie als voor lekken door falen van de infrastructuur zelf. Ook al worden deze oorzaken anders behandeld, beiden kunnen leiden tot bovengrondse branden, of dispersie van het gas door de ondergrond naar gesloten ruimten (bijvoorbeeld huizen) en daar mogelijk leiden tot explosies. De uitkomsten van het model zijn risico's voor personenongevallen maar ook kansen op branden of explosies.

Het model is modulair opgebouwd en bestaat uit verschillende individuele modellen, zoals weergegeven in Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6. Elk van de genummerde stappen in de figuren bevatten gedetailleerde submodellen die verder gaan dan een enkele (set van) vergelijk(en). Details over deze submodellen worden gegeven in [3], hieronder wordt een korte samenvatting gegeven.

---

<sup>5</sup> Schade door derden of externe interferentie wordt veroorzaakt door menselijke interactie zoals bijvoorbeeld graafschade waarbij per ongeluk een leiding wordt geraakt. Onder spontane schade wordt schade zonder direct menselijke interactie verstaan. Te denken valt dan aan bijvoorbeeld het falen van koppelingen of corrosie.



Figuur 4 Structuur van het QRA-model: kans op lekkage. (eerste stroomschema)

Het model start met een uitstroom van gas, waarbij in de eerste stappen de faalfrequentie, het aantal en de grootte van de lekken en de uitstroomhoeveelheid wordt bepaald. Op basis van de gebruikte materialen, drukken en diameters in het aardgassysteem kan op basis van incidentdata een inschatting gemaakt worden voor de faalfrequenties in het pipe fracture model. In Nederland worden lekken en incidenten in het distributienet geregistreerd in de registratiedatabase 'Nestor'. Het overgrote deel daarvan is geconstateerd in aansluitleidingen en werden als urgent ingedeeld. De aard van de lekken voor wat betreft grootte en snelheid van ontwikkeling varieert. Veroudering en corrosie zijn vaak kleinere lekken die langzaam groter worden terwijl het bezwijken van koppelingen, zadels, losraken van aansluitingen door zakkende grond en dergelijke en breuken in brosse materialen plotseling optreden en direct een aanzienlijke gasuitstroom tot gevolg hebben. Door verschillen in gebruikte materialen, drukken en inrichting van het distributienet zullen de data gebruikt in het model voor het VK niet 1-op-1 toepasbaar zijn voor Nederland.

In de voor Hydelta ontwikkelde Nederlandse versie van het QRA-model wordt op basis van Nederlandse historische lekdata en opbouw van het distributienetwerk de volgende stappen doorlopen.

- De frequentie van ieder lek wordt bepaald door de pipeeigenschappen (zoals druk, diameter en constructiedetails) en faalmodus (interferentie en/of spontaan). Elke foutmodus wordt achtereenvolgens in de volgende stappen beschouwd.
- Op basis van dezelfde gegevens die zijn gebruikt in de eerste stap, wordt de kans over een reeks van lekgroottes bepaald. Specifieke data voor de lekgrootte is zeldzaam, bij incidenten wordt vaak niet bijgehouden hoe groot het lek is. In het model is voor aardgas een set aannames gemaakt, er wordt vanuit gegaan dat deze verdeling bij waterstof ook geldt.
- Voor iedere lekgrootte wordt de uitstroom bepaald. De verschillen tussen de hoeveelheid waterstof en aardgas die vrijkomen bij een gegeven druk en lekgrootte zijn in de praktijk gevalideerd in H21.

De hoeveelheid gas die uit een lek stroomt, wordt bepaald door de lekgrootte, de gasdruk (30 mbar, 100 mbar, 4 bar en 8 bar), de tegendruk die het uitstromende gas ondervindt, of en wat voor

gronddekking en toplaag (tegels, klinkers, asfalt, gras) er is en waar het naar toe kan stromen (kruipruimte, kelder, meterkast, woning, grondoppervlak en dergelijke).

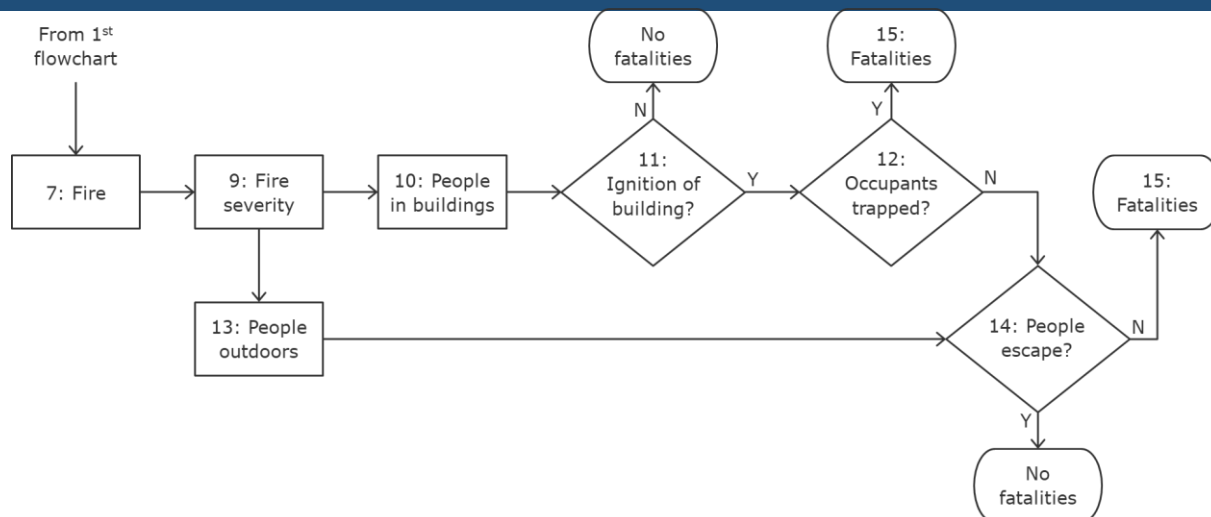
Vanuit de statistische gegevens voor aardgas is het ondergrondse gedrag en de kans op uitstroom naar een kelder en dergelijke te benaderen. Ook zijn er modellen beschikbaar die het gedrag simuleren van stroming door verschillende grondsoorten, inpandig en in de open lucht. Daarmee kan een goede indicatie worden verkregen van de mogelijke verschillen in gedrag tussen waterstof en aardgas.

Hierbij is van belang om te bepalen welke grondsoorten de dekking van leidingen vormen en welke bestrating aanwezig is, welke volume kelders, kruipruimten, meterkasten en andere inpandige ruimten hebben. Op basis van het experimentele programma van H21 (phase 1b) is een aangepast model ontwikkeld voor de stroming van waterstof door de bodem richting een woning. Voor de Nederlandse situatie is het mogelijk om hiervoor aanpassingen te maken naar de typische inrichting van woningen.

In Figuur 4, stap 4 wordt vervolgens onderscheid gemaakt voor uitstroom naar de open lucht resulterend in een brand, en ondergrondse verplaatsing van het gas naar gesloten ruimtes. Deze laatste stap wordt verder uitgewerkt in Figuur 6. Uit de hierboven omschreven data kan worden afgeleid welke concentraties zullen optreden (in samenhang met weersomstandigheden (vochtige grond is minder doorlaatbaar; wind verandert de grootte en concentratie in de gas-“wolk”) en hoe deze gedetecteerd kunnen worden, bijvoorbeeld tijdens lekzoeken.

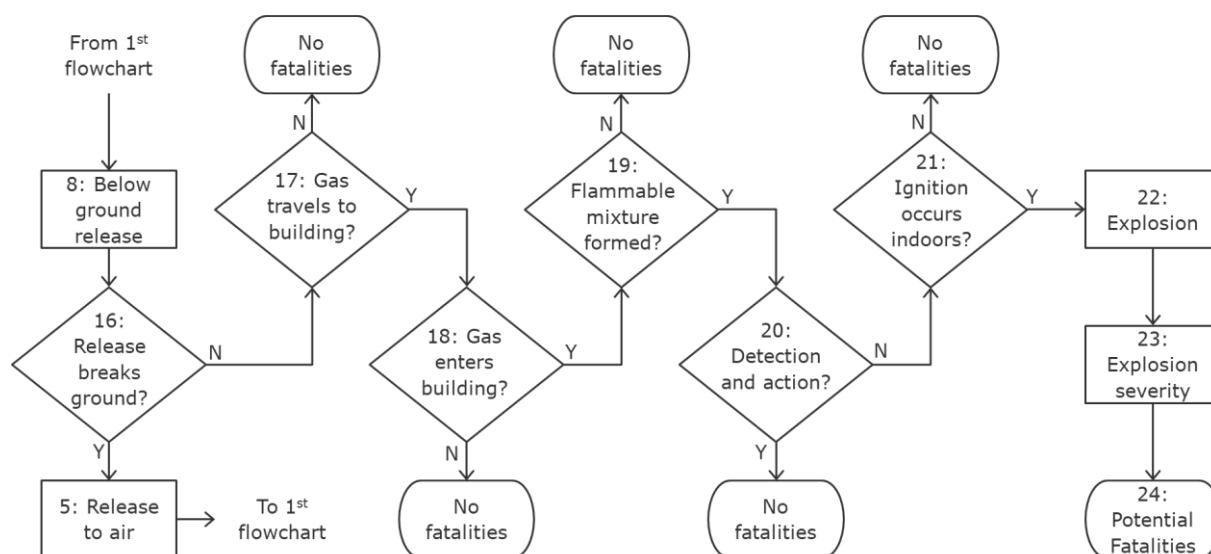
De ontstekingsenergie voor waterstof en aardgas varieert met de concentratie. In het model wordt een kans ingeschat op ontsteking op basis van de aanwezigheid van potentiële ontstekingsbronnen, maar ook op basis van de aanwezigheidsduur van personen in de woning en hun reactie op het detecteren van een lekkage. Enerzijds bepaalt de kans op aanwezigheid van bewoners de potentiële schade aan personen, zoals in het volgende stroomschema (Figuur 5) beschreven. Anderzijds kunnen bewoners de kans op schade verlagen doordat zij bijvoorbeeld door het ruiken van odorant actie ondernemen, zoals het openen van ramen en deuren en waarschuwen van de hulpdiensten.

Mocht een ontsteking leiden tot een brand, dan beschrijft Figuur 5 de stappen die gevolgd worden ter bepaling van het risico. Vanuit de hittebelasting van het ontbrandde waterstof wordt bij een brand de kans bepaald dat de woning ook vlamvat en dat bewoners de woning niet uit kunnen komen. Deze kansen zijn, startend van de hittebelasting niet anders voor waterstof dan voor aardgas, zodat het bestaande model voor aardgas hier ook toegepast kan worden. In het model wordt uitgegaan dat 10% van de bewoners de woning niet uitkomt, wat een voorzichtige aanname is en waarvan de gevoeligheid op de uitkomsten verder onderzocht dient te worden. Omdat de meeste branden als gevolg van graafschade, overdag plaatsvinden, blijkt in de praktijk deze kans kleiner te zijn.



Figuur 5 Structuur van het QRA-model: effecten van branden. (tweede stroomschema)

In het geval van een gasroom, die ontstaat buiten de woning en zich verplaatst naar een besloten ruimte, ontstaat er een kans op een explosie. Figuur 6 geeft de stappen weer die daarbij gevolgd worden.



Figuur 6 Structuur van het QRA-model: effecten van explosies (derde stroomschema)

Bij de ophoping van waterstof in de woning (stap 19) wordt het effect van ventilatie in de woning en de migratie van waterstof naar verschillende kamers in de woning meegenomen. Op basis van experimenteel onderzoek in H21 zijn deze modellen voor waterstof gevalideerd. Afhankelijk van de aanwezigheid van personen in de woning, die een lekkage kunnen opmerken door geodoriseerd gas of door sensoren, wordt de kans afgeschat dat potentiële ontstekingsbronnen een explosie in de woning veroorzaken. De concentratie waterstof op het moment van ontbranden wordt in de modellen meegenomen. Vooral voor explosies is de overdruk erg afhankelijk van de concentratie waterstof. Potentieel zijn waterstofexplosies veel schadelijker dan aardgasexplosies, rond een stoichiometrisch mengsel. Bij lagere concentraties (tussen de 5 en 10 vol%) hoeft dit niet zo te zijn.

Voor explosies wordt de overdruk meegenomen in het model. Voor waterstof is deze groter dan voor aardgas. Op basis van de overdruk wordt een inschatting gemaakt van het aantal slachtoffers, waarbij onderscheid gemaakt wordt in het type woning. Net als bij de branden is deze inschatting voor slachtoffers bij een gegeven overdruk voor waterstof hetzelfde als bij aardgas.

## 5 Vervolg

In het onderzoek is een eerste testrun uitgevoerd voor een QRA-model voor het Nederlandse distributiesysteem op basis van een eerste set aannames voor met name de samenstelling van het distributie net. Een nadere validatie van de input parameters alsmede van de uitkomsten zal nog uitgevoerd worden. De uitkomsten van het model zullen worden vergeleken met de praktijk voor aardgas, waarna met meer zekerheid uitspraken gedaan kunnen worden over de risico's bij omzetting van dit net naar waterstof. In het vervolgonderzoek binnen Hydeltta 2.0 zullen de input parameters en uitkomsten van het model nader beschreven worden.

# Effect van mitigerende maatregelen op ophoping waterstof



## 6 Inleiding en doelstelling

Op basis van een inventarisatie binnen de sparringgroep van het werkpakket, bestaande uit o.a. de Nederlandse netbeheerders, kwam naar voren dat vooral de verspreiding van waterstof bij lekkages in woningen en de bijbehorende invloed van ventilatie aanvullende aanbevelingen vraagt voor de uitvoering van pilots op korte termijn.

Recent uitgekomen rapporten uit het VK beschrijven experimenten van de verspreiding van waterstof in (typisch Engelse) woningen en vertalen deze uitkomsten naar risicomodellen. Op basis van de analyse van deze rapportages blijkt dat de verspreiding van waterstof in gesloten ruimtes kan leiden tot grotere risico's ten opzichte van aardgas. In het kader van het Hydelta project en de in ontwikkeling zijnde Nederlandse pilotprojecten bestaat een urgente vraag de effectiviteit van een aantal mitigerende maatregelen, onafhankelijk van buitenlandse onderzoeken aan te tonen. In zeer goed geïsoleerde woningen is de ventilatievoud laag. Wanneer de ventilatievoud groter is dan 5 keer per uur mag deze worden beschouwd als "Goed" (NPR7910-1). Aangezien binnen woningen de ventilatievoud vaak niet verder komt dan 2 keer per uur, moet deze als gematigd worden beschouwd (NPR7910-1) of als "geen ventilatie" wanneer de verversingsgraad minder dan 1 keer per uur is (NPR7910-1). Inzicht in het effect van ventilatie (of het ontbreken daarvan) op de opbouw van gevaarlijke concentraties bij lekkages is daarvoor nodig.

Mitigerende maatregelen die voorgesteld worden binnen pilotprojecten, omvatten H<sub>2</sub>-sensoren, gasstoppers en koppelingen tussen kleppen en sensoren, maar ook ventilatieopeningen tussen bijvoorbeeld de meterkast en omliggende ruimtes. Voor elk van deze maatregelen is het aan te bevelen om de effectiviteit aan te tonen in een gecontroleerde, onafhankelijke omgeving alvorens deze in pilots in te zetten. Op die manier kunnen toezichthouders op de veiligheid en andere stakeholders overtuigd worden van de effectiviteit van de betreffende mitigerende maatregel.

Het voorstel is om een onderscheid te maken tussen grote lekkages, waarvoor de gasstopper als maatregel wordt gezien, en kleine lekkages. De effectiviteit van de gasstopper bij het volledig wegvallen van de gasdruk wordt aangetoond in het kader van het 'Kenniscentrum Gasnetbeheer'<sup>6</sup> programma dat in opdracht van Netbeheer Nederland wordt uitgevoerd. Het experimentele programma van Hydelta richt zich op kleine lekkages (< 20 dm<sup>3</sup>/h) met bijbehorende maatregelen (sensoren, ventilatieopeningen, etc).

Doelstelling van het testprogramma is het bouwen van een geconditioneerde ruimte, waarin de diverse ontwikkelde mitigerende maatregelen voor kleine lekken in de woning kunnen worden getest op effectiviteit en functionaliteit. Het streven is daarbij om een 'worst-case' scenario te simuleren met een zo klein mogelijke ventilatievoud (< 1 /uur zoals hierboven genoemd). Met de experimenten wordt aangetoond hoe de ventilatievoud in (aanpalende) ruimtes effect hebben op de opbouw van concentraties bij kleine lekkages en daarmee het effect van ventilatie als mitigerende maatregel. Additionele mitigerende maatregelen zijn naast odorisatie van het gas, sensoren die eventueel gekoppeld zijn aan kleppen om daarmee de uitstroom tijdig te detecteren en te stoppen.

## 7 Experimentele opstelling

Om waterstoflekkages in een binnenruimte te bestuderen is gebruik gemaakt van een standaard kantoorunit container die flexibel is in te richten in verschillende ruimtes. Op deze manier kan in toekomstig onderzoek de meetinstallatie en inrichting van de container op een makkelijke manier worden uitgebreid.

<sup>6</sup> <https://www.kenniscentrumgasnetbeheer.nl/>

De inwendige afmetingen van de container zijn 600 cm x 250 cm x 250 cm (lxbxh) met een werkvolume van ongeveer 36 m<sup>3</sup>. Het voordeel van deze kantoorunit container is dat dat alle wanden vlak zijn en de unit geïsoleerd is, waardoor de container makkelijk in te richten is en ongecontroleerde invloeden van buitenaf (temperatuur, wind, etc.) tot een minimum beperkt zijn. Externe variabelen zoals de buitentemperatuur en windsnelheid, windrichting, zoninstraling worden gemeten gedurende de experimenten.



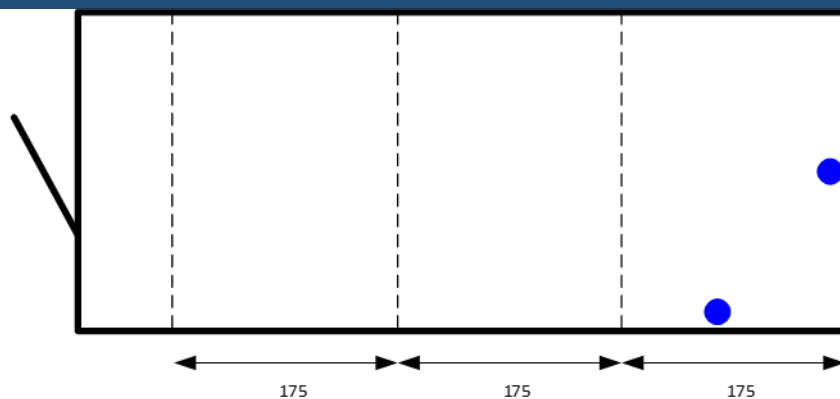
*Figuur 7 Foto van de standaard kantoorunit container*

### 7.1 Indeling van de container

De container heeft als doel waterstof- en methaanlekkages in binnenruimte te kunnen simuleren en te kunnen vaststellen hoe het uitstroomprofiel in de ruimte verloopt.

De container is flexibel in te richten in verschillende ruimtes. Op de wanden, vloer en plafond zijn houten regels aangebracht, zodat de binnenruimte (zowel verticaal als horizontaal) is te verdelen in compartimenten. Tegen de houten regels kunnen platen worden gemonteerd om zo de binnenruimte te kunnen verdelen in compartimenten van 10, 20 of 30 m<sup>3</sup> (zie ook Figuur 8).

In deze compartimenten kunnen te bestuderen objecten zoals een meterkast, keukenkast, kranen, etc. worden geplaatst. De meterkast uit het eerdere onderzoek voor Alliander kan hierbij hergebruikt worden [6]. Voorafgaand aan de experimenten wordt de container verwarmd tot 20°C. Indien nodig zal de container worden afgeschermd van direct zonlicht.



Figuur 8 Indeling van de container (bovenaanzicht) met de in te richten ruimtes van 10-20-30m<sup>3</sup> (rechts naar links) en met de locatie van de uitstroom (blauwe punten)

Om de verspreiding van gas in de container te volgen is er een matrix van 50 gassensoren geplaatst waarbij op verschillende plaatsen de methaan- of waterstofconcentratie gemonitord kan worden. De sensoren zijn gekalibreerd in de container door de leverancier. Gedurende de testen zijn een aantal sensoren steekproefsgewijs getest met kalibratiegassen met bekende samenstelling. Uit deze testen bleek dat de sensoren inderdaad de correcte concentraties meten.

Merk	GDS Technologies XDI-F6
Type sensor	Katalytische gas-sensor
Meetbereik methaan	0-5 vol% (0-100% LEL)
Meetbereik waterstof	0-4 vol% (0-100% LEL)

Tabel 1: Gegevens gas sensoren

De gassensoren worden met behulp van een stalen dradenrooster verspreid door de ruimte (zie Figuur 9). Per experiment kan de locatie van de sensoren worden aangepast.



Figuur 9 Matrix van sensoren aan de binnenkant van de container

## 7.2 Simulatie van een gas lekkage

Het simuleren van een gaslekkage in de container is in Figuur 10 schematisch weergegeven. Tijdens de experimenten worden de methaan- of waterstofgasstromen gemeten met een Bronkhorst EL-FLOW massflowcontroller. De uitstroom van gas zal tussen 0-20 dm<sup>3</sup>/uur bedragen, ruim boven de norm voor aardgaslekkages in een meterkast (5 dm<sup>3</sup>/uur)<sup>7</sup>. De maximale flow voor waterstof is 20 dm<sup>3</sup>/uur en voor methaan 15 dm<sup>3</sup>/uur. Het gas stroomt in de container met behulp van een gas kogelafsluiter (Figuur 11). Om de veiligheid tijdens de experimenten te waarborgen is voor 49 gassensoren een grenswaarde van 50%LEL toegekend. Bij een overschrijding daarvan zal de spanning van de massflowcontroller wegvallen waardoor de regelklep (NC)<sup>8</sup> dicht valt en er geen gas meer naar de container stroomt. Als extra veiligheidsmaatregel is een sensor geplaatst die onafhankelijk van de andere sensoren een signaal naar de NC klep geeft bij een overschrijding van 60% van de LEL. De operator zal in beide gevallen gealarmeerd worden zodat de container gelucht kan worden. Verder wordt tijdens de experimenten een druk van 30mbar worden gebruikt.

<sup>7</sup> NEN 8078:2004

<sup>8</sup> De NC klep is een normaal gesloten klep, dat wil zeggen dat bij een stroomuitval de klep automatisch sluit

Methaan  
of waterstof

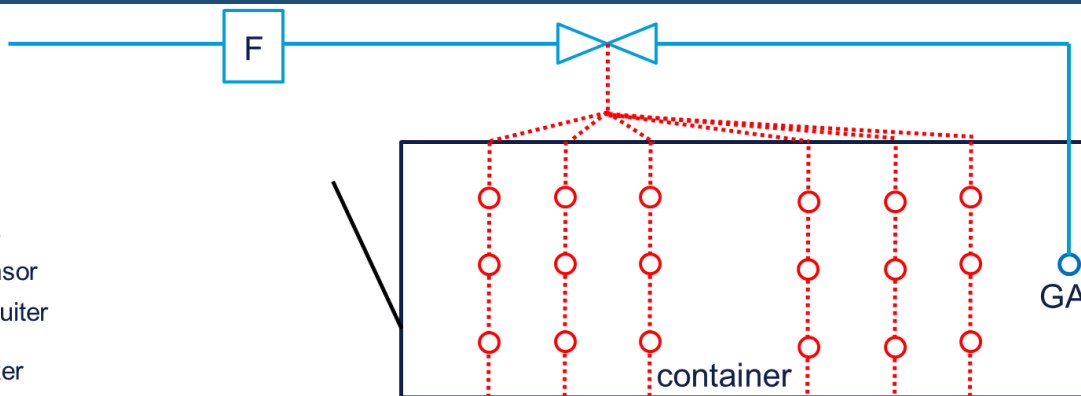
Symbol legend

○ Gas sensor

○ Gas afsluiter

F Flowmeter

NC (normal gesloten)  
klep



Figuur 10 Schematisch overzicht van de gasuitstroom



Figuur 11 Gasafsluiter met opening voor uitstroom

### 7.3 Ventilatie

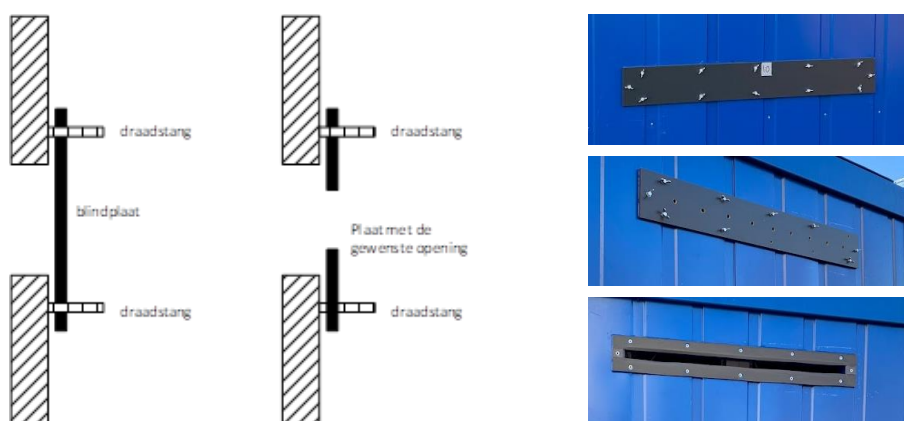
De ventilatie in de container dient gecontroleerd en gemeten te kunnen worden om daarmee uitspraken te kunnen doen over het effect van ventilatie op de verspreiding van waterstof in de rond het lek aangebrachte aanpalende ruimtes in de container.

Zoals in Figuur 12 is weergegeven zijn aan beide zijkanten van de container 6 ventilatieopeningen (50 cm x 2 cm) aangebracht; drie openingen op 200 cm hoogte en drie openingen op 90 cm hoogte.



Figuur 12 Foto van zijkant van de container met de 6 ventilatieopeningen

Rondom de openingen zijn draadeinden gelast zodat deze eenvoudig, met flensverbindingen dicht kunnen worden gemaakt of kunnen worden voorzien van een plaat met de gewenste uitstroomopening.



Figuur 13 Ventilatieopeningen; rechts van boven naar beneden: gesloten, met 9 gaatjes en open

De ventilatieopeningen zijn 50x2cm (lxb) bij volledige openingen. Voor een aantal experimenten is een plaat gemaakt met 9 gaten met een diameter van 1cm.

## 8 Gasuitstroom experimenten in container

De experimenten zijn onderverdeeld in twee fasen:

- Fase 1: metingen in een container zonder tussenwanden (36 m<sup>3</sup>), waarbij gekeken wordt naar de functionaliteit van de opstelling (stromingsprofiel, LEL-waarden en ventilatievoud).
- Fase 2: de binnenruimte wordt opgedeeld in twee compartimenten van 10 m<sup>3</sup> en 26 m<sup>3</sup> door het plaatsen van een tussenwand met een deur. Hiermee wordt een in de hal geplaatste

meterkast gesimuleerd waarbij de hal is verbonden op een grotere kamer. In beide compartimenten en in de meterkast worden de uitstromingsprofielen voor waterstof en aardgas gemeten.

In onderstaande tabel is een overzicht van de testen weergegeven. De duur van de testen varieerde afhankelijk van de bereikte concentratie en mogelijkheid tot ontlichten (buiten kantooruren kan er geen uitstroom plaatsvinden).

Meetserie	Opstelling	Type gas	Lekgrootte (dm <sup>3</sup> /h)	Variatie:
Fase 1: 1.1-1.3 en 1.9	36 m <sup>3</sup>	Methaan	10-15	Ventilatievoud bepalen bij: geen ventilatie, rooster open en deur open. In eerste instantie bij maximale lek grootte
Fase 1: 1.4-1.8	36 m <sup>3</sup>	Waterstof	15-20	Ventilatievoud bepalen bij: geen ventilatie, rooster open en deur open. In eerste instantie bij maximale lek grootte
Fase 2: 2.1-2.7 en 3.6-3.7	10+26 m <sup>3</sup>	Waterstof	15-20	Meterkastdeur open/dicht; roosters meterkast open/dicht; ventilatieroosters open/gaatjes/dicht
Fase 2: 3.1-3.5	10+26 m <sup>3</sup>	Methaan	10-15	Meterkastdeur open/dicht; roosters meterkast open/dicht; ventilatieroosters open/gaatjes/dicht

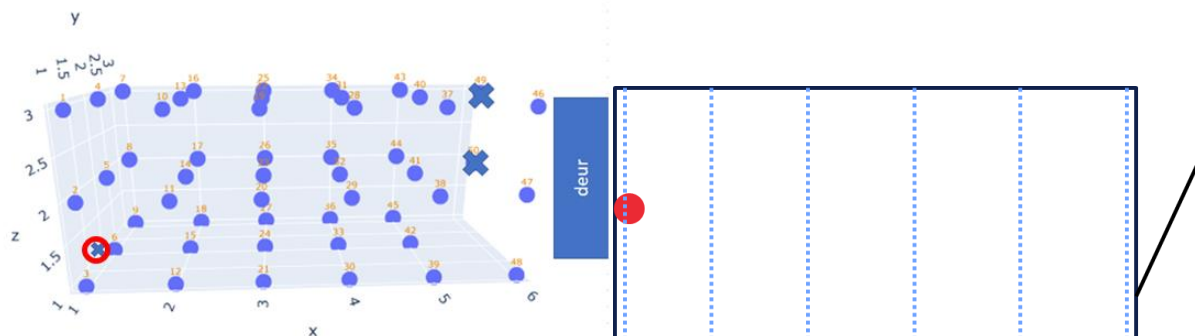
Tabel 2: overzicht experimenten

In dit hoofdstuk worden de metingen uit beide fasen beschreven. In het volgende hoofdstuk worden de verschillende metingen vergeleken en verder bediscussieerd.

## 8.1 Fase 1. Uitstroomexperimenten zonder opdeling binnenruimte

### 8.1.1 Concentratieprofiel in container

In deze fase wordt de gehele binnenruimte van de container gebruikt. In Figuur 14 zijn de posities van de gassensoren in de container weergegeven.

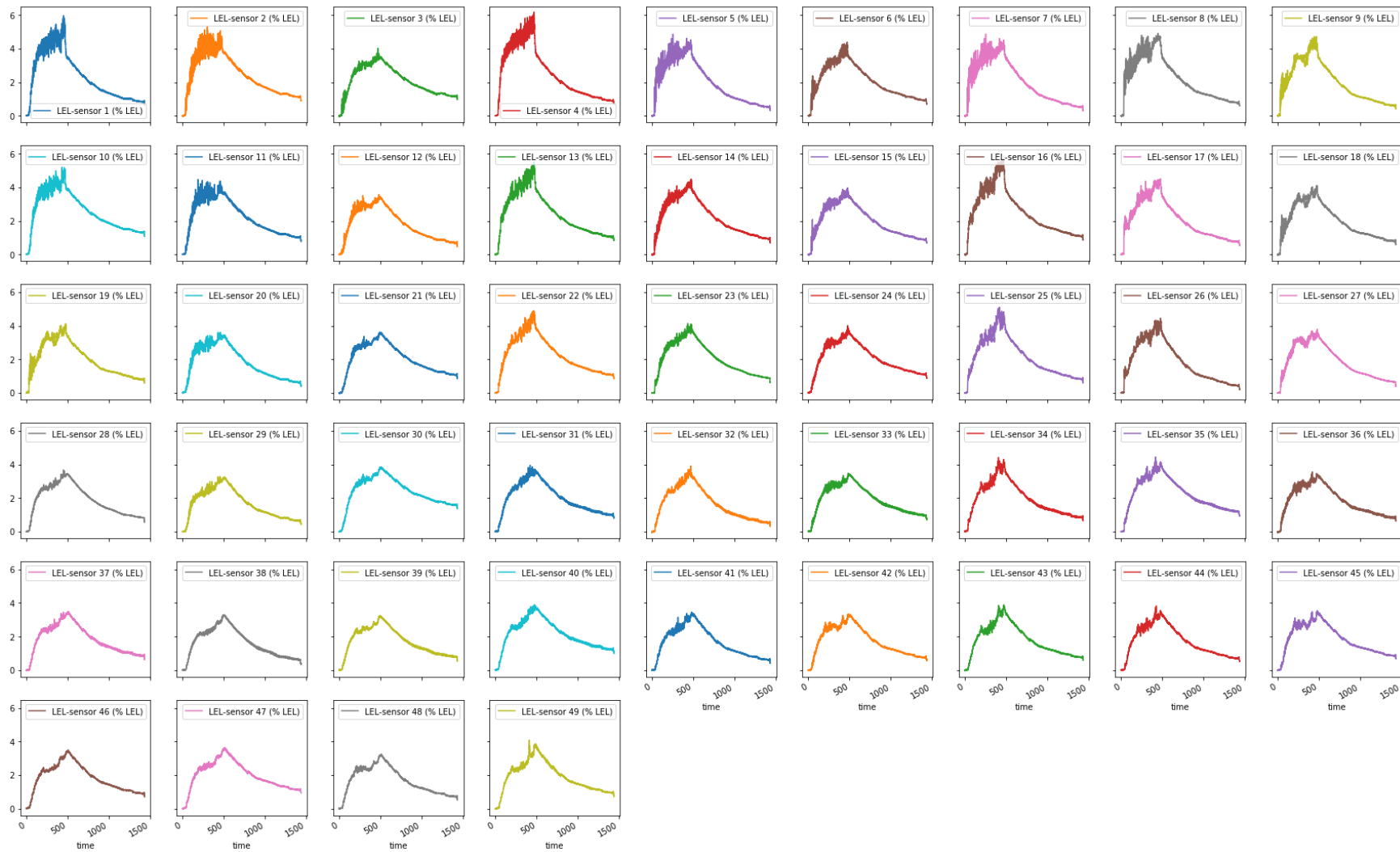


Figuur 14 Links: positie van de gassensoren in de container. Gassensor 50 is gebruikt als extra beveiliging (met grenswaarde van 60% van de LEL). Rechts: bovenaanzicht van de gassensoren (blauw gestippelde lijnen) en gasuitstroom punt (rode stip)

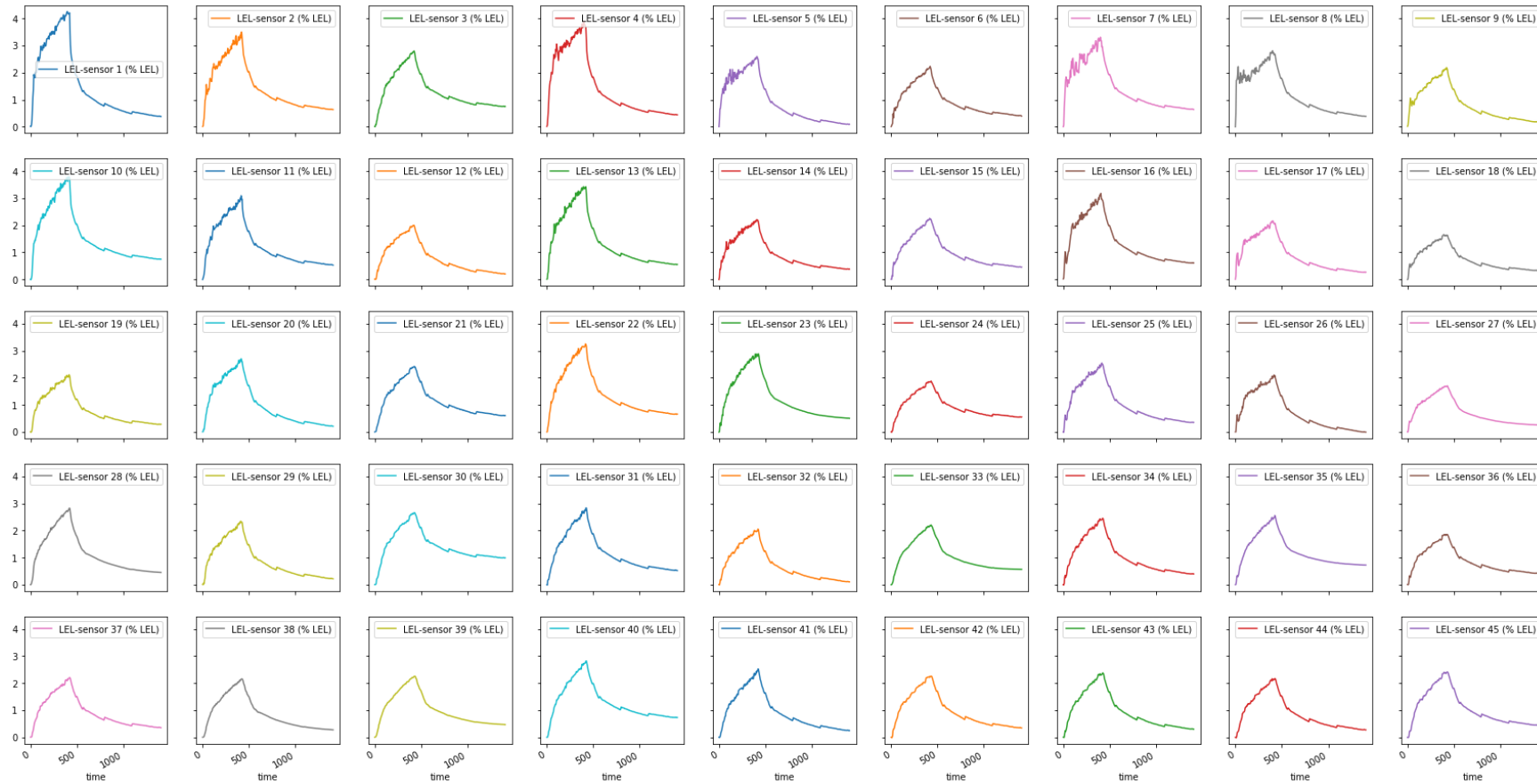
Alvorens te beginnen met de uitstroomexperimenten wordt de container met behulp van een elektrische kachel op kamertemperatuur gebracht (20°C). Tijdens de uitstroomexperimenten wordt de verwarming om veiligheidsredenen uitgeschakeld en de gastoevoer naar de container geopend. Aan het eind van de dag wordt de gastoevoer afgesloten. De metingen door de sensoren worden doorgezet tot de volgende ochtend. Figuur 15 laat de meetresultaten van de sensoren zien van een waterstofuitstroomexperiment met een gesloten container ( $H_2$  uitstroom van  $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ). Elke rij geeft de metingen van de 9 sensoren in 1-vlak in de x-richting, zoals aangegeven in Figuur 14. De resultaten laten zien dat de maximale waterstofconcentratie ongeveer 6% van de LEL is (0.24 vol%  $H_2$  in lucht) bij een lekkage die ongeveer 7.5 uur duurt. Voor methaan werden bij eenzelfde lekuitstroom, vergelijkbare waarden gevonden (max. 0.22 vol%  $CH_4$  in lucht) zoals weergegeven in Figuur 16 Meetresultaten van de sensoren (methaan, uitstroomsnelheid van  $15 \text{ dm}^3/\text{h}$ , gasstroom gedurende  $\sim 7.5$  uur aan, gesloten container). De weergegeven tijd is in minuten. Figuur 16. In Figuur 15 is ook goed het effect van het uitschakelen van de gastoevoer naar de container te zien: de gemeten concentratie neemt na het uitschakelen van de gastoevoer af.

Om inzicht te krijgen in de concentratieopbouw tijdens de uitstroomexperimenten, zijn de meetresultaten van de gassensoren en de locatie van de sensoren in de container met behulp van software (Python) gecombineerd tot een 3D-afbeelding met vlakken van gelijke concentratie (isosurfaces). Figuur 17 laat het resultaat zien, een tijdsverloop voor een waterstofuitstroomexperiment vanaf het moment dat de gastoevoer naar de container is geopend (links) en gesloten (rechts). Nadat de gastoevoer is geopend verplaatst het lichtere gas zich voornamelijk via de bovenkant van de container naar de achterkant.

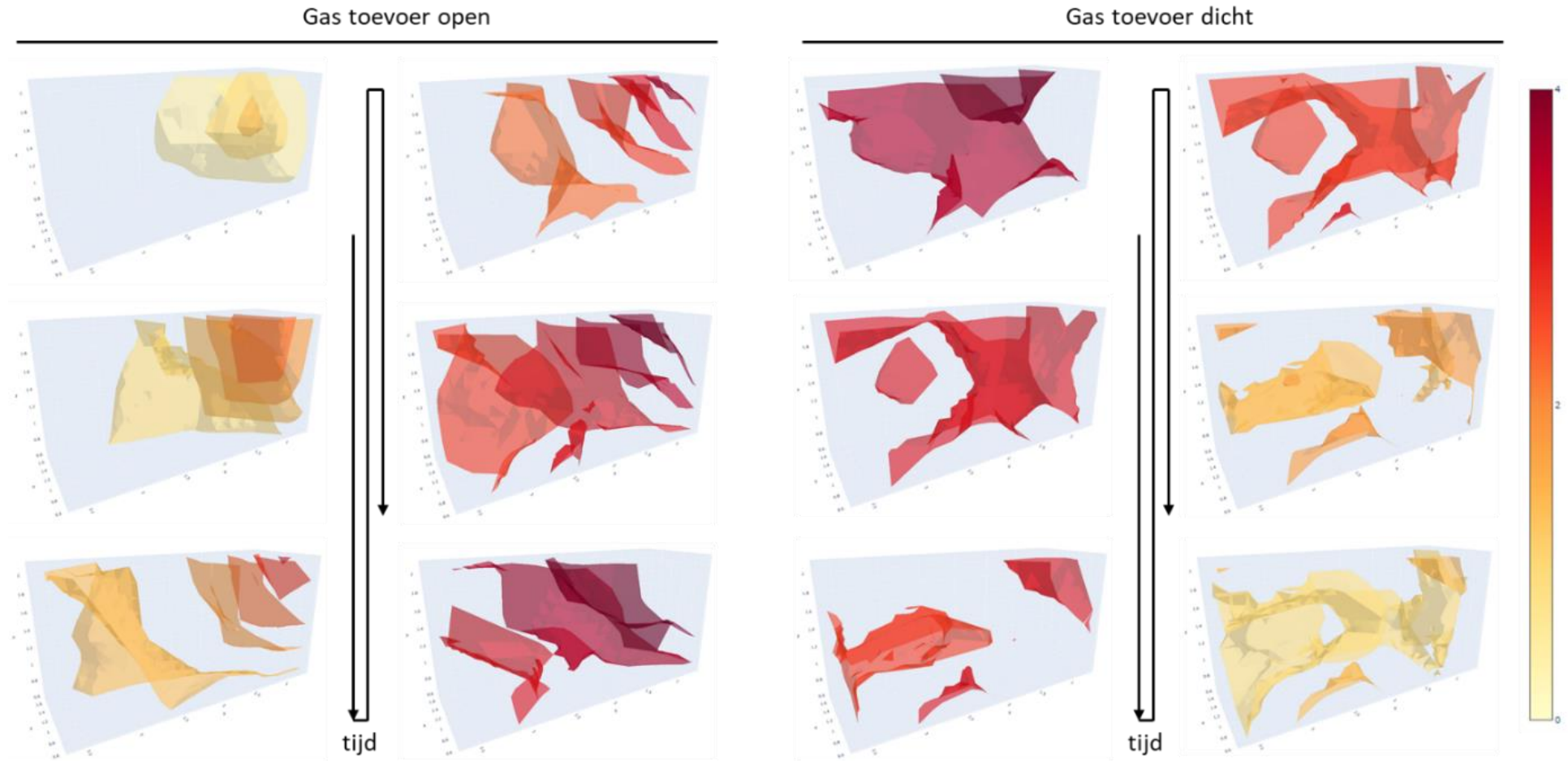




Figuur 15 Meetresultaten van de sensoren (waterstof, uitstroomsnelheid van 15 dm<sup>3</sup>/h, gasruimte gedurende 7.5 uur aan, gesloten container). De weergegeven tijd is in minuten.



Figuur 16 Meetresultaten van de sensoren (methaan, uitstroomsnelheid van 15 dm<sup>3</sup>/h, gasstroom gedurende ~7.5 uur aan, gesloten container). De weergegeven tijd is in minuten.



Figuur 17 Stromingsprofiel van waterstof in een gesloten container met de gastoevoer naar de container open(links) en gesloten (rechts). Uitstroomsnelheid van 15 dm<sup>3</sup>/h, waarbij de gasstroom gedurende 7.5 uur aan was. De uitstroomblocatie bevindt zich rechts achterin de container.

Op het moment dat de gastoevoer gesloten wordt, treedt er een gelaagdheid op (stratificatie) in de gasconcentratie, waarbij de hoogste concentratie aan de bovenkant van de container gevonden wordt. De concentratie gas loopt dan langzaam terug in de hele container afhankelijk van de mate van ventilatie. Zonder opening van de ventilatieroosters of de deur lijkt het gas in het midden van de container te verdwijnen, voor- en achterin de container blijft de concentratie een fractie hoger. Soortgelijke trends worden bij de testen met methaan geobserveerd, er wordt daarbij geen zichtbaar verschil in stratificatie gezien tussen de methaan als waterstof situatie.

### 8.1.2 Ventilatievoud

Uit Figuur 15 blijkt al dat de gebruikte container niet volledig luchtdicht is. Het is dus onvermijdelijk dat er een (kleine) instroom van buitenlucht is. Om te bepalen hoe groot deze stroom is, is de ventilatievoud bepaald door de gastoevoer te stoppen en het verval van de concentratie te monitoren. De ventilatievoud wordt berekend aan de hand van een rekenmodel [7], oorspronkelijk bedoeld voor de beschrijving van de afvoer van rookgassen in een luchtbehandelingsruimte ruimte. In dit rapport wordt een vereenvoudigde versie van het model gebruikt, waarbij wordt aangenomen dat de gassen zich homogeen vermengen met de lucht. In dat geval geldt bij het stopzetten van de gastoevoer naar de container dat de gasconcentratie zal afnemen volgens:

$$Cg(t) = Cg(t_s)e^{-Rt} + Cg_f \quad (1)$$

Waarin:

$Cg(t)$  = concentratie op tijdstip  $t$  [% LEL]

$Cg_f$  = eindconcentratie [% LEL]

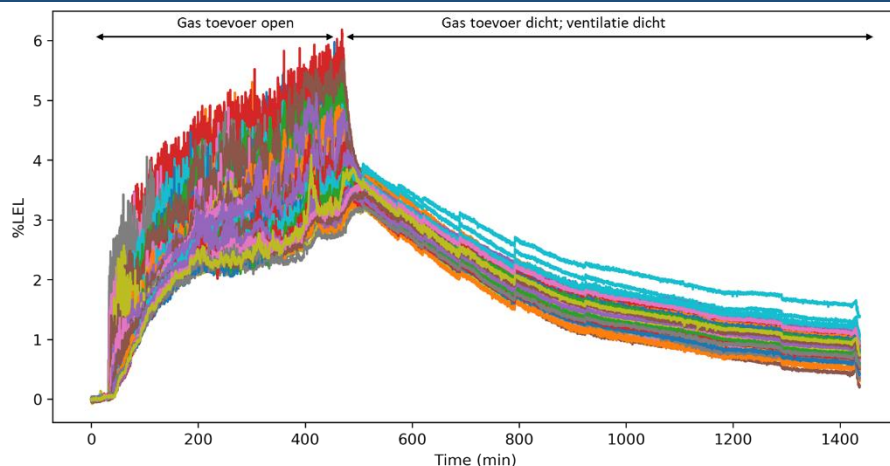
$t$  = tijd [uur]

$t_s$  = tijdstip van stoppen gastoevoer [uur]

$R$  = ventilatievoud [1/uur], dit is het aantal keren per uur dat de lucht in de container ververst wordt

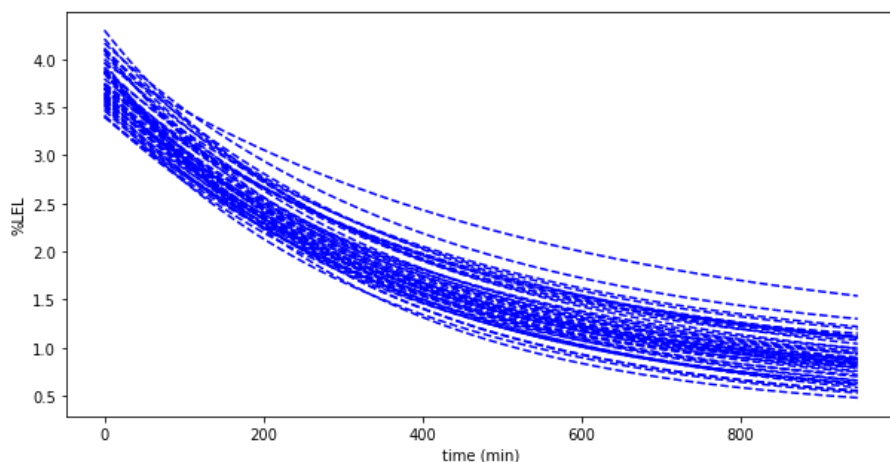
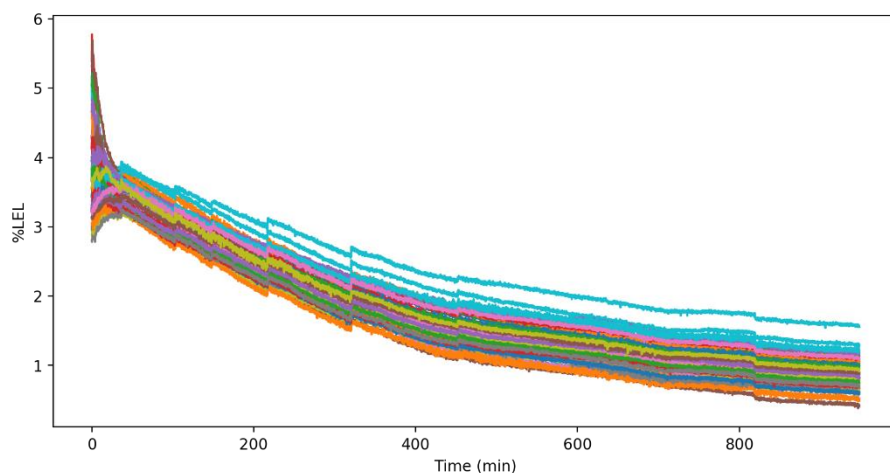
In Figuur 18 is het concentratieverloop na het openen en het sluiten van de gastoevoer voor de 50 sensoren weergegeven (zelfde omstandigheden als in Figuur 15). Ondanks dat alle sensoren met dezelfde beginwaarde starten, is er een spreiding in de concentratie tussen de sensoren te zien. In de nacht koelde de container af (10 graden of meer). De temperatuurafhankelijkheid van de sensoren is mogelijk per sensor verschillend waardoor verschillen in gemeten waarden kunnen ontstaan. Het verdient aanbeveling om in een volgende fase van de experimenten (HyDelta 2) de temperatuur van de ruimte zo constant mogelijk wordt gehouden om deze verschillen te minimaliseren door gedurende de metingen de verwarming aan te houden. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de verschillen zeer gering zijn (1% LEL spreiding, oftewel 0.04 vol% H<sub>2</sub> in lucht). Dergelijke verschillen zijn ook voor de methaanuitstroom experimenten waargenomen<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Latere additionele testen bevestigen dat als na afloop van het beschreven experiment de verwarming weer wordt aangezet, de metingen van de verschillende sensoren weer dichterbij elkaar (rond 0%LEL) komen te liggen. De afhankelijkheid van de temperatuur lijkt echter per sensor verschillend te zijn.



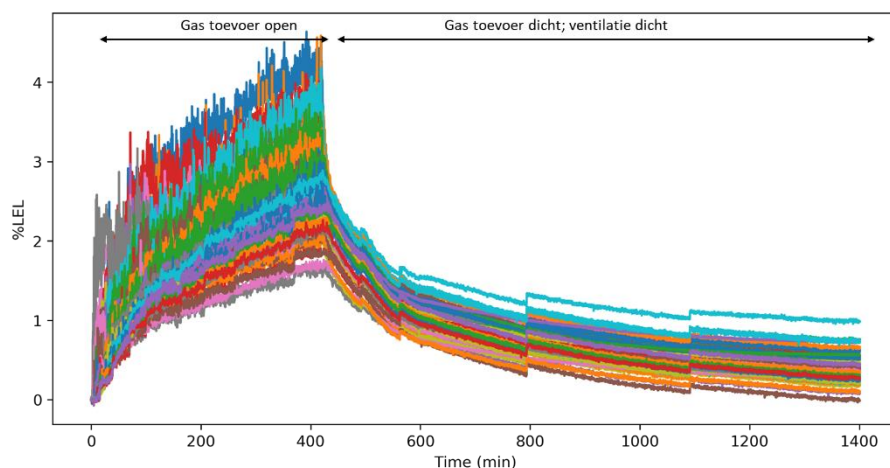
*Figuur 18 Gemeten concentratieprofielen van een waterstofuitstroom (15 dm<sup>3</sup>/uur) in een gesloten container met de gastoevoer naar de container open en gesloten. De gastoevoer was gedurende 7.5 uur geopend*

In Figuur 19 is het concentratieverloop als functie de tijd weergegeven (boven). Dit verloop is gefit aan vergelijking (1) om de ventilatievoud R te bepalen.



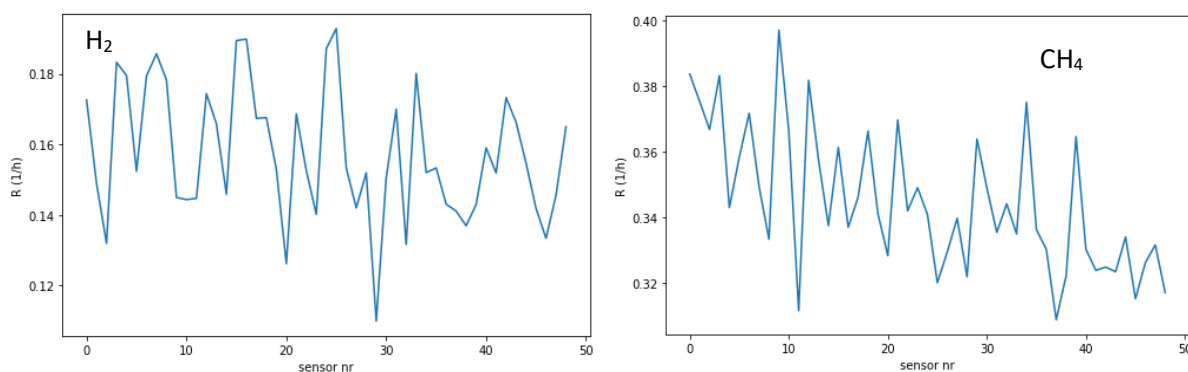
*Figuur 19 Gemeten waterstof concentratie verloop (boven) en fits volgens vergelijking (1) (onder). Het gaat hierbij om een waterstof experiment in een gesloten container zonder ventilatie.*

Voor een vergelijkbaar experiment met dezelfde uitstroom ( $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ) met methaan is de concentratieopbouw en afname weergegeven in Figuur 20.



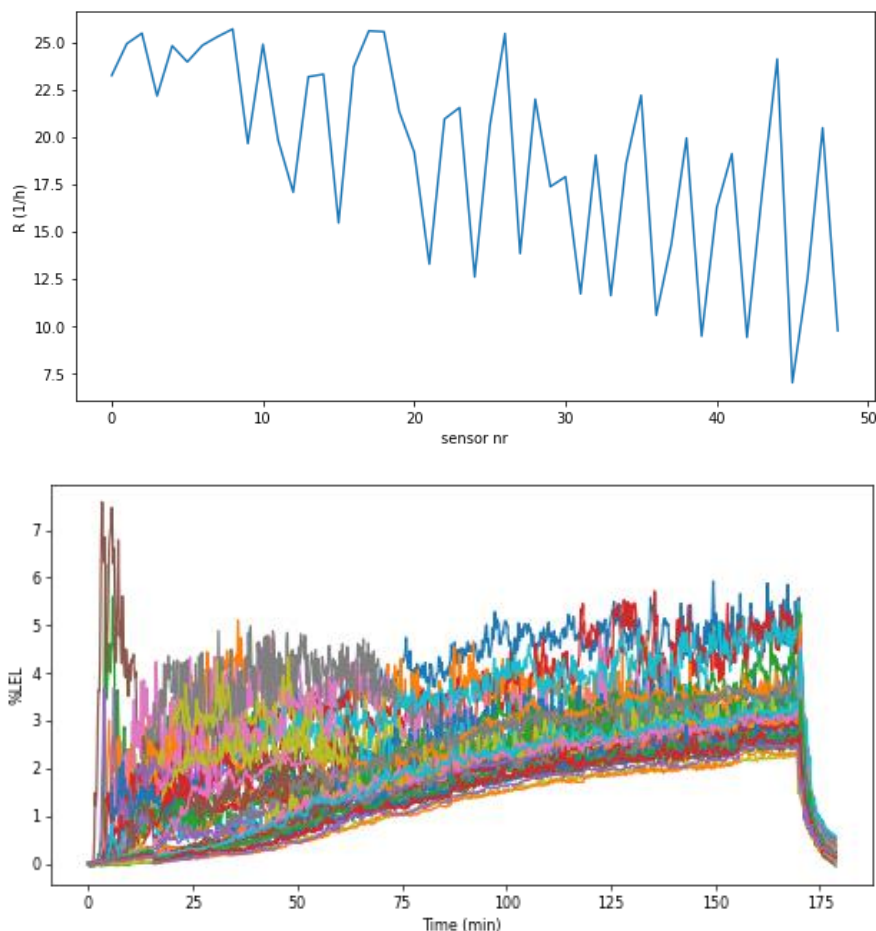
Figuur 20 Gemeten concentratieprofielen van een methaanuitstroom ( $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ) in een gesloten container met de gastoevoer naar de container open en gesloten. De gastoevoer was gedurende  $\sim 7.5$  uur geopend.

De resultaten per sensor voor waterstof en methaan zijn in Figuur 21 weergegeven. Opvallend is dat in deze testen (twee keer uitgevoerd voor zowel aardgas als waterstof) de ventilatievoud van methaan hoger is dan van waterstof. Dit is in tegenstelling tot de verwachting dat waterstof sneller wegdiffundeert door een hogere diffusiecoëfficiënt. Ook lijkt bij methaan de ventilatievoud voor de sensoren verder weg van het lek (sensoren 30-50) lager te zijn dan voor sensoren dicht bij het lek. Een directe verklaring voor dit verschijnsel is niet gevonden. Een mogelijke oorzaak van dit verschil zou de invloed van de wind op de container tijdens het meten kunnen zijn, waardoor meer natuurlijke ventilatie in de container kan optreden en daarmee stroming van het gas in de ruimte kan optreden. De aanname bij vergelijking (1) van homogene verdeling van de concentratie gaat in deze gevallen niet helemaal op gaat waardoor een afwijking kan optreden als gevolg van een verschillende beginconcentratie per sensor. In vervolgonderzoek zal dit nader bekeken moeten worden. Desalniettemin is in beide gevallen sprake van een zeer lage waarde van de ventilatievoud en van dezelfde orde grootte.



Figuur 21 Berekende ventilatievoud voor een waterstofuitstroom (links) en een methaanuitstroom (rechts) voor een gesloten container (uitstroomsnelheid van  $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ).

Vervolgens is gekeken naar de ventilatievoud waarbij de containerdeur is geopend. Het resultaat voor waterstof is in Figuur 22 weergegeven. Ook in deze meting wordt een lagere ventilatievoud gemeten bij de sensoren verder weg van het lek en in dit geval dicht bij de opening van de deur.



Figuur 22 Berekende ventilatievoud voor een waterstofuitstroom ( $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ) voor een container met een open deur. De figuur onder laat de opbouw en verval van de concentratie tijdens respectievelijk geopende uitstroom en deur.

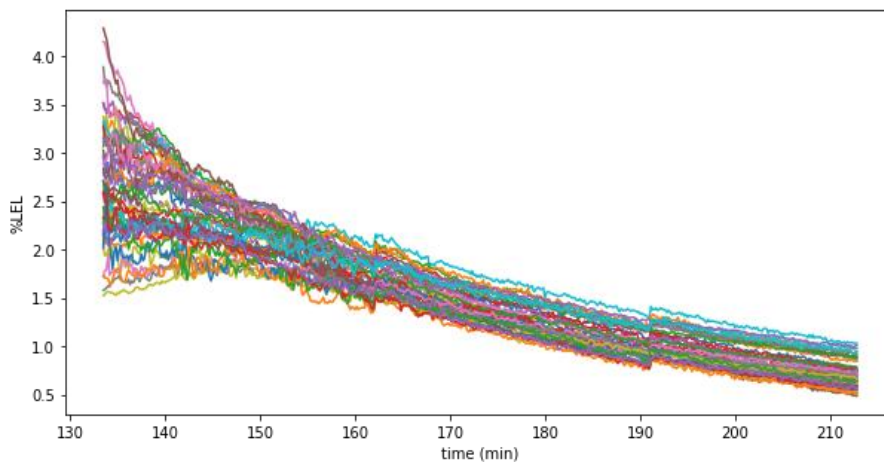
De ventilatievoud voor een situatie met een open deur in de container is twee orders hoger dan met een gesloten deur. Het openen van een deur kan een veilige methode zijn om de ruimte te beluchten bijvoorbeeld omdat de 50% van de LEL is bereikt, de concentratie is in deze gevallen in de orde van minuten weer gedaald tot nagenoeg 0%. Bij het experiment met aardgas waarbij de deur geopend werd, is een soort gelijke ventilatievoud gevonden.

Tot slot is er gekeken naar de ventilatievoud wanneer één van de ventilatieroosters aan de zijkant van de container wordt geopend. Allereerst wordt de waterstofgastoevoer naar de opgewarmde container geopend ( $20 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ) tot ongeveer 5% van de LEL is bereikt. Vervolgens wordt de gastoevoer gesloten en ventilatierooster nummer 8 (zie Figuur 23) geopend.



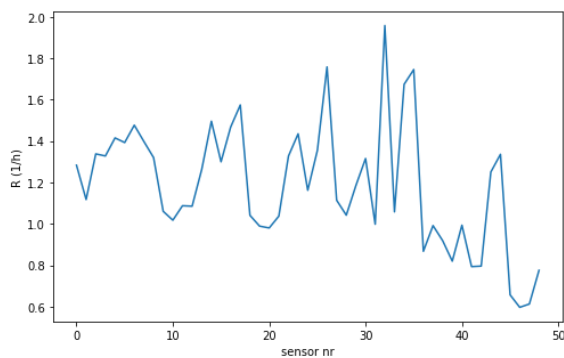
Figuur 23 Genummerde ventilatieroosters. In het beschreven experiment wordt rooster 8 geopend (rechts-midden-boven)

Het waterstofconcentratieverloop in de tijd gemeten door de geïnstalleerde sensoren is in Figuur 24 weergegeven. Op basis van dit concentratieverloop en met behulp van vergelijking (1) is de ventilatievoud bepaald (zie Figuur 25).



Figuur 24 Gemeten waterstof concentratie na openen ventilatierooster nr.8 (deur gesloten).

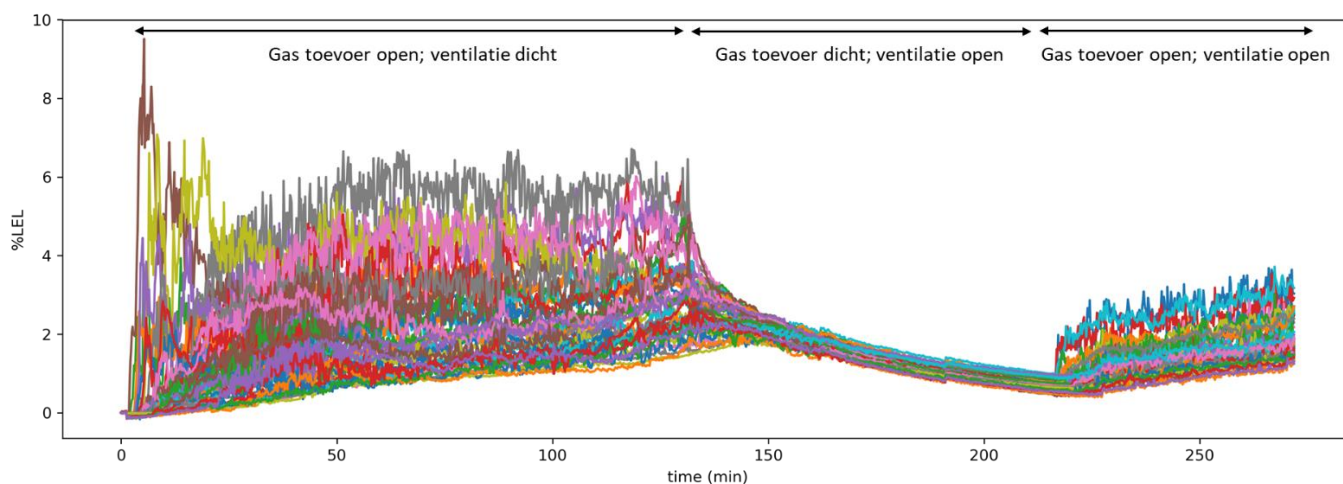
De verkregen ventilatievoud zit qua waarde tussen een gesloten container (Figuur 21) en een open deur (Figuur 22) in. Om het effect van het openen van de ventilatieopening op het concentratieverloop te bepalen, is de waterstofgastoevoer naar de container weer geopend.



Figuur 25 Berekende ventilatievoud R voor een waterstofuitstroom ( $15 \text{ dm}^3/\text{uur}$ ) in de container met ventilatierooster nr.8 open (deur gesloten).



In Figuur 26 is te zien dat de waterstofconcentratie in de container na het opnieuw openen weer toeneemt, maar dat de maximale concentratie door het openen van de ventilatieopening lager ligt dan de waarde in een gesloten container. Bij een ventilatievoud van ongeveer 1, wat overeenkomt met een slechte ventilatie in een woning, is de opbouw van de concentratie waterstof dus zeer gering. Het verschil tussen de situatie zonder ventilatie ( $R \approx 0.2$  /uur) en met slechte ventilatie ( $R \approx 1$  /uur) is dat in het eerste uur na opening van de lekkage de concentratie ongeveer de helft lager is. In de experimenten wordt in de hele container, zelfs zonder ventilatie geen evenwichtssituatie bereikt in de tijd die beschikbaar was voor de experimenten (max 8 uur).



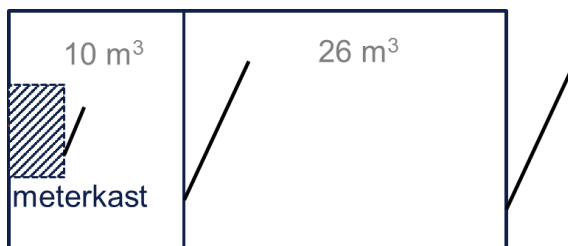
Figuur 26 Gemeten concentratieprofielen van een waterstofuitstroom (20 dm<sup>3</sup>/uur) met en zonder ventilatieroosters open.

## 8.2 Fase 2: Uitstroomexperimenten met meterkast, 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> ruimten

In de tweede fase is de binnenruimte opgedeeld in twee compartimenten van 10 m<sup>3</sup> en 26 m<sup>3</sup> door het plaatsen van een tussenwand met een deur. Hiermee wordt een in de hal geplaatste meterkast gesimuleerd waarbij de hal is verbonden op een grotere kamer. De meterkast is in de kleinste ruimte geplaatst en voorzien van drie sensoren (beneden, midden en bovenin de meterkast). De ruimte van 10 m<sup>3</sup> bevat daarnaast 24 sensoren, de overige sensoren bevinden zich in de ruimte van 26 m<sup>3</sup>. Figuur 27 laat foto's van de binnenruimtes en de locaties van de sensoren zien.



Figuur 27 Foto's van de opstelling voor fase 2.



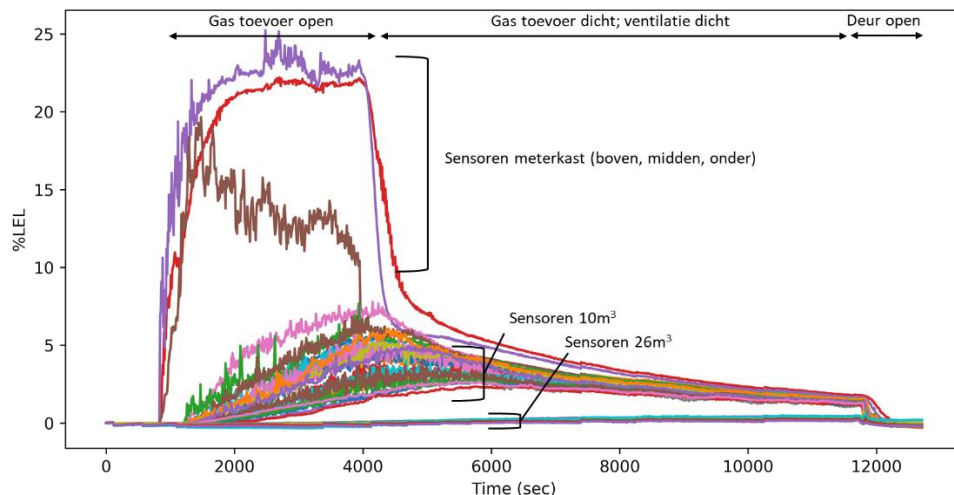
Figuur 28 Bovenkant van container met indeling voor fase 2 experimenten

In deze fase vindt de gasuitstroom in de meterkast plaats en wordt gekeken naar het effect van de meterkastdeur (open/dicht), ventilatieroosters in meterkastdeur en het effect van ventilatie in de container op het concentratieverloop in de verschillende ruimtes (meterkast, 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> ruimte). In de experimenten wordt de deur tussen de twee ruimtes dicht gehouden.

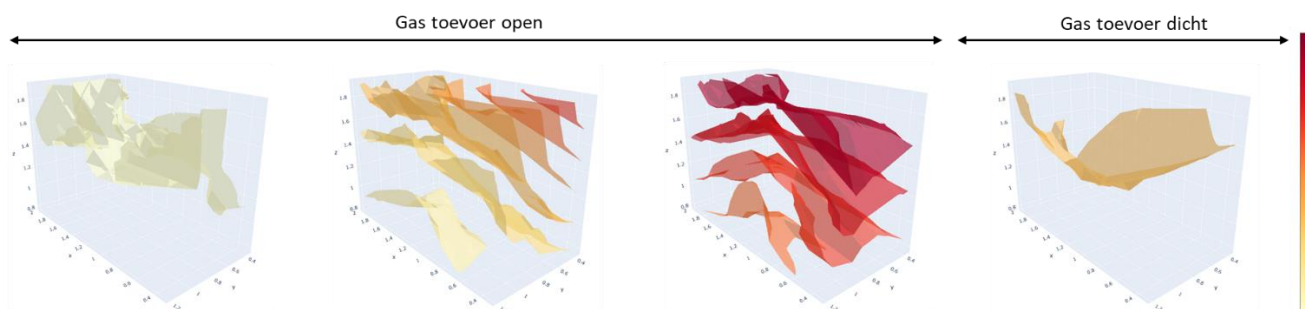
### 8.2.1 Verspreiding vanuit de meterkast

In Figuur 29 zijn de gemeten waterstofconcentratieprofielen van de sensoren in de meterkast en in de 10 en 26 m<sup>3</sup> ruimte weergegeven. De deur van zowel de meterkast als de deur tussen de 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> ruimte waren gesloten tijdens het experiment. Wanneer de waterstoftoevoer geopend wordt (20 dm<sup>3</sup>/uur) stijgt de concentratie in de kast voor de drie sensoren richting de 25% van de LEL (0.8 vol% gas in lucht). Overeenkomstig de observaties in fase 1, is een hogere concentratie aan de bovenkant van de kast waarneembaar. De concentratie bovenin de meterkast vakt na verloop van tijd af en bereikt een plateau waarde. Opvallend zijn de waarden van de onderste sensor: na een initiële gelijke stijging als de twee ander sensoren hoger in de meterkast, neemt de concentratie onder in de meterkast na verloop van tijd af. De waterstofconcentratie in de meterkast gemeten door de bovenste sensoren vakt af doordat er waterstof naar de 10 m<sup>3</sup> ruimte stroomt wat te zien is aan de toename van de waterstof concentratie van de sensoren in de 10m<sup>3</sup> ruimte. Waarschijnlijk stroomt het waterstof via het bovenste ventilatierooster in de meterkastdeur naar de andere ruimte, terwijl lucht van buiten de meterkast wordt aangezogen via het onderste rooster, zoals ook

waargenomen in eerder onderzoek [6]. De opbouw van de concentratie in de 10m<sup>3</sup> ruimte wordt weergegeven in Figuur 30. Hierin is duidelijk te zien dat de concentratie opbouwt van boven in de ruimte naar beneden. Door deze (ventilatie)stroming in de meterkast, wordt een lagere concentratie onderin de meterkast gemeten. De sensoren in de 26m<sup>3</sup> ruimte hebben gedurende het experiment geen waterstof waargenomen. Op het moment dat de gastoevoer gesloten wordt, is een scherpe daling van de waterstofconcentratie waar te nemen in de meterkast. Ook de sensoren in de 10 m<sup>3</sup> ruimte laten een daling in de waterstofconcentratie zien. Aan het eind van experiment wordt de deur van de container geopend en zakt de concentratie snel naar 0 %LEL.



Figuur 29 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de meterkastdeur gesloten is, maar de roosters in de meterkastdeur geopend zijn (waterstofuitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur).

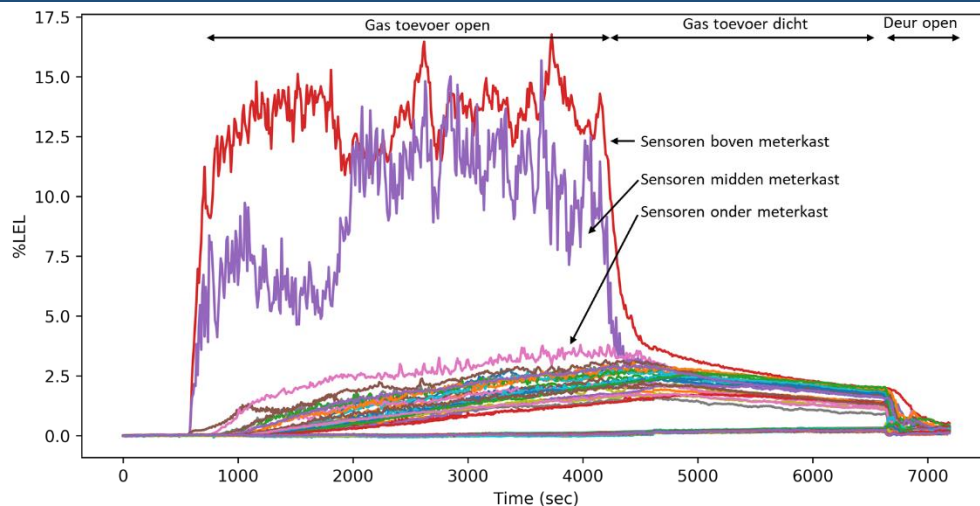


Figuur 30 Concentratieprofielen in de ruimte naast de meterkast (10m<sup>3</sup>). De kleurschaal wordt in %LEL weergegeven. De meterkast bevindt zich rechtsachter in deze ruimte (lange kant).

De resultaten met methaan als uitstroomgas laten vergelijkbare trends zien als bij waterstof (Figuur 31):

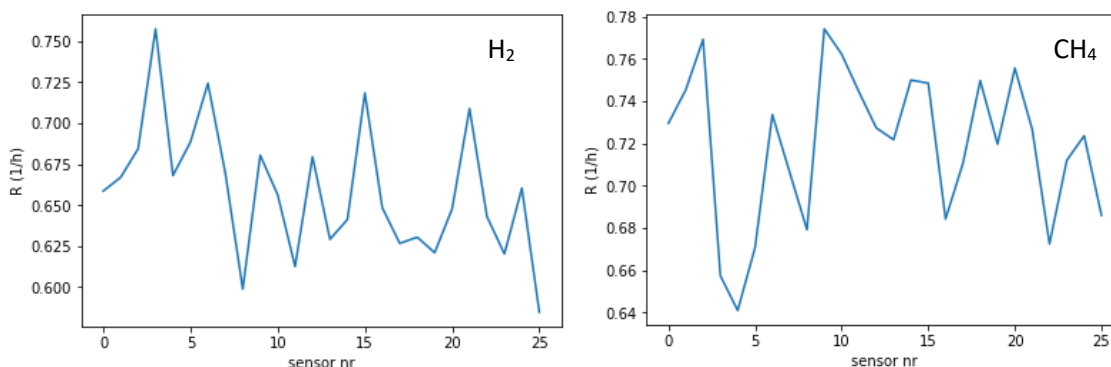
- Toename van methaanconcentratie in het bovenste deel van de meterkast
- Afvlakking van de methaanconcentratie vanwege doorstroming naar 10m<sup>3</sup> ruimte
- Snelle afname op het moment dat de gastoevoer wordt gesloten.

Ook bij dit experiment meten de bovenste en middelste sensoren in de kast de hoogste concentraties, terwijl de onderste sensor een veel lagere concentratie laat zien. Dit is te verklaren door de stratificatie die optreedt in de meterkast, maar ook in de ruimte daarnaast. De methaan 'ontsnapt' de meterkast aan de bovenkant en verzamelt vervolgens boven in de aanpalende ruimte. In vergelijking met waterstof valt wel op dat de concentraties methaan onder in de meterkast veel lager blijven dan bij waterstof het geval is.



Figuur 31 Gemeten concentratieprofielen van methaan waarbij de meterkastdeur gesloten is (15 dm<sup>3</sup>/uur).

Op basis van de afname in de waterstof- en methaanconcentraties na het sluiten van de gastoevoer is een ventilatievoud bepaald van de ruimte van 10m<sup>3</sup>. In deze experimenten wordt er niet geventileerd in de ruimte (ventilatioorster en deuren dicht) en zal het gas verdwijnen door natuurlijke afvoer via spleten. Hierbij zijn de resultaten van de sensor in de meterkast en de 10m<sup>3</sup> ruimte gebruikt. De resultaten zijn in Figuur 32 weergegeven en laten voor beide gassen een gelijke ventilatievoud zien. De ventilatievouden zijn in beide gevallen kleiner dan 1 keer per uur, lager dan in de metingen in fase 1 in de 36m<sup>3</sup> ruimte. Dit zou te verklaren kunnen zijn doordat het gas naast de ventilatie uit de container ook naar de ruimte van 26m<sup>3</sup> verdwijnt. In Figuur 29 en Figuur 31 laten een (zeer geringe) stijging van de concentratie bij de sensoren in deze ruimte zien, die dit vermoeden bevestigen. Toch kan geconcludeerd worden dat de gemeten ventilatievouden een ‘slechte’ ventilatie van de ruimte naast de meterkast vertegenwoordigen en dat door het plaatsen van ventilatieopeningen in de deur van de meterkast voorkomen kan worden dat de concentratie in de meterkast bij deze leksgrootte in de buurt van de LEL komt.



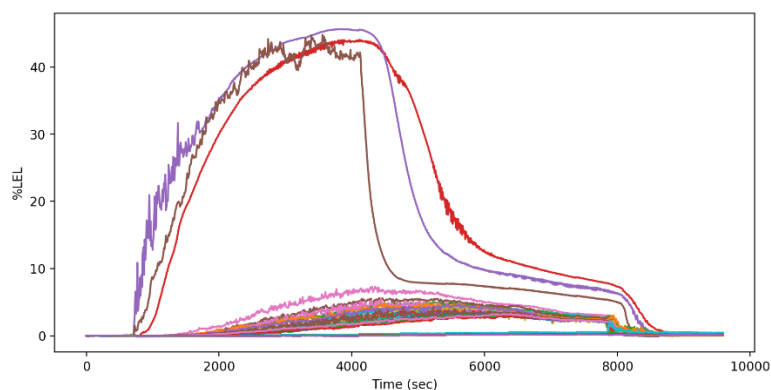
Figuur 32 Berekende ventilatievoud voor waterstof- (links) en methaanuitstroom(rechts) in de meterkast en de naastgelegen ruimte.

### 8.2.2 Effect van ventilatieroosters in deur

In het volgende experiment zijn de ventilatieroosters in de meterkastdeur (zie ook Figuur 27) afgeplakt en is tijdens het experiment zowel de meterkastdeur als de deur tussen de 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> gesloten gehouden. Figuur 33 laat het waterstofconcentratieverloop in de tijd zien voor de sensoren in de meterkast, 10 m<sup>3</sup> en 26 m<sup>3</sup> ruimten. Na het openen van de waterstoffoevoer (20

dm<sup>3</sup>/uur) neemt de waterstofconcentratie in de meterkast snel toe. Doordat de ventilatieroosters gesloten zijn is de maximaal gemeten waterstofconcentratie in de meterkast hoger dan met open ventilatieroosters (43% van LEL met gesloten roosters en 24% van de LEL met open roosters in Figuur 29). Dit resultaat laat zien dat het ventilatierooster een grote invloed heeft op concentratieopbouw in de meterkast. In deze situatie laat de onderste sensor in de meterkast een soortgelijk profiel zien als de bovenste 2 sensoren. Er ontstaat in deze test dus geen trek door de meterkast zoals in de testen met roosters wel het geval leek. Desondanks vlakt de concentratie voor alle drie de sensoren wel af op een waarde rond de 40 %LEL, waarmee er in de meterkast dus zelfs bij afplakken van de ventilatieroosters geen brandbaar mengsel vormt.

De sensoren in de 10m<sup>3</sup> ruimte laten na verloop van tijd ook een stijging in de waterstofconcentratie zien (max 8% van de LEL) wat suggereert dat een deel van de waterstof de 10m<sup>3</sup> ruimte bereikt (via kieren en gaten). Er is ook bij dit experiment geen waterstof waargenomen in de 26m<sup>3</sup> ruimte. Na het afsluiten van de waterstoftoevoer is er een snelle daling in de waterstofconcentratie waarneembaar voor alle sensoren. Op het eind van het experiment is een tweede scherpe daling waarneembaar wanneer de deuren in de container geopend worden.



*Figuur 33 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren. Na ongeveer 4000 sec wordt de toevoer afgesloten (20 dm<sup>3</sup>/uur), na ongeveer 8000 sec is de deur geopend.*

### 8.2.3 Effect van ventilatie in de container

Om het effect van de ventilatie in de container op het concentratieverloop te bestuderen is een ventilatieopening aan de zijkant van de container geopend. Bij deze experimenten is gekeken naar twee situaties: een volledig open ventilatieopening en één waarbij de ventilatieopening is voorzien van een gleuf met 9 gaatjes. Figuur 34 toont een foto van de gebruikte ventilatieopening voorzien van een gleuf met gaatjes.

Bij het eerste experiment is de gleuf met gaatjes voor de ventilatieopening geplaatst en is het waterstofconcentratieverloop in de container gemeten. Hierbij is de meterkastdeur en de deur tussen de 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> ruimte gesloten gehouden. De ventilatieroosters in de meterkastdeur zijn open gehouden tijdens het experiment. Figuur 35 laat de door de sensoren gemeten waterstofconcentraties zien.

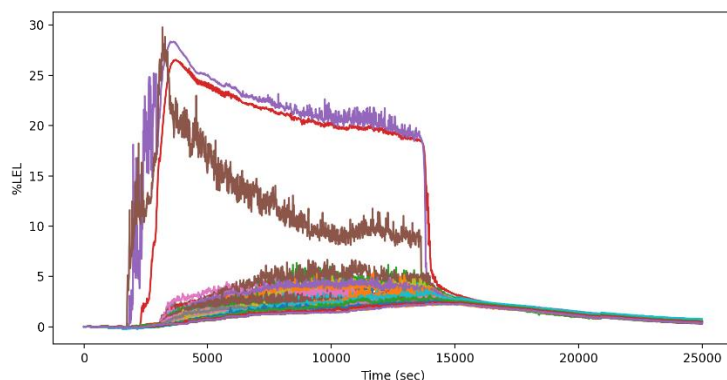


Figuur 34 Foto van ventilatieopening in de container voorzien van een gleuf met 9 gaatjes.

Dezelfde trends als bij een gesloten ventilatieopening in de container zijn waarneembaar (zie Figuur 29):

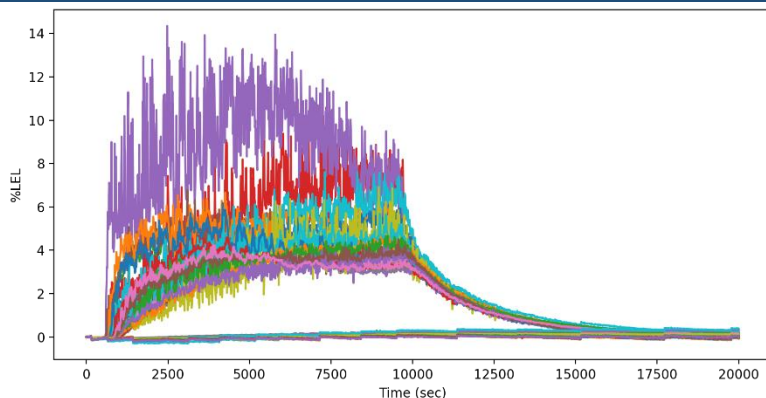
- Toename van de concentratie in het bovenste deel van de meterkast
- Afvlakking van de concentratie vanwege doorstroming naar  $10\text{m}^3$  ruimte
- Snelle afname op het moment dat de gastoevoer wordt gesloten.

Ook de maximaal gemeten waterstofconcentratie komt redelijk goed overeen met de waarde gevonden met een gesloten ventilatieopening, respectievelijk 28% en 24% van de LEL. Een verschil met de situatie zonder ventilatie in de ruimte van  $10\text{m}^3$  is dat de concentratie bovenin de meterkast, na verloop van tijd af neemt, waar deze in de situatie zonder ventilatie constant bleef. Een (geringe) ventilatie in de ruimte naast de meterkast lijkt daarmee een iets lagere concentratie in de meterkast te veroorzaken. Dit is in lijn met de verwachting: door de ventilatie kan de waterstof sneller ontsnappen uit de container.



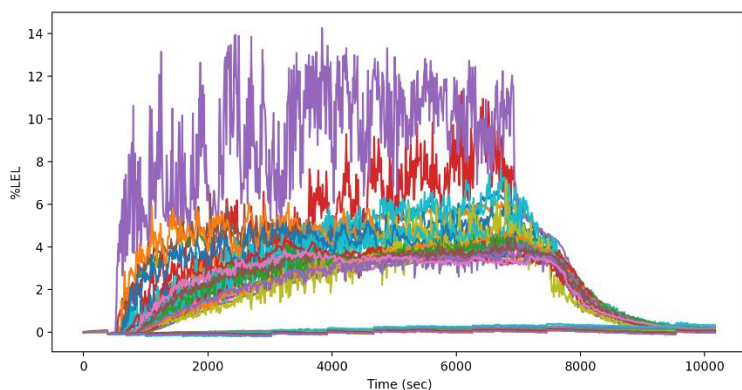
Figuur 35 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de meterkastdeur gesloten is en de ventilatieopening in de container voorzien is van een gleuf met 9 gaatjes (waterstofuitstroom van  $20\text{ dm}^3/\text{uur}$ ).

Figuur 36 laat het gemeten concentratieprofiel zien wanneer tijdens de experimenten de meterkastdeur geopend is. Alle sensoren in de meterkast en de  $10\text{m}^3$  ruimte laten een toename van de waterstofconcentratie zien, maar met een lagere maximale waarde dan wanneer de meterkast deur gesloten is (14% van de LEL bij open deur).



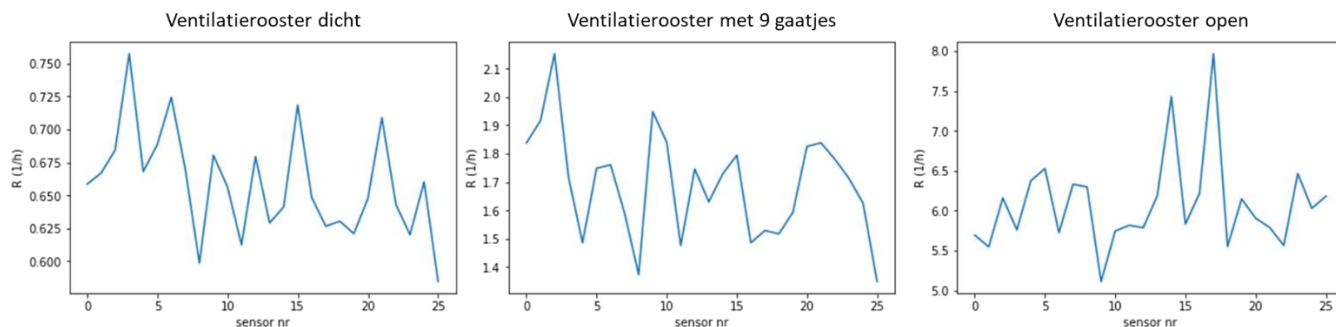
Figuur 36 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de meterkastdeur geopend is en de ventilatieopening in de container is voorzien van een gleuf met 9 gaatjes (waterstofuitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur).

In een volgend experiment is de gleuf in de ventilatieopening van de container verwijderd en is de meterkastdeur gedurende de meting geopend. Ook in deze situatie is de maximale waterstofconcentratie lager dan met een gesloten deur zoals in Figuur 37 te zien is. Bij afsluiten van de gastoevoer wordt, door de grotere ventilatieopening, de concentratie sneller verlaagd.



Figuur 37 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de meterkastdeur en ventilatieopening in de container volledig geopend is (waterstofuitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur).

Om het effect van de ventilatieopening (met en zonder gleuf) te bepalen zijn de ventilatievouden voor de drie hierboven beschreven situaties bepaald. Figuur 38 laat een overzicht zien van de berekende ventilatievouden. Het volledig openen van het ventilatierooster geeft een 10x hogere ventilatievoud in de ruimte. De berekende ventilatievoud (~ 6/uur) kan gekwalificeerd worden als een goede ventilatie in een woning. Het openen van een rooster met 9 gaatjes, levert een ventilatievoud van ongeveer 1.7 /uur (matige ventilatie) en is daarmee een factor 3 beter dan geen ventilatie en grofweg een factor 3 slechter dan een volledig geopend rooster. Daarmee kan de testcontainer dus goed gebruikt worden voor representatieve metingen met ventilatievouden die ook in typische woningen voorkomen.



Figuur 38 Berekende ventilatievoud voor waterstofuitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur in ruimte van 10m<sup>3</sup> bij verschillende ventilatioerooster instellingen.

## 9 Discussie van de resultaten van de experimenten

### 9.1.1 Opbouw van concentraties in de grote ruimte blijft ruim onder de LEL

In deze studie zijn uitstroomexperimenten uitgevoerd in een lege container en een container voorzien van een meterkast in een 10m<sup>3</sup> ruimte. De resultaten van de metingen laten zien dat voor uitstroomsnelheden tot 20 dm<sup>3</sup>/uur alle gemeten waterstofconcentraties onder de 100% van de LEL blijven.

Voor de experimenten in de niet-gesectioneerde maar wel gesloten container (fase 1) waren voor zowel waterstof als methaan de volgende trends waarneembaar:

- Na openen van de gastoevoer verplaatst het gas zich voornamelijk via de bovenkant van de container.
- Na het sluiten van de gastoevoer treedt een gelaagdheid op waarbij de hoogste concentratie aan de bovenkant van de container gevonden wordt.

Als de gemiddelde concentratie, gemiddeld over alle sensoren, wordt uitgezet tegen de tijd, bij de verschillende experimenten waarbij geen ventilatie werd toegepast, dan blijkt dat deze afvlakt maar nog geen plateau waarde bereikt. Door de maximale tijd voor de uitstroomproeven in de lege container (~8 uur), is deze experimenten geen plateau waarde gevonden. De relatieve kleine uitstroom in combinatie met het volume van de container zorgt ervoor dat de gemiddelde concentratie in de container slechts langzaam stijgt, zelfs bij geen ventilatie. Theoretisch kan afgeschat worden wat de eindconcentratie zal worden gegeven een bepaalde uitstroom, volume van de container en ventilatievoud. De afvlakking kan theoretisch benaderd worden door vergelijking (2).

$$\frac{Cg(t)}{LEL_{H_2}} = \frac{Q_g}{Q_g + VR} \left(1 - e^{-\frac{Q_g + VR}{V}t}\right) \quad (2)$$

Waarin:

$Cg(t)/LEL_{H_2}$  = concentratie op tijdstip t [% LEL]

$Q_g$  = gastoevoer [m<sup>3</sup>/uur]

t = tijd

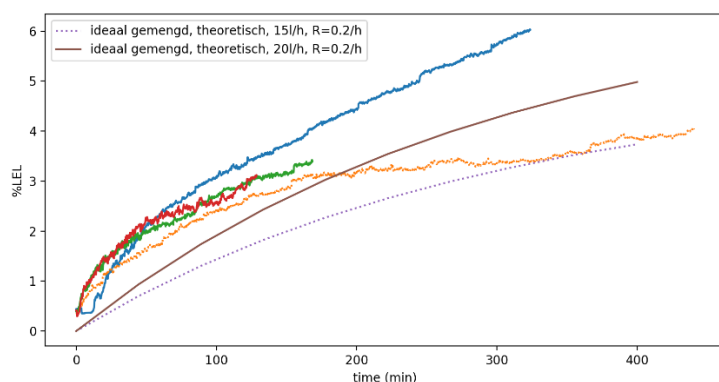
R = ventilatievoud [1/uur]

V = volume van de ruimte [m<sup>3</sup>]

In Figuur 39 zijn de 3 metingen met een uitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur en een meting met een uitstroom van 15 dm<sup>3</sup>/uur geplot samen met de benadering volgens de vergelijking. Uit deze benadering volgt dat de stationaire concentratie ( $Q_g/(Q_g + VR)$ ) respectievelijk 6.7 %LEL en 5.0 %LEL is voor een



uitstroom van 20 dm<sup>3</sup>/uur en 15 m<sup>3</sup>/uur. De curve fit is gefit met een ventilatievoud van 0.2 /uur en het volume van de lege container. Voor kleinere lekkages, zal de uiteindelijke concentratie nog lager zijn. Hiermee kan geconcludeerd worden dat bij lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/uur en een zeer beperkte ventilatievoud van 0.2 /uur, nooit concentraties nabij de LEL bereikt worden.



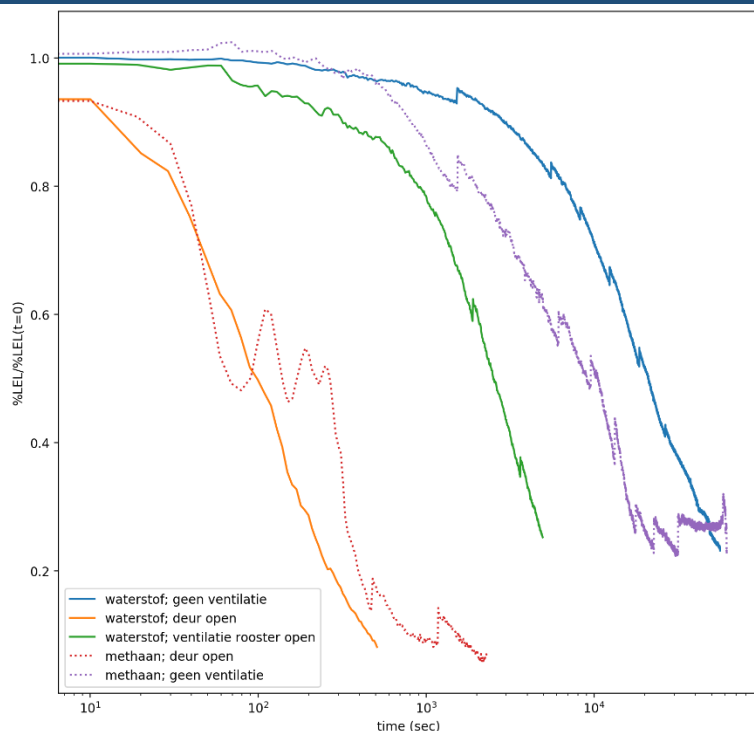
Figuur 39 Gemiddelde concentratieopbouw voor waterstof (20 dm<sup>3</sup>/h en 15 dm<sup>3</sup>/h) voor zowel de verschillende metingen als een theoretische benadering

### 9.1.2 Effect van ventilatie

Het openen van een ventilatieopening in de container en het openen van de containerdeur leidt tot een verhoging van de ventilatievoud en een snellere afname in de gemeten waterstofconcentratie. Dit is ook te zien in Figuur 40 waar het relatieve waterstof- en methaanconcentratieverloop te zien op het moment dat de gastoevoer gesloten is. De waterstofafname in de container duurt het langst bij een volledig gesloten container en heeft de kortste tijd bij een open container deur. Het openen van een deur doet de concentratie halveren in ongeveer 1-2 minuten, de bijbehorende ventilatievoud is dan ~15/uur. Ventileren via het openen van een ventilatie rooster ( $R \sim 1$ /uur) duurt ongeveer een half uur, terwijl bij geen ventilatie in de container ( $R \sim 0.2$  /uur) de concentratie in een aantal uur halveert. Wanneer de ventilatievoud groter is dan 5 keer per uur mag deze worden beschouwd als “Goed” (NPR7910-1). Aangezien binnen woningen de ventilatievoud vaak niet verder komt dan 2 keer per uur, moet deze als gematigd worden beschouwd (NPR7910-1) of als “geen ventilatie” wanneer de verversingsgraad minder dan 1 keer per uur is (NPR7910-1).

De gesloten container is daarmee veel lager dan ‘geen ventilatie’ en vertegenwoordigt een worst-case scenario. Bij een gesloten container is er een verschil te zien tussen de afname in methaan- en waterstofconcentratie. Ondanks dat de diffusiecoëfficiënt van waterstof hoger is dan van methaan, duurt de concentratieafname voor waterstof langer dan methaan. Nader onderzoek moet uitwijzen waardoor dit verschil wordt veroorzaakt, immer op basis van de fysische eigenschappen van waterstof zou het tegenovergestelde verwacht worden.

In de experimenten met de lege container levert het openen van 1 ventilatierooster een ventilatievoud van ongeveer 1/uur op. Het verschil tussen de situatie zonder ventilatie ( $R \sim 0.2$  /uur) en met slechte ventilatie ( $R \sim 1$  /uur) is dat in het eerste uur na opening van de lekkage de concentratie ongeveer de helft lager is. Beide situaties representeren slecht geventileerde ruimte in woningen. Zelfs een kleine verhoging van (slechte) ventilatie lijkt dus al een verlaging van de concentratie met een factor 2 te geven. Gegeven de lage concentraties die gemeten worden bij deze testen en de lange duur van de experimenten, zal in een vervolgfase van het onderzoek nader gekeken moeten worden naar het effect bij grotere uitstroomflows of kleinere ruimten. De verhouding tussen de grootte van de ventilatieopening en de ruimte zal daarbij gevarieerd dienen te worden.



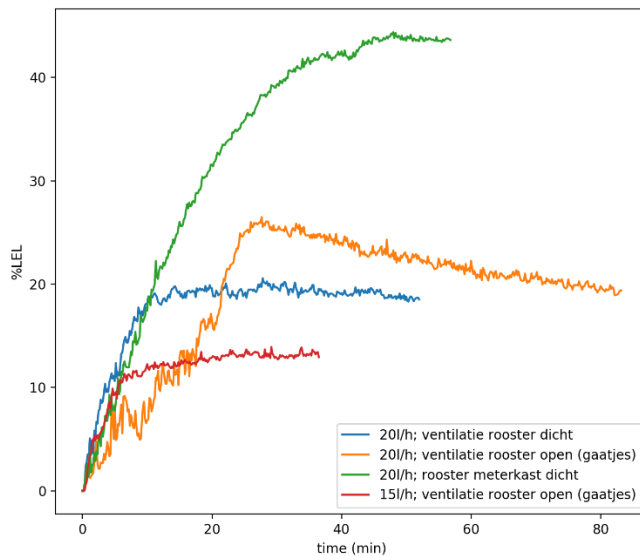
Figuur 40 Relatieve afname van waterstof en methaan concentraties in een open container (fase 1) op het moment dat de gastoevoer gesloten wordt.

### 9.1.3 Lekkage in een meterkast leidt ook tot concentraties lager dan de LEL.

Voor de experimenten met een meterkast (fase 2) zijn voor zowel waterstof- als methaanuitstromen in de meterkast de volgende trends waarneembaar:

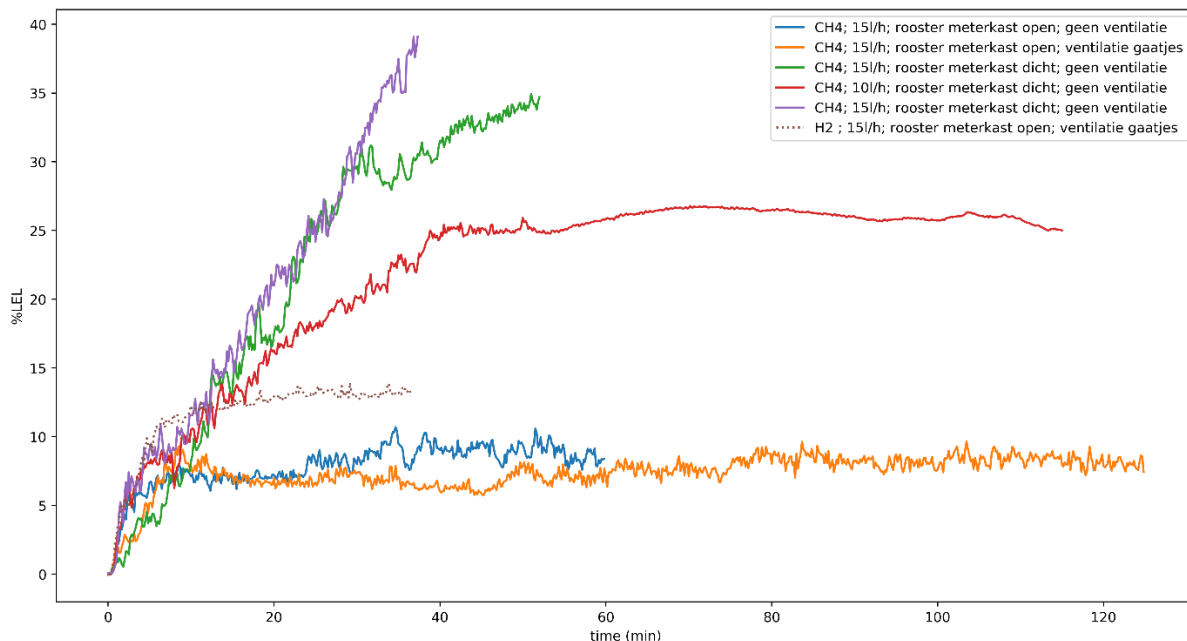
- Toename van de concentratie in het bovenste deel van de meterkast, maar nog steeds lager dan de LEL;
- Afvlakking van de concentratie vanwege doorstroming naar 10m<sup>3</sup> ruimte;
- Snelle afname op het moment dat de gastoevoer wordt gesloten;
- Bij een gesloten deur tussen 10m<sup>3</sup> en 26m<sup>3</sup> ruimte is er geen waterstof gemeten in de 26m<sup>3</sup> ruimte.

Figuur 41 geeft een samenvatting van het effect van gastoevoersnelheden, ventilatieroosters in de meterkastdeur en ventilatierooster in container op de gemeten waterstofconcentraties in de meterkast waarbij de meterkastdeur gesloten is. Hierbij moet worden opgemerkt dat het hierbij gaat om een gemiddelde van de drie sensoren in de meterkast. De hoogste waterstofconcentratie wordt bereikt wanneer zowel de ventilatieroosters in de meterkastdeur als de ventilatieopening in de container gesloten zijn. Het openen van de ventilatieroosters in de meterkastdeur leidt tot een significante afname in de gemiddelde waterstofconcentratie in de meterkast (43% naar 20% van de LEL). Ook een afname in de uitstroomsnelheid van 20 dm<sup>3</sup>/uur naar 15 dm<sup>3</sup>/uur heeft een verlaging van de gemiddelde waterstofconcentratie in de meterkast tot gevolg.



Figuur 41 Gemeten gemiddelde waterstofconcentraties in de meterkast bij verschillende configuraties

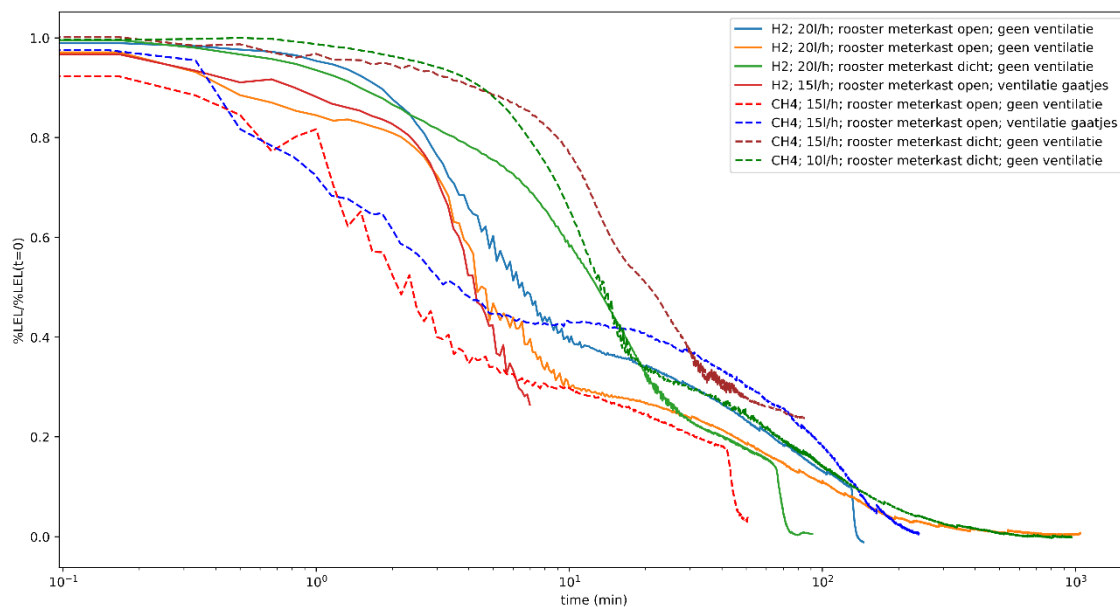
Figuur 42 laat het gemiddelde methaanconcentratieverloop zien in de meterkast wanneer de gastoevoer open is voor verschillende configuraties. Ter referentie is een corresponderende waterstofmeting toegevoegd aan de figuur. Ook in deze metingen valt op dat de concentratie afvlakt als de roosters in de deur van de meterkast open zijn. Vergelijkbare concentraties worden gemeten tussen waterstof en methaan boven in de meterkast. Zoals eerder opgemerkt laat de onderste sensor bij methaan een lagere waarde zien, waardoor het gemiddelde voor methaan in onderstaande grafiek lager is. Alleen als de roosters in de deur van de meterkast worden afgeplakt en de maximale gastoevoer wordt gebruikt, wordt de veiligheidswaarde van 50%LEL bereikt en is dit experiment afgebroken. In de experimenten is dit alleen bij methaan voorgekomen.



Figuur 42 Gemeten gemiddelde methaanconcentraties in een de meterkast bij verschillende configuraties. Een waterstofmeting is toegevoegd te referentie.

### 9.1.4 Sluiten van de gastoevoer leidt tot een snelle daling, daarna normale ventilatie

Zoals hierboven beschreven is, is het sluiten van de gastoevoer een effectieve methode om de concentratie in de meterkast te doen verlagen. In alle experimenten met de meterkast valt op dat de concentratie in de meterkast snel afneemt zodra de gastoevoer wordt afgesloten. Dit is ook weergegeven in Figuur 43: eerst is een snelle afname te zien, vervolgens een langzame door ventilatie (die gelijk is aan de afname in de ruimte van 10m<sup>3</sup>).



Figuur 43 Afname van de gemiddelde waterstof- en methaanconcentraties de meterkast bij verschillende configuraties.

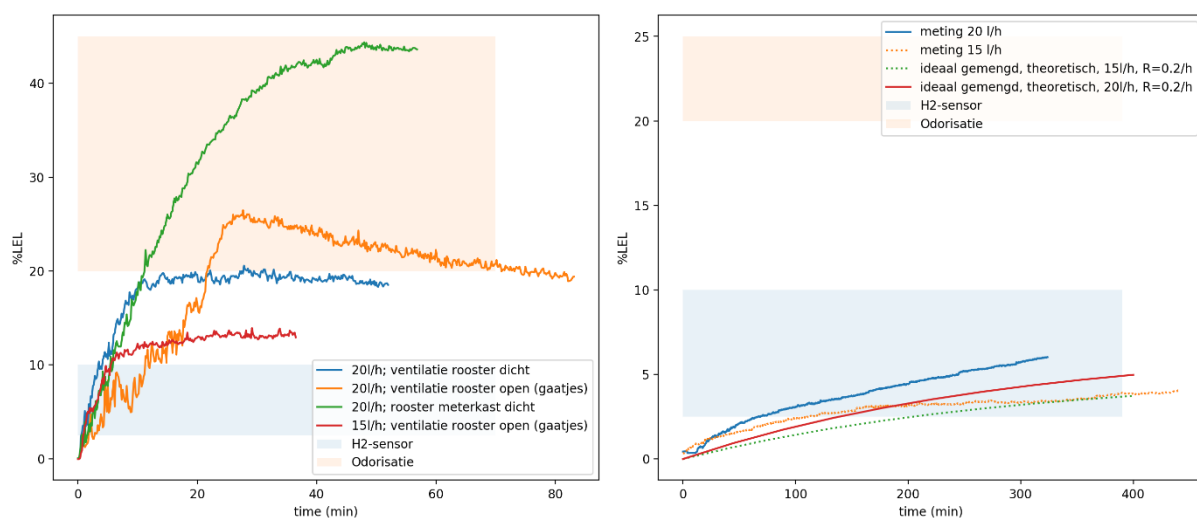
In bovenstaande figuur is te zien dat wanneer de ventilatieroosters in de meterkastdeur geopend zijn de gemiddelde methaanconcentratie in de meterkast sneller afneemt dan de gemiddelde waterstofconcentratie. Op het moment dat de ventilatieroosters gesloten zijn, is het juist andersom: de gemiddelde waterstofconcentratie neemt sneller af dan de gemiddelde methaanconcentratie. Een grotere trek door de roosters bij methaan ten opzichte van waterstof zou dit effect kunnen verklaren. Bij de gesloten roosters lijkt waterstof makkelijker via kieren te kunnen ontsnappen. Nader onderzoek zou deze veronderstelling verder moeten onderbouwen.

Voor sommige curves is aan het eind van de metingen een plotselinge scherpe afname in de gemeten concentratie waarneembaar. Dit wordt veroorzaakt doordat de deur van de container werd geopend.

### 9.1.5 De gemeten concentraties kunnen worden gedetecteerd door H2-sensoren of odorisatie

De concentraties waterstof gemeten in de experimenten zijn over het algemeen erg laag, ver onder de LEL. In de analyse zover blijkt dat bij de kleine lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/uur geen gevaarlijke situaties ontstaan. Om echter zeker te zijn dat dergelijke kleine lekkages opgemerkt worden en niet over veel langere tijd uitstromen dan de uren die in deze experimenten gebruikt worden, is het van belang te weten of detectiemechanismen effectief zijn. In de huidige set experimenten is nog geen ruimte gevonden om sensoren en het effect van odorisatie in de praktijk te meten. Er zijn echter wel eerdere onderzoeken uitgevoerd naar de detectie van (lage) waterstofconcentraties met CO-sensoren [8] [9]. Deze onderzoeken laten zien dat CO melders, voor consumentengebruik, ook reageren op waterstof. Er lijkt een vrij grote spreiding in gevoeligheid te zijn, maar elke van de 8 geteste meters reageert snel op concentraties van 10%LEL, de meest gevoelige meter zal al bij een

concentratie van 1-2%LEL afgaan. Odorisatie van de waterstof zal bewoners in staat stellen om lage concentraties waterstofgas te ruiken. Voor aardgas is de norm dat 1vol% (=20%LEL) goed ruikbaar moet zijn. Figuur 44 worden de eerder besproken metingen van waterstof in de meterkast en in de grote ruimte nogmaals weergegeven, met als aanvulling de concentratiebanden waarin verwacht wordt dat de H<sub>2</sub>-sensoren zullen reageren en de grenzen voor ruikbaarheid van het gas. Bij lekkages in de meterkast, zal waarschijnlijk al bij lagere concentraties een gaslucht waarneembaar zijn in de meterkast zelf. Zowel in de lege container als in de ruimte naast de meterkast blijft in de uitgevoerde experimenten de waterstofconcentratie ver onder de 20 %LEL (1vol%). Overwogen kan worden om in eerste pilotprojecten sensoren boven in de meterkast op te hangen, waar de hogere concentraties gemeten worden. Hiermee zal tijdig een kleine lekkage worden opgemerkt en kan daarmee het risico nog verder verkleind worden. In vervolg onderzoek zal de effectiviteit van deze sensoren verder onderzocht worden.



Figuur 44 Gemeten gemiddelde concentraties waterstof en onderste concentratie grenzen waarop H<sub>2</sub>-sensoren alarmeren of odorant de concentraties laat opmerken. De meterkast (links) en de 36m<sup>3</sup> ruimte (rechts)

## 10 Conclusies en aanbevelingen uit de experimenten

Samenvattend kan gesteld worden dat in de experimenten met lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/uur voor waterstof geen concentraties gemeten zijn in de buurt van de LEL. De minimale ventilatievoud in de container was 0.2 /uur, hetgeen overeenkomt met een zeer slecht geventileerde ruimte in een woning. Daarmee wordt in deze container een worst-case scenario gemeten, elke extra opening in de container zal een verhoogde ventilatievoud laten zien en daarmee een kleinere concentratieopbouw. Als in deze experimenten geen gevaarlijke concentraties worden gemeten, dan is de verwachting dat die in de praktijk in woningen ook niet optreden. Aangetoond is dat door het openen van een ventilatierooster of deur, de concentratie weer snel verlaagd kan worden.

De hoogste concentraties worden gemeten boven in de meterkast in de situatie waarbij de ventilatieroosters in de deur van de meterkast afgeplakt zijn. Ook in deze situatie vakt de concentratie waterstof af op ongeveer 40%LEL. Door het plaatsen van 2 roosters in de deur van de meterkast, zoals vereist volgens NEN 2768 bij een gasaansluiting, is deze concentratie ongeveer 20%LEL. Om toch tijdig lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/uur te detecteren en opbouw van concentratie te voorkomen verdient het dus de aanbeveling om roosters in de deur van de meterkast te plaatsen.

Het plaatsen van een H<sub>2</sub>-sensor (CO melder) boven in de meterkast zal zeer waarschijnlijk reageren op een dergelijke kleine lekkages. Overwogen kan worden om in pilotprojecten voor het detecteren van kleine lekkages, voordat deze door odorisatie opgemerkt worden, dergelijke sensoren te gebruiken en daarmee het risico nog verder te verlagen

#### 10.1.1 Aanbevelingen voor verder experimenteel onderzoek

In deze rapportage zijn de eerste metingen voor de verspreiding van waterstof in kleine ruimtes bij kleine lekkages en het effect van ventilatie daarop beschreven. De gebruikte container is flexibel opgezet zodat additionele experimenten uitgevoerd kunnen worden in een volgende fase van het project.

Bij de experimenten bleek het lastig te zijn om de temperatuur in de container constant te houden. De temperatuurafhankelijkheid van de sensoren is mogelijk per sensor verschillend waardoor een constante temperatuur gewenst is. Het is daarom aan te bevelen om de temperatuur in de container constant te houden door bijvoorbeeld aanbrengen isolatie en een radiator in de unit te plaatsen die gedurende de metingen aan kan blijven.

Tevens gaven een aantal experimenten onverwachte uitkomsten. Zo lijkt in de lege container de ventilatievoud voor methaan groter te zijn dan onder soortgelijke omstandigheden voor waterstof. De stratificatie van methaan lijkt ook sterker in de meterkast dan voor waterstof. Beide observaties worden op basis van de fysische eigenschappen niet verwacht. In vervolg experimenten zouden deze verschijnselen verder onderzocht kunnen worden.

Daarnaast is er gekeken naar het effect van het openen van een enkele ventilatieopening in de container op het concentratieverloop in de container. Meerdere ventilatieopeningen openen of het gedeeltelijk openen van de ventilatieopening en daarmee samenhangende verschil in ventilatievoud zou nader onderzocht kunnen worden.

Het is ook aan te bevelen om bij vervolgent experimenten metingen uit te voeren met geschikte waterstofdetectiesensoren (CO sensoren) om hiermee deze optie als mitigerende maatregel nader te onderzoeken.

In de huidige set experimenten is beperkt tot een configuratie van de container met een meterkast in een ruimte van 10m<sup>3</sup>. De flexibiliteit van de container maakt het mogelijk om ook andere ruimtes te onderzoeken op het concentratieverloop bij een waterstof/methaanlekkage. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan gaslekkage in een kruipruimte of een keuken.

Tot slot is er in de huidige set experimenten gekeken naar kleine lekkages tot 20 dm<sup>3</sup>/h. Hierbij zijn slechts lage concentraties waterstof gemeten, ver onder de LEL. In een vervolgtraject kan de uitstroomflow verder verhoogd worden, om daarmee te verkennen tot welke lekkages ventilatie en andere mitigerende maatregelen zoals sensoren effectief zijn.

# Veiligheidsaanbevelingen voor waterstof pilotprojecten

## 11 Introductie

De introductie van waterstof in het gasdistributienetwerk en in de daaraan aangesloten binneninstallatie kan een verandering van de risico's met zich meebrengen vergeleken met de huidige situatie voor aardgas. Met name de verhoogde concentraties waterstof in een afgesloten ruimte (boven 10% LFL) kunnen, door de grotere reactiviteit van waterstof, tot verhoogde risico's leiden. Bovendien ook als de risico's van het huidige gasdistributienetwerk beperkt en acceptabel zijn, is het van belang om te weten hoe groot de verschillen zijn als er waterstof wordt gedistribueerd door hetzelfde net. Op verschillende plaatsen in de wereld wordt momenteel onderzoek gedaan naar deze risico's met waterstof. Op basis van inzichten uit het VK wordt in het werkpakket 1a van het Hydeltaprogramma een analyse gemaakt naar de verschillen in de Nederlandse situatie.

In Nederland worden een aantal pilotprojecten opgezet om ervaring op te doen met waterstof in de gebouwde omgeving. Het is van groot belang om deze pilots en demonstratieprojecten op een veilige manier uit te voeren. Dit document beschrijft daarom de aanbevelingen bij de te nemen beheersmaatregelen voor de infrastructuur met een maximale werkdruk tussen 100 mbar en 16 bar, bij de overgang van distributie van aardgas naar waterstofdistributie, door dezelfde infrastructuur, bij pilotprojecten en bij permanente installaties. Benadrukt wordt dat de maatregelen zoals opgesomd in dit document eerst voor pilotprojecten worden voorgesteld. Deze maatregelen zijn conservatief ingestoken. Op basis van de ervaringen uit de pilots en voortschrijdend inzicht kan in een later stadium worden besloten/vastgesteld in hoeverre al deze maatregelen ook moeten worden toegepast in een regulier waterstofdistributienet. Het verkrijgen van de vereiste vergunningen valt buiten de scope van dit document.

Dit document is een verzamelend rapport / advieslijst met inventarisatie van mogelijke maatregelen en aandachtspunten en bevat een eerste set met aanbevelingen en aandachtspunten voor waterstofpilotprojecten, maar bij iedere pilot zal op basis van de specifieke situatie en risico's moeten worden beoordeeld of deze set voldoende compleet en voldoende doeltreffend is.

Uitgangspunten bij deze set met aanbevelingen en aandachtspunten zijn:

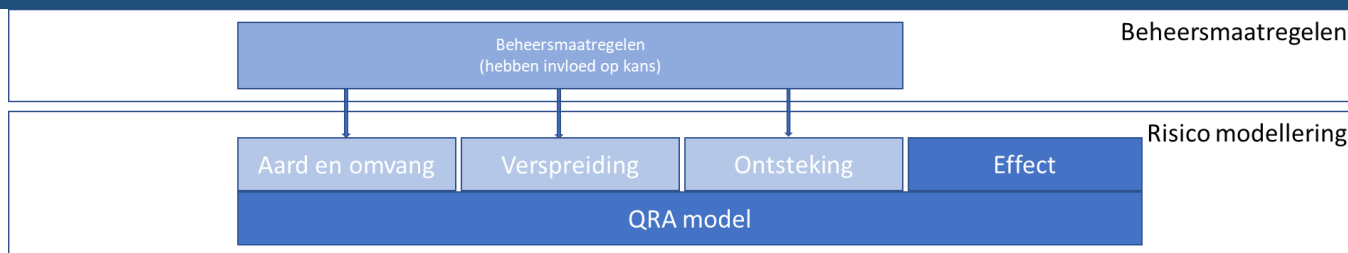
- 1) dat het merendeel van de werkwijzen zoals deze bekend is bij het ontwerp/aanleg en beheer van de aardgasinfrastructuur ook geschikt zijn voor de, in de toekomst, nieuw aan te leggen waterstofinfrastructuur, waarbij extra aandacht zal moeten zijn voor het beperken van "grote lekkages".
- 2) dat de veiligheidsinventarisaties van andere pilotprojecten<sup>10</sup> zijn meegenomen in deze aanbevelingen en aandachtspunten.

Het veiligheidsrisico van waterstof kan, conform de definitie van 'risico', worden bepaald door de kans dat een hoeveelheid waterstof vrijkomt bij een lekkage of anderszins, deze hoeveelheid zich ophoopt tot een gevaarlijke concentratie en vervolgens tot ontsteking wordt gebracht, vermenigvuldigd met de gevolgen van deze ontsteking. Schematisch is dit weergegeven in onderstaande figuur.

---

<sup>10</sup> Pilot Rozenburg; Ombouw Uithoorn; Green Village; Hydrogreenn; Stad aan 't Haringvliet; Pilot Wagenborgen





Beheersmaatregelen maken het mogelijk om de verschillende kansen en effecten te verkleinen. Het uitgangspunt bij deze beheersmaatregelen is dat bij het ontwerp/aanleg/beheer de kans op lekkages moeten worden voorkomen, als tweede het verminderen van ophoping, als derde de kans op ontsteking en als laatste de effecten bij mogelijke ontsteking van de waterstof.

In dit document houden we dezelfde indelingen aan, het is daarom opgebouwd uit de volgende hoofdstukken:

- 1) Generieke aanbevelingen, inclusief kans op ontsteking en gevolgen (Hoofdstuk 12)
- 2) Lekkage (Hoofdstuk 13)
- 3) Verspreiding (Hoofdstuk 14)

De generieke aanbevelingen en aandachtspunten zijn in hoofdstuk 12 opgenomen, dit om te voorkomen dat er in de overige hoofdstukken te veel repeterende onderwerpen zijn verwoord.

Per hoofdstuk zijn de aanbevelingen geordend op basis van “life cycle” fases:

- a) Voorbereidingsfase
- b) Ontwerpfase
- c) Realisatiefase
- d) Operationele fase

Voor fases welke in een hoofdstuk niet zijn genoemd, zijn geen specifieke aanbevelingen en aandachtspunten geïdentificeerd. Deze zijn opgenomen in de generieke aanbevelingen en aandachtspunten in hoofdstuk 12.

## 12 Generieke aanbevelingen

### 12.1 Voorbereiding fase

#### 12.1.1 Aanwijzing bevoegdheden in de geest van VIAG

De VIAG (veiligheidsinstructie aardgas) geeft regels voor het veilig werken aan gasvoorzieningssystemen. Binnen de VIAG-structuur is duidelijk omschreven door wie en hoe er werkzaamheden mogen worden uitgevoerd aan gasvoorzieningssystemen. Binnen Netbeheer Nederland wordt gewerkt aan een waterstofversie van de VIAG-systematiek, deze aanpassingen worden gerealiseerd met behulp van de input vanuit de HyDelta onderzoeken. Door deze structuur toe te passen voor de waterstofinfrastructuur (met enige aanpassingen), wordt ervoor gezorgd dat ook binnen deze infrastructuur met voldoende kennis en veiligheid gewerkt kan worden.

#### 12.1.2 Extra maatregelen in verband met stikstof

De monteurs- en installateursprocedures zijn gebaseerd op werkzaamheden aan de aardgasinfrastructuur waarbij geen gebruik gemaakt wordt van stikstof voor verdringing. Om bij

waterstof te voorkomen dat een explosief mengsel in de leiding ontstaat, moet bij werkzaamheden de installatie worden gespoeld met een inert gas. Stikstof is een inert gas met andere karakteristieken en eigenschappen. De procedures zullen moeten worden aangepast aan het gebruik van stikstof, bij het verdringen van waterstof.

**Aanbeveling:** Stel procedures op voor het ontluchten en ontgassen van leidingen met stikstof.

### 12.1.3 Inspectie binneninstallatie

Er zal een inspectie moeten plaatsvinden aan de bestaande binneninstallatie(s) om duidelijkheid te krijgen over de staat van aanleg en onderhoud van de binneninstallatie. Voor de overgang van aardgas naar waterstof zal er gezorgd moeten worden dat de binneninstallatie (weer) aan de geldende aardgasnorm voldoet. De verantwoordelijkheid voor deze inspectie moet vastgelegd worden. Voor aardgas is dat de huiseigenaar.

**Aanbeveling:** Doe inspectie ruim voor de ombouw, naar de staat van aanleg en onderhoud van de binneninstallatie.

**Aanbeveling:** Onderzoek of huidige normen mbt aardgasinstallaties ook onverkort toegepast kunnen worden op waterstofinstallaties

### 12.1.4 Bepalen veiligheidsafstand rondom de drukregel- en meetstations en leiding(en)

Het leidingtracé en de positie van drukregel- en meetstations moet zodanig worden gekozen (door het bepalen van de veiligheidsafstanden door middel van een QRA), dat bij een escalatie (brand, explosie) ten gevolge van een lekkage er geen of minimale schade zal ontstaan aan de overige installatie onderdelen en/of omgeving.

### 12.1.5 Periodieke controle van de potentiële lekbronnen

Bij nieuw aangelegde leidingen als ook bij hergebruik van aardgasinfrastructuur, zal voor, tijdens en na het in gebruik nemen van de leiding met waterstof, periodiek onderzocht moeten gaan worden of er lekkages zijn.

Onderzoek of de procedures, met betrekking tot het zoeken van lekken in de (distributie)leidingen, NEN7244, VIAG-veiligheidswerkinstructie(s) en van de installatiebranche, aangepast moeten worden bij de toepassing op de waterstofinfrastructuur.

**N.B.:** Binnen HyDelta wordt onderzocht of er ten aanzien van druk- en lekdichtheidstesten zal worden afgeweken van de criteria zoals deze zijn geformuleerd in de NEN7244 en de VIAG-veiligheidswerkinstructies. Hiervoor wordt verwezen naar HyDelta WP1c “Leidingen en binneninstallaties” waarin voorstellen worden gedaan voor aanpassingen van de VIAG.

**Aanbeveling:** Bekijk of ook voor de binneninstallatie een periodieke lekcontrole noodzakelijk en haalbaar is tijdens een pilot en/of de normale operatie en door wie deze moet worden uitgevoerd. Bepaal de doelmatige frequentie van deze eventuele controles.

Een optie voor een periodieke lekcontrole zou kunnen zijn deze mee te nemen tijdens het periodiek onderhoud aan de stookinstallatie.

## 12.2 Ontwerpfase

### 12.2.1 Geodoriseerd waterstof

Waterstof is net als aardgas een reukloos gas. Door waterstof te odoriseren is waterstoflekkage waarneembaar voor de menselijke neus, net als bij aardgas.

**Aanbeveling:** Gebruik geodoriseerd waterstof of zorg voor alternatieve detectiemethoden.

#### 12.2.2 Ontwerp/aanleg/beheer binneninstallatie naar de geest van NEN1078 (nieuwbouw)

Het ontwerp/aanleg en beheer van gasinstallatie voor aardgas moet voldoen aan NEN1078 bij nieuwbouw van de installatie. Uit eerdere testen en onderzoek<sup>11</sup> is gebleken dat de hoofdnorm NEN1078, ook goed te gebruiken is voor de installatie voor waterstof.

#### 12.2.3 Ontwerp/aanleg/beheer binneninstallatie naar de geest van NEN8078 (bestaande bouw)

Het ontwerp/aanleg en beheer van gasinstallatie voor aardgas moet voldoen aan NEN8078 bij bestaande bouw. Uit eerdere testen en onderzoek (zie voetnoot) is gebleken dat de hoofdnorm van de NEN8078, ook goed te gebruiken is voor de installatie voor waterstof (zie ook advies hoofdstuk 'Inspectie binneninstallatie')

#### 12.2.4 Installatie(s) uitvoeren door middel van brandwerende pijpleidingen

Wanneer er een lekkage plaatsvindt met ontsteking (brand), zal een "brandwerende/warmte isolerende PE-leiding" geen verergerende component zijn voor het incident. Door deze brandwerende eigenschappen hebben dit type leidingen de voorkeur bij aanleg of mutaties.

Voor het leidingwerk tot aan de gasmeter moeten dezelfde normen met betrekking tot brandwerendheid gaan gelden als bij aardgas.

**N.B.** De meterkast kan gezien worden als een zwakke plek in de brandveiligheid van de woning. Het toenemend gebruik van elektronica in de meterkast en het als opslag gebruiken van de meterkast (en daardoor ontstane beperking in de ventilatie), verhoogt de kans op een brand in deze ruimte.

**Aanbeveling:** Overweeg om (tijdens pilots) hogere brandwerendheidseisen te stellen aan de meterkast en aan de in deze ruimte opgestelde apparatuur.

#### 12.2.5 Plaatsing van (extra) tussenafsluiters (segmentering transport- en distributienetwerk)

Door het transport- en distributienetwerk te segmenteren, is het mogelijk om deelsystemen af te sluiten in het geval van onderhoud, incidenten of calamiteiten. Hierdoor is het niet altijd noodzakelijk om de gehele installatie leeg/drukloos te gaan maken en daarmee de hoeveelheid uitgestroomd gas te beperken.

**Aanbeveling:** Onderzoek de mogelijkheid om het transport- en distributienetwerk te segmenteren om gedeeltes van het netwerk in te kunnen sluiten bij onderhoud, incidenten of calamiteiten

#### 12.2.6 Aanbrengen spoelpunten in de leiding voor reparatie en aanpassingen (t.b.v. stikstof spoelen)

In een waterstofleiding mag geen zuurstof aanwezig zijn samen met waterstof. Om tijdens aanpassingen- of onderhoudswerkzaamheden niet steeds de gehele leiding leeg te maken, is het goed dat (deel)secties geïnertiseerd (waterstof en zuurstof vrij) kunnen worden gemaakt. Om dit te kunnen realiseren zullen in de leidingen (transport-, distributie, en aansluitleidingen) op geschikte punten voorzien moeten worden van spoelpunten (nippels/blaaaszadel sets). Via deze spoelpunten kan de leiding, zonder uitstroom naar de omgeving, gevuld en ontdaan worden van stikstof, zodat de werkzaamheden veilig kunnen worden uitgevoerd.

---

<sup>11</sup> Zie HyDelta werkpakket WP1C "Leidingen en binneninstallaties(componenten)"; Rapport D1C5- risico's bij het gebruik van waterstof in plaats van aardgas. De hoofdnormen 1078 en 8078 zijn goed te gebruiken, de bijbehorende NPR delen moeten mogelijk aangepast worden.

**Aanbeveling:** Zorg per leidingsectie voor spoelpunten aan het begin en eind van de leiding.

#### 12.2.7 Gebruik bij aanleg, vervanging en modificaties daarvoor geschikte materialen

Bij de modificaties aan leidingen, bij vervanging (door veroudering) en bij nieuwe aanleg van leidingen en installaties zullen er materialen gebruikt moeten worden die geschikt zijn voor waterstof. Hierbij kan worden gedacht aan leidingen en materialen met het zogenaamde GASTEC QA keurmerk, waarbinnen steeds meer materialen ook goedgekeurd zijn voor waterstof. Hoewel er steeds meer waterstof gecertificeerde materialen op de markt komen, zal het tijdens pilot(s) niet altijd mogelijk zijn waterstof gecertificeerde materialen beschikbaar te hebben, hierdoor zal er tijdens de pilots goed gekeken moeten gaan worden welke risico's het gebruik van deze materialen oplevert. (Zie hiervoor ook Kiwa rapport GT-170272 "Toekomstbestendige gasdistributienetten").

**Aanbeveling:** Onderzoek bij (pilot)projecten welke voor waterstof geschikte materialen beschikbaar zijn (met geldende keurmerken, of onderbouwing als deze nog niet beschikbaar zijn).

#### 12.2.8 Installeer ATEX-installaties en apparatuur

Als er eventuele lekkages plaats gaan vinden binnen het transport- of distributienetwerk, mogen deze lekkages niet leiden tot escalaties of calamiteiten. Door ATEX IIC gecertificeerde installaties en apparatuur te installeren, in ATEX-gemarkeerde gebieden binnen de installatie(s), wordt voorkomen dat deze apparatuur als ontstekingsbron zal gaan dienen. Het betreft hier ATEX-gemarkeerde gebieden zoals die nu bestaan bij bijvoorbeeld gasstations, en niet om de meterkast of andere ruimtes in woningen.

**N.B.** Voor richtlijnen met betrekking tot ATEX zie: NPR7910-1 en/of NEN-EN-IEC 60079-10-1

#### 12.2.9 Installeer gecertificeerde eindgebruikersapparatuur

Installeer uitsluitend speciaal voor waterstof gecertificeerde eindgebruikersapparatuur, zoals verwarmingstoestellen. Zolang er slechts een tijdelijke certificering is (voor projecten of beperkte oplagen van testtoestellen), zal de fabrikant/leverancier moeten aantonen dat het verbrandingstoestel specifiek geschikt is voor full-waterstof (> 98%). Een aanbeveling is om de eisen voor toestellen vast te leggen dat vanuit de ketel geen vlamslag richting de binnenleiding kan plaatsvinden. Als extra veiligheidsmaatregel kan overwogen worden om een vlamdover te installeren direct voor of in het te installeren verbruikstoestel.

#### 12.2.10 Beoordeel materialen in bestaande installaties op geschiktheid

De bestaande gasinfrastructuur is aangelegd voor het gebruik van aardgas. De infrastructuur zal per project beoordeeld moeten worden of de gebruikte materialen geschikt zijn voor waterstof of dat deze vervangen dan wel buiten werking zullen moeten worden gesteld. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van eerdere onderzoeksresultaten en ervaringen, zoals vermeld in eerdere KIWA rapportages en de rapportage "Toekomstbestendige gasdistributienetten" van Netbeheer Nederland. Aspecten die hierbij o.a. moeten worden bekeken zijn levensduur, permeatie, lektheidsterkte. Indien nodig, voer additionele testen uit voor deze aspecten.

#### 12.2.11 Beperk toegang tot installatie

Daar waar dit noodzakelijk is kan het aantal personen in de omgeving van de installatielocaties worden beperkt door toegangsbeperkende maatregelen zoals:

- 1) afsluitbare toegangsdeuren, eventueel met sloten die alleen geopend kunnen worden door waterstofbevoegden.
- 2) de locatie te voorzien van een hekwerk.

### 12.2.12 Aanbrengen aanrijbeveiliging voor installaties

Op plaatsen waar het mogelijk is dat voertuigen schade aan kunnen brengen aan de gasvoerende installaties (drukregel- en meetstations), moet de installatie worden beschermd door een aanrijdbeveiliging, zoals dat ook bij aardgas het geval is (NEN 1059).

### 12.2.13 Detectie lekkage

Tijdens de aanleg en levensduur van installaties kunnen er kleine of grote lekkages ontstaan. Vroegtijdige detectie van deze lekkages is belangrijk om een eventuele escalatie te voorkomen. Onder grote lekkages worden lekkages verstaan met meer dan 20 dm<sup>3</sup>/uur.

#### *Kleine lekkages*

Kleine lekkages zijn door hun omvang soms slecht waarneembaar. Binnen Deel II van deze rapportage wordt onderzocht in hoeverre de risico's noodzaak geven, om bovenstaande maatregelen (of combinaties daarvan) in te zetten. Daarbij wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende soorten locaties (meterkast, aanpalende ruimtes) en ventilatievouden. In deze experimenten worden lekgroottes tot 20 dm<sup>3</sup>/uur voor waterstof bekeken. In de experimenten zijn geen concentraties waargenomen boven de LEL, zelfs niet in goed afgesloten ruimtes. Om deze lekkages tijdig te detecteren en te stoppen/repareren moeten onderstaande maatregelen of combinaties ervan worden overwogen:

#### 1) Odorisatie (detectie);

Door toepassen van odorant, kan de mens eventuele lekkages waarnemen met zijn/haar neus en de nodige acties in gang zetten.

#### 2) Drukverliesdetectie (detectie/beheersing);

Door gebruik te maken van periodiek uitgevoerde drukverliesdetectie, kunnen ook kleine lekkages worden gesignaleerd door een akoestisch- en/of optisch alarm en kunnen de nodige acties (bijvoorbeeld: afsluiten van de bron) worden ondernomen om escalatie te voorkomen.

#### 3) Lekindicatoren (detectie)

Het aanbrengen van tape of stickers die verkleuren zodra ze in contact komen met waterstof.

#### 4) Plaatsen van sensoren (detectie/beheersing);

Door het toepassen van sensoren kan al bij een geringe concentratie van waterstof de aanwezigheid worden gedetecteerd, waardoor de nodige acties kunnen worden ondernomen om escalatie te voorkomen. (Het aantal sensoren en de montage plek, zal per locatie/installatie verschillen)

#### 5) Periodieke controle (preventie);

Door periodieke controle van de infrastructuur op lekkage kan worden voorkomen dat een geringe lekkage onopgemerkt blijft of groter kan worden.

#### 6) Ventilatie.

Ventilatie van de ruimtes waar de waterstofleiding door heen loopt, zal ervoor zorgen dat er geen ophoping van waterstof kan plaatsvinden in de betreffende ruimte(s), waardoor er een escalatie kan worden voorkomen.

**N.B.**

### Grote lekkages

Om grote lekkages tijdig te detecteren en te stoppen kan worden gedacht aan onderstaande maatregelen of combinaties van deze maatregelen:

1) Odorisatie (detectie);

Door toepassen van odorant, kan de mens eventuele lekkages ruiken en de nodige acties in gang zetten.

2) Gasstopper (beheersing);

Door het toepassen van een gasstopper in de aansluitleiding kan er slechts een beperkte hoeveelheid gas vrij uitstromen voordat de uitstroom wordt gestopt.

3) Plaatsen van sensoren (met bronafsluiting) (detectie/beheersing).

Door het toepassen van sensoren kan al bij een geringe concentratie van waterstof de aanwezigheid worden gedetecteerd, waardoor de nodige acties (bijvoorbeeld: ventilatie door openen ramen en deuren, afsluiten gastoevoer) kunnen worden ondernomen om escalatie te voorkomen.

**N.B.** De functionaliteit van gasstoppers wordt door Kiwa binnen het ‘ Kenniscentrum Gasnetbeheer’ beproefd. Binnen HyDelta wordt onderzocht in hoeverre de risico’s noodzaak geven, om bovenstaande maatregelen (of combinaties daarvan) in te zetten. Daarbij wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende soorten locaties en of het bestaande dan wel nieuwe infrastructuur betreft.

## 12.3 Implementatiefase

### 12.3.1 Aanleg en onderhoud door vakbekwame monteurs/installateurs (bv door duidelijke instructies)

Tijdens de eerste periode (pilots) zijn er nog geen (of weinig) gecertificeerde monteurs, voor het aanleggen en testen van waterstofinfrastructuur buiten en binnen woningen. De basis voordat de aardgasmonteurs mogen werken aan een waterstofnet is dat zij minimaal kennis/opleidingen en ervaring hebben in het werken aan het aardgasnet met de daaraan gekoppelde VIAG-opleidingen.

Tijdens of in de aanloop van de uitvoering van de pilot projecten zullen de monteurs/installateurs voldoende opgeleid en/of geïnstrueerd moeten worden en kennis hebben van de specifieke eigenschappen en werkwijzen met betrekking tot waterstof om hun geplande en ongeplande werkzaamheden goed en veilig te kunnen uitvoeren.

Wanneer er meer pilotprojecten zullen worden gerealiseerd, zullen de opleidingseisen met betrekking tot de monteurs beter kunnen worden gedefinieerd, waarna er ook nadere eisen aan de installateursopleiding mogen en kunnen worden gesteld. Hierdoor is het bij de eerste pilots nog niet mogelijk gecertificeerde monteurs te “eisen”.

Er zijn al diverse pilotprojecten actief waar ervaring op kan/kon worden gedaan voor operationele handelingen. Denk hierbij aan: Rozenburg, Uithoorn, Stad aan ’t Haringvliet, The Green Village, Entrance en de demonstratiewoning bij Kiwa.

**Aanbeveling:** Zorg dat er specificaties worden opgesteld voor opleidingen voor monteurs/installateurs en dat op basis daarvan training en lesprogramma’s ontwikkeld worden. In de trainingen moet onder andere aandacht zijn voor houding en gedrag bij het werken met een ander gas zoals waterstof.

**12.3.2 Aanbeveling:** Zodra waterstoftrainingen beschikbaar zijn, moet zo snel mogelijk begonnen worden met het opleiden en certificeren van monteurs en installateurs  
[Informatieverstrekking aanvang werkzaamheden \(Uitleg gevaren\)](#)

Bij werkzaamheden aan en nabij transport- en distributieleidingen, is het goed dat iedereen die bij deze werkzaamheden betrokken is, dezelfde uitgangspunten heeft en dat de aanwezige risico's bij iedereen bekend zijn. In de veiligheidswerkinstructies zullen de risico's en uitgangspunten worden opgenomen, een 'Toolboxmeeting' of een werkplan/bedieningsplan zal onderdeel van deze veiligheidswerkinstructies voor waterstof zijn.

#### [12.3.3 Bij aanvang werkzaamheden 's ochtends startwerk vergadering](#)

Bij werkzaamheden aan en nabij transport- en distributieleidingen, is het goed dat iedereen die bij deze werkzaamheden betrokken is, dezelfde uitgangspunten heeft en weet welke werkzaamheden die dag zullen worden uitgevoerd. In het "startwerkoverleg" zullen de veiligheidswerkinstructies worden doorgenomen.

#### [12.3.4 PBM's: Gas- en zuurstof detectieapparatuur](#)

Waterstof en stikstof zijn van zichzelf reukloze gassen. Voorzie het personeel van specifieke waterstof- en zuurstofdetectieapparatuur. Hierdoor kunnen eventuele lekkages van de gassen vroegtijdig worden ontdekt, voordat ze een bedreiging kunnen gaan vormen.

De zuurstofdetectie is nodig in verband met eventuele stikstofemissies, waardoor er een laag zuurstofniveau aanwezig zou kunnen zijn. Bij de aanwezigheid van een electrolyzer kan er ook een hoge concentratie van zuurstof ontstaan door het vrijkomen van pure zuurstof uit de electrolyzer. Beide situaties zijn niet wenselijk.

**Aanbeveling:** Huidige CO sensoren zijn erg gevoelig voor waterstof. Onderzoek of de huidige gaslekdetectieapparatuur voldoende selectief is.

**Aanbeveling:** Zorg dat mensen over de juiste PBM's beschikken en goed geïnstrueerd zijn.

#### [12.3.5 PBM's: Kleding](#)

De huidige beschermende kleding (antistatisch en vlam vertragend) welke gebruikt wordt binnen de huidige aardgasinfrastructuur voldoet ook voor waterstof.

#### [12.3.6 Materieel](#)

Er zal uitgezocht moeten worden welke materieel moeten worden aangepast, voor het gebruik binnen een waterstofinfrastructuur. Als basis zal het aardgasmontagegereedschap worden toegepast tijdens de waterstof werkzaamheden en zodra er 10%LFL gemeten wordt zal de gasvoorziening gesloten worden.

Onder andere de fakkelinstallatie zal moeten worden aangepast. Deze moeten worden voorzien van een vlamdover die geschikt is voor waterstof (gasgroep IIC). Kiwa heeft al onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van de aardgasfakkel.

Ook is er onderzoek nodig naar gasblazen. Volgens de K194-norm mogen gasblazen 300 dm<sup>3</sup>/uur lekkage hebben. Dat kan mogelijk te groot zijn voor het afsluiten van een waterstofleiding. Gedacht kan worden aan bijvoorbeeld een afsluiter of een combinatie van afsluitmiddelen (dubbele gasblaas met geventileerde tussenruimte). In Hydelta 2.0 zal nader onderzoek gedaan worden naar de geschiktheid van gasblazen.

**Aanbeveling:** Controleer of de gebruikte gereedschappen/tools geschikt zijn voor het gebruik in een waterstofinfrastructuur

### 12.3.7 Zorg voor duidelijke instructies voor de Netbeheerder/ gebruikers/omgeving/hulpdiensten

Waterstof in de woonomgeving is voor iedereen nieuw, in het geval van het gebruik of bij incidenten moet het voor netbeheerder/gebruikers/omgeving/hulpdiensten duidelijk zijn wie welke taken/rollen/verantwoordelijkheden heeft en welke acties er moeten worden genomen. Een duidelijke (gedocumenteerde) instructie zal ervoor zorgen dat er op een eenduidige manier kan worden gecommuniceerd naar en getraind door alle betrokkenen ( netbeheerder/gebruikers/ omgeving/ hulpdiensten). Hierdoor kunnen alle betrokkenen de juiste informatie tot zich nemen en op een veilig manier reageren. Hierbij kan worden gedacht aan de benodigde communicatie- en escalatielijnen (Grip1/2/..) en het hebben van een duidelijk en geoefend calamiteitenplan.

### 12.3.8 Voer druk- en lekdichtheidstest uit na aanleg en modificatie(s)

Na afloop van de aanleg en modificaties van de infrastructuur zal er een druk- en lekttest moeten worden uitgevoerd en worden vastgesteld dat de installatie lekdicht is conform de daarvoor bepaalde grenzen.

### 12.3.9 Installeer brandblusapparatuur

Als tijdens de werkzaamheden van een monteur door lekkages brand zal ontstaan, moet eerst de waterstofftoevoer worden afgesloten en daarna de secundaire branden worden geblust. Het blussen van een brand terwijl er nog druk op de leiding staat, veroorzaakt dat een ongecontroleerde waterstofuitstroom kan ontstaan, met een eventuele ophoping en explosie tot gevolg. Dit laatste is gevaarlijker dan een brand. Voor het blussen van de secundaire branden zullen brandblusmiddelen beschikbaar moeten zijn.

## 12.4 Operationele fase

### 12.4.1 Gebruik geodoriseerd gas

Waterstof is net als aardgas een reukloos gas. Door waterstof te odoriseren is waterstoflekkage waarneembaar voor de menselijke neus, net als bij aardgas.

### 12.4.2 Periodiek bovengronds lek zoeken

Door middel van periodiek bovengronds lek zoeken, met voor waterstof geschikte detectieapparatuur, kunnen (kleine) lekkages worden opgespoord voordat deze een zodanige omvang krijgen dat ze een gevaar vormen voor de omgeving.

De huidige praktijk is dat ongeveer op 1 x per vijf jaar een aardgasleiding wordt geïnspecteerd op lekkage.

Een frequentie voor een dergelijk controle van waterstofleidingen zal bepaald moeten worden. Een mogelijke frequentie zou in eerste instantie jaarlijks kunnen zijn. Wanneer er meer kennis van de infrastructuur en het medium is verzameld kan de frequentie, in een later stadium, worden bijgesteld.

**Aanbeveling:** Bepaal een frequentie voor bovengronds lekzoeken voor waterstofleidingen.

### 12.4.3 Lekkage detecteren door ongecontroleerde drukval

Onderzoek of het mogelijk is om periodiek (automatisch) te controleren of er lekkage aanwezig is in de gasinfrastructuur. Als er gedurende de testperiode een drukval plaatsvindt, zal er gekeken moeten worden waar deze drukval vandaan komt o.a. door middel van lekzoeken. Deze oplossing wordt momenteel getest in de pilot “Stad aan ’t Haringvliet”.



**Aanbeveling:** Onderzoek of periodieke drukvalcontrole mogelijk is

#### 12.4.4 Zorg voor duidelijke instructies voor de bewoners/omgeving/hulpdiensten

Waterstof in de bewoonde omgeving is voor iedereen nieuw, in het geval van incidenten moet het voor bewoners/omgeving/hulpdiensten duidelijk zijn welke acties er moeten worden genomen. Een duidelijk (gedocumenteerde) instructie zal ervoor zorgen dat er op een eenduidige manier kan worden gecommuniceerd naar en getraind door alle betrokkenen (netbeheerder/bewoners/omgeving/ hulpdiensten). Hierdoor kunnen alle betrokkenen de juiste informatie tot zich nemen en op een “veilige” manier reageren.

Er mogen (tijdens de pilots) alleen door daartoe bevoegde en erkende bedrijven aanpassingen worden gedaan aan de waterstofinfrastructuur en installaties.

**Aanbeveling:** Onderzoek of het mogelijk is dat er alleen kan en mag worden gewerkt aan waterstofinfrastructuur en -installaties door daartoe bevoegde en erkende installatiebedrijven

## 13 Lekkage

### 13.1 Lekkage algemeen - distributienetwerken en stations

#### 13.1.1 Voorbereidingsfase

*Inventariseren of installatie moet voldoen aan de Richtlijn Industriële Emissie*

Op basis van de richtlijn industriële emissies controleren overheden de vergunningaanvragen, zoals bijvoorbeeld de omgevingsvergunning. De vergunningaanvragen van grote bedrijven moeten voldoen aan de beste beschikbare technieken (BBT).

De toezichthoudende instanties kunnen voor het verkrijgen van een omgevingsvergunning, vragen om te voldoen aan de richtlijn. In de vergunningsaanvraag moet worden aangegeven welke maatregelen er getroffen zijn voor preventie en bestrijding om verontreiniging (bodem, water, lucht) te voorkomen.

*Inventarisatie of QRA (Kwantitatieve Risico Analyse) moet worden opgesteld.*

Door middel van een kwantitatieve risicoanalyse (of: QRA) wordt een statistische bepaling gemaakt van de risico's voor omgeving en betrokkenen als gevolg van risicovolle bedrijfsactiviteiten. Een QRA wordt over het algemeen gevraagd door de toezichthoudende instanties om een vergunning uit te kunnen/willen geven.

#### 13.1.2 Ontwerpfase

*Ontwerp/aanleg/beheer naar de geest van NEN1059*

De NEN1059 bevat relevante functionele eisen voor het ontwerp, de materialen, de bouw, het beproeven, de bediening en het onderhoud van gasdrukregel- en meetstations van gasdrukregel- en/of meetopstellingen die onderdeel zijn van een gastransport- en gasdistributiesysteem.

Uit eerdere testen is gebleken dat wanneer de installaties dicht zijn voor aardgas, dat deze ook dicht zijn voor waterstof. Hierdoor is het aannemelijk dat de uitgangspunten van de NEN1059 ook goed te gebruiken zijn voor de waterstofgasdrukregel- en meetstations. De werking van regelaar en veiligheidsen zijn deels binnen het project HyDelta getest, daarom zal per pilot gekeken moeten worden welk stationstype ingezet gaat worden en of dat deze voldoet.

*Ontwerp/aanleg/beheer naar de geest van NEN7244 (leidingen en meteropstellingen)*

De NEN7244 is de leidraad voor het ontwerp/aanleg en beheer van aardgasdistributieleidingen, aansluitleidingen en meteropstellingen. Uit eerdere testen en onderzoek is gebleken dat de

uitgangspunten van de NEN7244, met inachtneming van de verschillende karakteristieken van het medium, ook goed te gebruiken zijn voor de waterstofdistributieleidingen.

#### *Inventariseer diepte van (bestaande) leidingen*

De bestaande distributieleidingen liggen volgens de geldende normen op de diepte in de grond conform de NEN7244.

Er zal extra aandacht nodig zijn voor bestaande leidingen die in het verleden (conform de toen geldende norm) met minder gronddek zijn aangelegd dan de huidige voorschriften aangeven of door maaiveldwijziging een ander dekking hebben gekregen. Per situatie zal gekeken moeten worden of bij een leiding met te weinig gronddek of bestemmingswijzigingen er aanpassingen moeten worden doorgevoerd om bij graafwerkzaamheden de veiligheid te kunnen garanderen. Een optie kan zijn dat een leiding dieper in de grond zal moeten worden gelegd, om graafschades te voorkomen.

#### *Inventariseren of ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor aanleg in overstromingsgebied*

Er zal geïnventariseerd moeten worden of de huidige ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor het geval dat de distributieleiding is aangelegd in een mogelijk overstromingsgebied. Als dit niet het geval is zullen de ontwerpuitgangspunten/-maatregelen moeten worden aangepast.

**Aanbeveling:** inventariseer of uitgangspunten/maatregelen toereikend zijn voor gebruik binnen overstromingsgebieden.

#### *Inventariseren of ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor aanleg in aardbevingsgebied*

Er zal geïnventariseerd moeten worden of de huidige ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor het geval dat de distributieleiding is aangelegd in een mogelijk aardbevingsgebied. Als dit niet het geval is zullen de ontwerpuitgangspunten/-maatregelen moeten worden aangepast.

**Aanbeveling:** inventariseer of uitgangspunten/maatregelen toereikend zijn voor gebruik in aardbevingsgebieden.

#### *Waterstofleiding door de kruipruimte*

In verband met mogelijke lekkages is het wenselijk dat een gasvoerende leiding zo beperkt als mogelijk is in de kruipruimte aanwezig is zodat er geen gasophoping kan plaats vinden in de kruipruimte of dat de lekkage vroegtijdig kan worden gedetecteerd en de nodige acties worden ondernomen om escalatie te voorkomen.

Mogelijke opties hierbij zijn:

- 1) Installeer een mantelbuis of Peko door kruipruimte zoals bij aardgas;
- 2) Zorg voor gasdetectie in de kruipruimte met akoestisch- en optisch alarm en opvolging (wegnemen bron);
- 3) Zorg voor voldoende ventilatie van de kruipruimte.

**Aanbeveling:** Onderzoek welke oplossing de beste oplossing is om gasophoping in de kruipruimte te voorkomen.

### 13.1.3 Implementatiefase

#### *Uitvoer druk- en lekdichtheidstest na aanleg en modificaties*

Druk- en lekdichtheidstesten van aardgasleidingen worden uitgevoerd conform de NEN7244 en de VIAG-veiligheidswerkinstructies. Uit eerdere testen en onderzoek is gebleken dat de uitgangspunten van de NEN7244 en VIAG-veiligheidswerkinstructies, met in achtneming van de verschillende karakteristieken van het medium en kleine aanpassingen zoals onder andere het gebruik van stikstof en afwijkende criteria voor druk- en lekdichtheidstesten, ook goed te gebruiken zijn voor de waterstofinfrastructuur.

**N.B.:** Binnen HyDelta wordt onderzocht of er ten aanzien van druk- en lekdichtheidstesten kan worden afgeweken van de criteria zoals deze zijn geformuleerd in de NEN7244 en de VIAG-veiligheidswerkinstructies.

#### *Markering waterstofleiding*

Een waterstofleiding is op diverse manieren te markeren als zijnde een waterstofleiding, dit is noodzakelijk om tijdens werkzaamheden of een incident duidelijkheid te hebben over het medium in de betreffende leiding. Beide leidingen zullen geel uitgevoerd zijn en in beide gassen is THT de toegepaste odorant. Daarom is een goede identificatie of het een waterstof- of aardgasleiding betreft van belang. In het speciaal wanneer er een aardgas- en een waterstofleiding naast elkaar of kruisend zijn aangelegd en één van beide lek is. Enkele opties hiervoor zijn:

- 1) In het geval van nieuwe aanleg of modificaties kan het aanbrengen van een waarschuwing lint boven de leiding worden overwogen. De grondroerder wordt op deze manier tijdens de werkzaamheden tijdig geattendeerd op de aanwezigheid van de betreffende leiding.
- 2) De dop van het zadel kan van een afwijkende kleur worden gefabriceerd of het symbool van waterstof kan in de kap worden ingegraveerd.
- 3) Waar mogelijk kan een waterstofmarkering op de leidingen worden aangebracht/geklemd.

**Aanbeveling:** onderzoek hoe bestaande leidingen eenvoudig gemarkeerd kunnen worden wanneer er waterstof als medium in wordt getransporteerd.

#### *Leidingen opgenomen in GIS-systeem*

Bij het leggen van kabels en leidingen moeten deze worden opgenomen in een GIS-systeem. Belangrijk is dat in het GIS systeem wordt aangegeven dat het een waterstofleiding betreft. Op deze manier kan er bij grondwerkzaamheden worden gecontroleerd of er in het te graven tracé, kabels of leidingen aanwezig zijn. Door deze verplichte controle van het GIS-systeem (Klic-melding) en de 'eis voorzorgsmaatregel', voorafgaande aan de graafwerkzaamheden kunnen graafincidenten tot het minimum worden beperkt.

### 13.1.4 Operationele fase

#### *Opsporen en reparatie van lekkages bij drukval, bij druk- en lektest naar de geest van NEN 7244 en VIAG.*

Bij geconstateerde lekkages zullen deze moeten worden opgespoord en gerepareerd. In de NEN7244 en VIAG-veiligheidswerkinstructies zijn deze werkzaamheden gedefinieerd voor aardgas. Bij het gebruik van waterstof zullen deze werkzaamheden via een vergelijkbare methode als beschreven in de NEN7244 en de VIAG- veiligheidswerkwerkinstructies moeten worden uitgevoerd. Hiervoor zal

voor de waterstofinfrastructuur, net als ook bij het beheer van de aardgasinfrastructuur, een 24/7 beheersorganisatie moeten worden ingericht.

#### *Werkzaamheden mogen alleen op basis van Werkplan*

Werkzaamheden aan een gasvoerende installatie mogen alleen worden uitgevoerd na het verkrijgen van een werkplan. Door het opstellen van een werkplan/bedieningsplan worden ad-hoc werkzaamheden vermeden en wordt er nagedacht door verschillende mensen/instanties over de uit te voeren werkzaamheden.

#### *Maatregelen in de geest van VIAG met extra maatregelen in verband met waterstof en stikstof*

De VIAG-veiligheidswerkwerkinstructies zijn gebaseerd op werkzaamheden aan de aardgasinfrastructuur. Om explosieve mengsels in installaties te voorkomen wordt aanbevolen om bij waterstofinstallaties te spoelen met stikstof. Waterstof en stikstof zijn gassen met andere karakteristieken en eigenschappen. De VIAG-veiligheidswerkwerkinstructies zullen moeten worden aangepast aan het gebruik van waterstof en stikstof.

**Aanbeveling:** Ontwikkel veiligheidswerkwerkinstructies voor het werken met waterstof en stikstof.

#### *Procedure naar de geest van CROW500*

De CROW500-richtlijn gaat over het voorkomen van graafschade aan kabels en leidingen. Door een centrale melding (Klic) wordt gecontroleerd of er in het graaftracé kabels of leidingen aanwezig zijn. Wanneer de CROW-500 procedure voorafgaande aan de werkzaamheden wordt gevolgd, kunnen graafincidenten tot het minimum worden beperkt. Overwogen kan worden om toezicht bij graafwerkzaamheden te verplichten nabij een waterstof(distributie)leiding of zorg dat de netwerkbeheerder de aanwezige waterstofleiding vrij graaft

**Aanbeveling:** Zorg voor aanwezigheid van netwerkbeheerder bij graafwerkzaamheden nabij een waterstof(distributie)leiding.

#### *Leidingen lekkage in de grond*

De aangelegde distributieleidingen liggen buiten in de grond, waardoor kleine emissies niet direct zullen leiden tot incidenten omdat het gas via de grond in de buitenlucht kan ontsnappen.

Wanneer het gas niet kan ontsnappen naar de buitenlucht, dan ontstaat het risico van ophoping in bijvoorbeeld een kruipruimte en is het noodzakelijk dat de lekkage tijdig wordt gesignaleerd door geurdetectie of lekzoeken.

Periodiek bovengronds lekzoeken zal kleine lekkages doen vinden, hierbij zal rekening gehouden moeten worden met de samenstelling van de deklaag van de leiding in verband met de gasdoorlatendheid van de bodem (samenstelling grond, fundatie, bestrating, voegmiddel, etc.)

## 13.2 Lekkage algemeen – Binneninstallatie

### 13.2.1 Operationele fase

#### *Opsporen en reparatie van lekkages bij drukval, bij druk- en lektest*

Bij geconstateerde lekkages zullen deze moeten worden opgespoord en gerepareerd. In de NEN1078 en NEN8078 richtlijn zijn deze werkzaamheden gedefinieerd voor aardgas. Bij het gebruik van waterstof zullen deze werkzaamheden via een vergelijkbare methode als beschreven is in de NEN1078 en NEN8078 richtlijn, moeten worden uitgevoerd (zie ook hoofdstuk 'Lekkage detecteren door ongecontroleerde drukval').



## 14 Verspreiding

### 14.1 Gas lekt naar gebouw - Distributienetwerk

#### 14.1.1 Ontwerpfase

##### *Dicht muurdoorvoeringen gasdicht af*

Door lekkages kunnen gelekte gassen zich via de grond verplaatsen richting de eventueel aanwezige bebouwing. Door conform de NEN7244 aan te leggen, zal de muurdoorvoering gasdicht worden uitgevoerd en kunnen de gassen de bebouwing via deze weg niet binnendringen

#### 14.1.2 Operationele fase

##### *Periodiek bovengronds lekzoeken*

Door middel van een periodiek bovengronds lekzoekprogramma kunnen (kleine) lekkages worden opgespoord voordat deze een zodanige omvang krijgen dat ze een gevaar vormen voor de omgeving. Een frequentie voor een dergelijk controle zal bepaald moeten worden. Een mogelijke frequentie zou jaarlijks kunnen zijn. Wanneer er meer kennis van de infrastructuur en het medium is verzameld, kan de frequentie in een later stadium worden bijgesteld.

### 14.2 Gas komt gebouw binnen - Binneninstallatie (achter de meter)

#### 14.2.1 Ontwerpfase

##### *Ventilatie*

Door ventilatie kan voorkomen worden dat er een brandbaar of explosief mengsel kan gaan ontstaan. Wanneer de ventilatievoud groter is dan 5 keer per uur mag deze worden beschouwd als “Goed” (NPR7910-1). Aangezien binnen woningen de ventilatievoud vaak niet verder komt dan 2 keer per uur, moet deze als gematigd worden beschouwd (NPR7910-1) of als “geen ventilatie” wanneer de verversingsgraad minder dan 1 keer per uur is (NPR7910-1)<sup>12</sup>. Er zal onderzocht moeten worden welke verversingsgraad realistisch is binnen een woning of in bepaalde ruimtes binnen een woning.

Bijvoorbeeld: conform de NEN2768 zal bij nieuwbouw de meterkastdeur voorzien moeten worden van ventilatieroosters. Er kan overwogen/aanbevolen worden de eis toe te passen voor bestaande bouw indien daar wordt omgebouwd naar waterstof.

---

<sup>12</sup> Voor nieuwbouw woningen wordt in het bouwbesluit verwezen naar de NEN 1087. Daarin wordt per type ruimte een minimale eis gegeven in dm<sup>3</sup>/sec. Omgerekend komt deze in de orde grootte tussen 1-2 /uur.

## 15 Overzichtslijst met mogelijke maatregelen

Samenvattend worden de hierboven beschreven maatregelen opgesomd in onderstaande tabel.

Maatregel	fase	specifiek waterstof
<b>Generieke maatregelen</b>		
Aanwijzing bevoegdheden in de geest van VIAG	Vorbereiding	
Extra maatregelen in verband met stikstof	Vorbereiding	x
Inspectie binneninstallatie	Vorbereiding	x
Bepalen veiligheidsafstand rondom de drukregel- en meetstations en leiding(en)	Vorbereiding	
Periodieke controle van de potentiële lekbronnen	Vorbereiding	
Gebruik geodoriseerd gas	Ontwerp	
Ontwerp/aanleg/beheer binneninstallatie naar de geest van NEN1078 (nieuwbouw)	Ontwerp	
Ontwerp/aanleg/beheer binneninstallatie naar de geest van NEN8078 (bestaande bouw)	Ontwerp	
Installatie(s) uitvoeren door middel van brandwerende pijpleidingen	Ontwerp	
Plaatsing van (extra) tussenafsluiters (segmentering transport- en distributienetwerk)	Ontwerp	x
Aanbrengen spoelpunten in de leiding voor reparatie en aanpassingen (t.b.v. stikstof spoelen)	Ontwerp	x
Gebruik bij aanleg, vervanging en modificaties daarvoor geschikte materialen	Ontwerp	x
Installeer ATEX-installaties en apparatuur	Ontwerp	
Installeer gecertificeerde eindgebruikersapparatuur	Ontwerp	x
Inspecteer gebruikte materialen (bestaande installatie of deze geschikt zijn)	Ontwerp	x
Beperk toegang tot installatie	Ontwerp	
Aanbrengen aanrijbeveiliging voor installaties	Ontwerp	
Detectie lekkage via diverse mogelijkheden	Ontwerp	x
Aanleg en onderhoud door vakbekwame monteurs/installateurs (bv door duidelijke instructies en training)	Implementatie	x
Informatieverstrekking aanvang werkzaamheden (Uitleg gevaren)	Implementatie	x
Bij aanvang werkzaamheden 's ochtends startwerkvergadering	Implementatie	x
PBM's: Gas- en zuurstofdetectieapparatuur	Implementatie	x
PBM's: Kleding	Implementatie	
Materieel	Implementatie	x
Zorg voor duidelijke instructies voor de Netbeheerder/ gebruikers/omgeving/hulpdiensten	Implementatie	
Voer druk- en lekdichtheidstest uit na aanleg en modificatie(s)	Implementatie	
Installeer brandblusapparatuur	Implementatie	
Periodiek bovengronds lekzoeken	Operationeel	x
Lekkage detecteren door ongecontroleerde drukval	Operationeel	x
Zorg voor duidelijke instructies voor de gebruikers/omgeving/hulpdiensten	Operationeel	
<b>Lekkage algemeen - distributienetwerk en station</b>		
Inventariseren of installatie moet voldoen aan de Richtlijn Industriële Emissie	Vorbereiding	
Inventarisatie of QRA (Kwantitatieve Risico Analyse) moet worden opgesteld.	Vorbereiding	x
Ontwerp/aanleg/beheer naar de geest van NEN1059	Ontwerp	
Ontwerp/aanleg/beheer naar de geest van NEN7244 (leidingen en meteropstellingen)	Ontwerp	
Inventariseer diepte van (bestaande) leidingen	Ontwerp	x
Inventariseren of ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor aanleg in overstromingsgebied	Ontwerp	
Inventariseren of ontwerpuitgangspunten/-maatregelen voldoende zijn voor aanleg in aardbevingsgebied	Ontwerp	

Waterstofleiding door de kruipruimte	Ontwerp	x
Uitvoer druk- en lekdichtheidstest na aanleg en modificaties	Implementatie	
Markering waterstofleiding	Implementatie	x
Leidingen opnemen in GIS-systeem	Implementatie	
Opsporen en reparatie van lekkages bij drukval, bij druk- en lectest naar de geest van NEN 7244 en VIAG.	Operationeel	
Werkzaamheden mogen alleen op basis van Werkplan	Operationeel	
Maatregelen in de geest van VIAG met extra maatregelen in verband met waterstof en stikstof	Operationeel	x
Procedure naar de geest van CROW500	Operationeel	
Leidingen lekkage in de grond	Operationeel	
<b>Lekkage algemeen – Binneninstallatie</b>		
Opsporen en reparatie van lekkages bij drukval, bij druk- en lectest	Operationeel	
<b>Verspreiding: Gas lekt naar gebouw - Distributienetwerk</b>		
Dicht muurdoorvoeringen gasdicht af	Ontwerp	
Periodiek bovengronds lekzoeken	Operationeel	
<b>Verspreiding: Gas komt gebouw binnen - Binnen installatie</b>		
Ventilatie	Ontwerp	x



## 16 Referenties

- [1] KIWA, DNV, „Hydelta D1a\_1 Uitkomsten onderzoeken Verenigd Koninkrijk Hy4Heat en H21 vertaald naar Nederlandse situatie,” 2022.
- [2] DNV, „Gedrag van waterstof bij lekkages in het distributienet,” 2020.
- [3] DNV, „H21, QRA model for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.
- [4] DNV, „H21, Risk predictions for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.
- [5] M. Acton, A. Halford en A. Phillips, „Quantification of the Risks Associated with a Hydrogen Gas Distribution Network,” in *Hazards 30 (paper accepted)*, Manchester, November 2021.
- [6] DNV GL, „Rapport proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast,” 2020.
- [7] H. Top, „Onderzoek aan een Rinnai RC 204 W-1 afvoerloze kachel met geforceerde convectie,” N.V. Nederlandse Gasunie, Rapport TP/M 92.R.1008, 1992.
- [8] DNV, „Investigation into the cross-sensitivity of domestic carbon monoxide alarms to hydrogen,” in *ICHS*, 2021.
- [9] DNV, „Verkenning metingen naar gebruik CO melders voor waterstof detectie - Hydrogreenn,” 2019.
- [10] IEEE, „IEEE Citation Guidelines,” [Online]. Available: <https://iee-dataport.org/sites/default/files/analysis/27/IEEE%20Citation%20Guidelines.pdf>. [Geopend 19 03 2021].
- [11] KIWA Technology, „Betrouwbaarheid van gasdistributienetten in Nederland,” Netbeheer NL, 2018.
- [12] M. Acton en B. Smith, „The Development and Application of Risk Assessment Techniques for Gas Distribution Pipelines,” in *Rio Oil & Gas Conference, IBP24000*, 2000.
- [13] DNV GL, „Thermal radiation properties of large hydrogen leaks from gas distribution networks,” in *ICHS*, Adelaide, 2019.
- [14] M. Acton, A. Halford, P. A., R. Oxley en D. Evans, „Quantification of the risks associated with a hydrogen gas distribution network,” in *Hazards 31 Conference*, 2021.