

HyDelta 2

WP6A – Safety of hydrogen in the distribution grid and built environment

D6A.1 – Uitkomsten uitstroomexperimenten - Concentratieopbouw bij lekkages tussen 50 - 1000 dm³/h

Status: final

Document samenvatting

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Henk Salomons
Verbonden aan	Kiwa Technology BV
E-mailadres	Henk.Salomons@kiwa.com

Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting (van de wijzigingen)
1	21 februari 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology BV	Ruwe en nog niet volledige versie voor bespreking van aanpak en opzet rapport.
2	7 maart 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Eerste complete versie voor commentaar begeleidingsgroep.
3	4 mei 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Kritiekverwerking versie 2.
4	23 juni 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Kritiekverwerking versie 3.
5	26 juni 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Kritiekverwerking versie 4.
6	8 juni 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Kritiekverwerking versie 5.
7	26 juni 2023	Henk Salomons	Kiwa Technology	Kritiekverwerking versie 6

Verspreidingsniveau

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

Document review

Partner	Naam
Kiwa Technology	Rob van Aerde
DNV	Albert van den Noort
TNO	John Zevenbergen
Alliander	Pascal te Morsche
Enexis	Raymond van Hooijdonk
Netbeheer Nederland	Tom Eijsackers
Rendo	Johan Jonkman
Stedin	Gilles de Kok
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group

Executive summary

Hydrogen has different properties from natural gas. The physical and chemical characteristics are known in detail, but there is still insufficient knowledge about the safety risk when applied in gas pipelines in the built environment. However, this knowledge is needed to know whether different safety measures need to be taken than for natural gas.

This required knowledge mainly relates to probabilities and consequences of the unwanted release of hydrogen. Mitigating measures are then aimed at reducing the probability of a hazardous situation arising and/or reducing its consequences.

In HyDelta 1.0 (the predecessor of this project), concentration measurements were therefore made to gain insight on the diffusion of hydrogen versus methane at small leak sizes of hydrogen and methane in the gas meter cabinet (up to 20 and up to 15 dm³/h, respectively). In the present study, which falls under HyDelta 2.0, the measurements were scaled up to higher gas outflows, namely 50, 100, 300 and 1000 dm³/h. The measurements were carried out in a container composed of a room (26 m³) and a hall (10 m³) containing a gas meter cabinet. See Figure 1:



Figure 1: Top view of container with division into hall (10 m³) and room (26 m³)

The dispersion of the gases was measured with gas sensors mounted in a matrix of three height positions, three width positions and six longitudinal positions. See Figure 2.

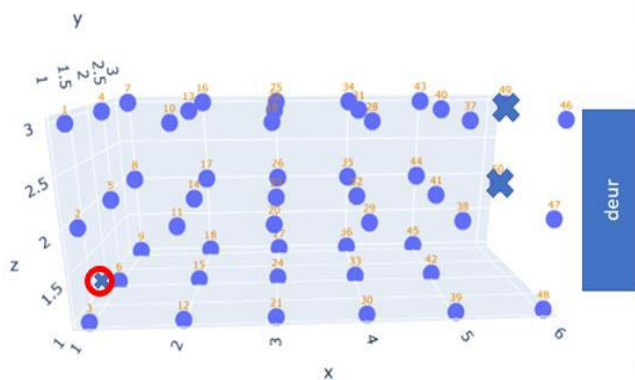


Figure 2: Side view container with positions of gas sensors. The gas outflow point is circled in red. Gas sensor 50 is used as extra protection (with a limit value of 60% of the LEL).

Experiments have been performed with the following variables:

Gas outflow:	50, 100, 300 en 1000 dm ³ /h
Gas types:	hydrogen/natural gas
Ventilation grilles of the gas meter cabinet (ventilation to the hall):	open/closed (taped shut)
Ventilation grille from the hall to the outside (left, top):	open/closed
Door between hall and room:	open/closed
Air supply over floor:	18 en 36 dm ³ /h
Air extraction via outdoor air grille:	18 en 36 dm ³ /h

The gas outflow was stopped as soon as one of the sensors registered more than 50% LEL. This safety measure was taken to prevent unwanted ignition of the gas.

It was estimated by extrapolation whether 100% would also be reached if the gas outflow had not stopped.

On this basis, the results of the experiments were classified according to final concentration into one of three categories: less than 50% LEL; between 50% and 100% LEL and greater than 100% LEL. As long as the concentration in the entire container is lower than 100% LEL, the situation is in any case safe because the gas-air mixture cannot ignite.

The measurement results for both hydrogen and natural gas lead to the following findings a. and b.:

a. Inside the gas meter cabinet

In the event of a gas outflow in the meter cabinet of:

- 50 dm³/h or more, the concentration rises to more than 100% LEL if no ventilation grilles are fitted, but to less than 100% LEL if grilles are fitted in accordance with the standard.
- 100 dm³/h or more, the final concentration is greater than 100% LEL.

b. Outside the gas meter cabinet

In the event of a gas outflow *in* the meter cabinet of:

- 50 or 100 dm³/h, the concentration *outside* the meter cabinet remains below 100% LEL;
- 300 dm³/h, the concentration rises above 100% LEL in some of the experiments (hydrogen: 3 out of 8; natural gas in 1 out of 8); and
- 1000 dm³/h the final concentration is more than 100% LEL in all cases.

The results lead to the following conclusions:

1. With a gas outflow of up to 50 dm³/h, the build-up of concentrations (hydrogen and natural gas) remains below 100% LEL in the meter cabinet and the other rooms if the meter cabinet is fitted with the ventilation grilles prescribed for natural gas.

This means that a leak size in the meter cabinet of up to 50 dm³/h can be technically accepted. The ventilation grilles prescribed for natural gas are therefore more than sufficient for hydrogen. It is recommended to install ventilation grilles in meter cabinets for hydrogen gas meter installations in accordance with the current standard NEN 2768 + A1 for natural gas meter cabinets.

2. Hydrogen has a stronger stratification than natural gas.

Especially with low ventilation, this can lead to zones of high gas concentration (“dead spots”) under the ceiling. This risk can be reduced by means of mechanical ventilation. Both extraction and air supply can reduce the chance of such zones:

- With extraction high in the room, the highest concentration is removed.
- When blowing in air, the gas is more mixed with air so that blind spots are avoided.

3. The usefulness of a gas stopper cannot be demonstrated with this study

Based on this study, no recommendation can be made about whether or not to use a gas stopper, because the gas stopper only intervenes far above the gas outflow that was used in the project.

4. Mechanical ventilation is very effective

The ventilation flow rates determined afterwards, calculated on the basis of a change in concentration, are often higher than the set ventilation flow rates. This means that mechanical ventilation often appears to be even more effective than expected on the basis of the set air supply or air exhaust.

A number of possible causes have been found for this, but an unequivocal explanation cannot be given on the basis of the results.

The results lead to the following possibilities for further research:

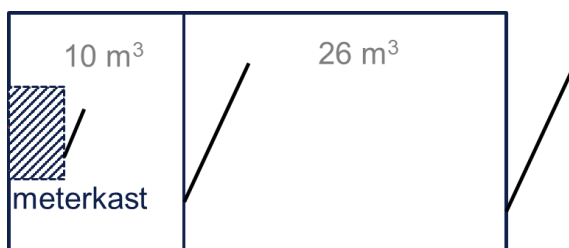
- Experiments with other types (locations for gas meters than those studied here)
- Experiments with small spaces other than a meter cabinet (eg a crawl space, sink cupboard or riser cupboard).
- Experiments or CFD calculations to gain insight into the causes of the higher ventilation than expected (see above under 4.)

Samenvatting

Waterstof heeft andere eigenschappen dan aardgas. De fysische en chemische kenmerken zijn in detail bekend, maar er is nog onvoldoende kennis over het veiligheidsrisico wanneer dit wordt toegepast in gasleidingen in de gebouwde omgeving. Deze kennis is wel nodig om te weten of er andere veiligheidsmaatregelen getroffen moeten worden dan bij aardgas.

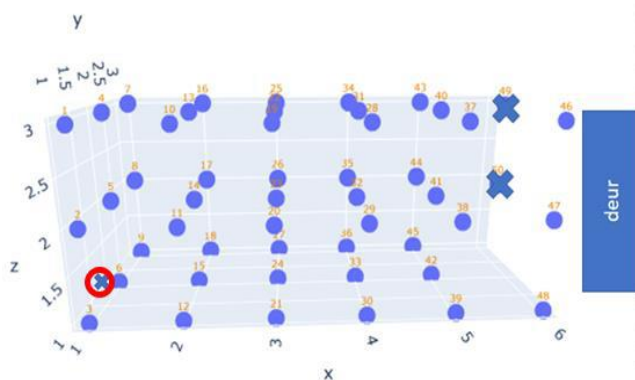
Deze benodigde kennis heeft vooral betrekking op kansen en gevolgen van het ongewenst vrijkomen van waterstof. Mitigerende maatregelen zijn er vervolgens op gericht om de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie te verkleinen en/of de gevolgen hiervan te verminderen.

In HyDelta 1.0 (de voorganger van dit project) zijn daarom concentratiemetingen gedaan om inzicht te krijgen op de verspreiding van waterstof versus methaan bij een kleine leksgrootte van waterstof en methaan in de meterkast (respectievelijk tot 20 en tot 15 dm³/h). In het voorliggende onderzoek, dat valt onder HyDelta 2.0, zijn de metingen opgeschaald naar hogere gasuitstromen, te weten 50, 100, 300 en 1000 dm³/h. De metingen zijn uitgevoerd in een container opgebouwd uit een kamer (26 m³) en een hal (10 m³) met daarin een gasmeterkast. Zie Figuur 1:



Figuur 1: Bovenaanzicht van container met indeling in hal (10 m³) en kamer (26 m³)

De verspreiding van de gassen werd gemeten met gassensoren die waren bevestigd volgens een matrix met drie hoogteposities, drie breedteposities en zes lengteposities. Zie Figuur 2.



Figuur 2: Zij aanzicht container met posities van gassensoren. Rood omcirkeld het gasuitstroompunt. Gassensor 50 wordt gebruikt als extra beveiliging (met grenswaarde van 60% van de LEL).

Er zijn experimenten uitgevoerd met de volgende variabelen:

Gasuitstroom:	50, 100, 300 en 1000 dm ³ /h
Gassoorten:	waterstof/aardgas
Ventilatioeroosters van de meterkast (ventilatie naar de hal):	open/gesloten (dichtgeplakt)
Ventilatioerooster van de hal naar buiten (links, boven):	open/gesloten
Deur tussen hal en kamer:	open/gesloten
Luchtinblaas over vloer:	18 en 36 dm ³ /h
Luchtafzuiging via buitenluchtrooster:	18 en 36 dm ³ /h

De gasuitstroom werd gestopt zodra een van de sensoren meer dan 50% LEL registreerde. Deze veiligheidsmaatregel werd genomen om ongewenste ontsteking van het gas te voorkomen. Door extrapolatie werd geschat of ook 100% bereikt zou worden als de gasuitstroom niet was gestopt.

Op basis hiervan werden de resultaten van de experimenten ingedeeld op basis van eindconcentratie in één van de drie categorieën: kleiner dan 50% LEL; tussen 50% en 100% LEL en groter dan 100% LEL. Zolang de concentratie in de hele container lager is dan 100% LEL is de situatie in elk geval veilig omdat het gasluchtmengsel niet kan ontsteken.

De meetresultaten voor zowel waterstof als aardgas leiden tot de volgende bevindingen a. en b.:

a. Binnen de meterkast

Bij een gasuitstroom in de meterkast van:

- 50 dm³/h of meer loopt de concentratie op tot meer dan 100% LEL als er geen ventilatieroosters zijn aangebracht, maar tot minder dan 100% LEL als er wel roosters conform de norm zijn aangebracht.
- 100 dm³/h of meer is de eindconcentratie wel groter dan 100% LEL.

b. Buiten de meterkast

Bij een gasuitstroom in de meterkast van:

- 50 of 100 dm³/h blijft de concentratie buiten de meterkast onder 100% LEL;
- 300 dm³/h stijgt de concentratie in een deel van de experimenten boven 100% LEL (waterstof: 3 van de 8; aardgas in 1 van de 8); en
- 1000 dm³/h bedraagt de eindconcentratie in alle gevallen meer dan 100% LEL.

De resultaten leiden tot de volgende conclusies:

1. De opbouw van concentraties (waterstof en aardgas) blijft bij een gasuitstroom tot 50 dm³/h onder 100% LEL in de meterkast en de andere vertrekken als de meterkast is voorzien van de voor aardgas voorgeschreven ventilatieroosters.

Dit betekent dat een lekgrootte in de meterkast tot 50 dm³/h technisch gezien geaccepteerd kan worden. De voor aardgas voorgeschreven roosters zijn daarmee ook ruim voldoende voor waterstof. Aanbevolen wordt om in meterkasten voor waterstofgasmeteropstellingen luchtroosters aan te brengen conform de huidige norm NEN 2768 + A1 voor aardgasmeterkasten.

2. Waterstof heeft een sterkere gelaagdheid dan aardgas.

Vooral bij een lage ventilatie kan dit leiden tot zones van hoge gasconcentratie (“dode hoeken”) onder het plafond. Door middel van mechanische ventilatie is de kans hierop terug te dringen. Zowel afzuiging als luchttoevoer kunnen de kans op dergelijke zones verminderen:

- Bij afzuiging hoog in de ruimte wordt de hoogste concentratie afgevoerd.
- Bij het inblazen van lucht wordt het gas meer gemengd met lucht zodat dode hoeken worden vermeden.

3. Het nut van een gasstopper is met dit onderzoek niet aan te tonen

Op basis van dit onderzoek is geen aanbeveling te doen over het al of niet toepassen van een gasstopper, omdat de gasstopper pas ingrijpt ver boven de gasuitstroom waarmee in het project is gewerkt.

4. Mechanische ventilatie is zeer effectief

De achteraf bepaalde, op basis van concentratieverandering berekende ventilatiedebieten zijn vaak hoger dan de ingestelde ventilatiedebieten. Dat betekent dat mechanische ventilatie daardoor vaak nog effectiever lijkt te zijn dan te verwachten op basis van de ingestelde luchttoevoer of luchtafvoer.

Hiervoor zijn wel enkele mogelijke oorzaken gevonden, echter een eenduidige verklaring is op basis van de resultaten niet te geven.

De resultaten leiden tot de volgende mogelijkheden voor vervolgonderzoek:

- Experimenten met andersoortige (opstellingsplaatsen voor gasmeters dan hier onderzocht)
- Experimenten met andere kleine ruimtes dan een meterkast (bijvoorbeeld een kruipruimte, aanrechtkast of stijgstijgkast).
- Experimenten of CFD-berekeningen om inzicht te verkrijgen in de oorzaken van de hogere ventilatie dan verwacht (zie hierboven onder 4.)

Inhoud

Document samenvatting.....	2
Executive summary	3
Samenvatting.....	6
1 Inleiding	12
1.1 HyDelta 2.0 versus HyDelta 1.0	12
1.2 Terminologie.....	12
LEL, UEL, onderste en bovenste brandbaarheidsgrens	12
2 Uitvoering van de experimenten.....	13
2.1 Algemeen.....	13
2.2 Indeling van de container	13
2.3 Simulatie van een gaslekage.....	15
2.4 Ventilatie	16
Geen ventilatie	16
Natuurlijke ventilatie.....	16
Mechanische luchttoevoer.....	17
Mechanische luchtafvoer	18
3 Gasuitstroom met meterkast, 10 m ³ en 26 m ³ ruimten.....	19
3.1 Indeling en plaatsing van sensoren	19
3.2 Variabelen	19
4 Resultaten in het kort.....	22
4.1 Hoofdconclusie.....	22
4.2 De meetresultaten samengevat in twee tabellen.....	22
4.3 De grens van 100% LEL	23
4.4 Opbouw van de profielen en bepalen eindconcentratie	23
4.5 Meetdata	24
5 Sectie 1: Metingen in de meterkast	25
5.1 Gesloten ventilatieroosters in de meterkast (configuratie 1).....	25
5.2 Effect ventilatieroosters in de meterkast (configuratie 3).....	28
5.3 Effect open tussendeur (configuratie 4).....	30
6 Sectie 2: Metingen buiten de meterkast.....	33
6.1 Gesloten roosters in de meterkast (configuratie 1)	33
6.2 Effect open roosters in de meterkast (configuratie 3)	34
6.3 Effect open tussendeur (configuratie 4).....	36

6.4	Effect van natuurlijke ventilatie in de container (configuratie 7)	39
6.5	Effect van geforceerde toevoer van ventilatie in de container (configuratie 7/0.5 en 7/1.0) 40	
6.6	Effect van geforceerde afvoer van ventilatie in de container (configuratie 8/0.5 en 8/1.0)	41
7	Bepaling van het ventilatievoud op basis van de gemeten concentratieprofielen.....	43
7.1	Algemeen.....	43
7.2	Effect van natuurlijke ventilatie op het ventilatievoud.....	45
7.3	Effect van geforceerde toevoer van lucht op het ventilatievoud	46
7.4	Effect van geforceerde afvoer van lucht op het ventilatievoud.....	47
8	Discussie van de resultaten van de experimenten.....	48
8.1	Algemeen.....	48
8.2	Ventilatie van de meterkast volgens voorschriften is essentieel.....	48
8.3	Grenswaarde voor lekgrootte voor waterstof hoeft niet anders dan aardgas	49
8.4	Mechanische toevoer van lucht is zeer effectief om de gasconcentratie laag te houden....	49
8.5	Mechanische afvoer van lucht is eveneens effectief.	49
8.6	Gelaagdheid bij waterstof	50
9	Conclusies uit de experimenten	51
9.1	Ventilatie van de meterkast is noodzakelijk.....	51
9.2	Grenswaarde voor lekgrootte voor waterstof niet anders dan voor aardgas	51
9.3	Bij lekgrootte van 50 tot 100 dm ³ /h geen ontsteekbare concentratie buiten de meterkast	51
9.4	Lekkages buiten de meterkast.....	51
9.5	Verschillen in ventilatievoud/ventilatiedebit	51
9.6	Gasstopper als mitigerende maatregel?	51
10	Aanbevelingen voor verder experimenteel onderzoek.....	52
10.1	Andersoortige meterkasten	52
10.2	Andere ruimten dan een meterkast.....	52
10.3	Nader onderzoek naar onverklaarbare effecten.....	52
	Bijlagen	53
I	Praktijkvoorbeelden van lekken	54
II	Bepaling gemiddelde ventilatievoud.....	57
II.1	Algemeen.....	57
II.2	Ventilatievoud	57
III	Metingen in de meterkast, schematisch gerangschikt.....	61
III.1	Waterstof configuratie 1, 3 en 4	61
III.2	Aardgas configuratie 1, 3 en 4.....	62
IV	Metingen buiten de meterkast, schematisch gerangschikt	63

IV.1	Waterstof configuratie 1, 3 en 4	63
IV.2	Waterstof configuratie 7, 7/0.5 en 7/1.0	64
IV.3	Waterstof configuratie 8/0.5 en 8/1.0	65
IV.4	Aardgas configuratie 1, 3 en 4.....	66
IV.5	Aardgas configuratie 7, 7/0.5 en 7/1.0.....	67
IV.6	Aardgas configuratie 8/0.5 en 8/1.0	68
V	Alle meetgrafieken.....	69
VI	Ventilatievoud en gemiddelde eindconcentratie (berekend)	85
VII	Meterkast gebruikt voor de proefopstelling	86
	Referenties	87

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 voor professionals en bewoners in de praktijk van de gasdistributie en in het gastransport. Deze kennis is wel nodig, om wanneer vanuit veiligheids-oogpunt gewenst, het omgaan met waterstof aan te passen. Er is wel uitgebreide kennis van aardgas en die kennis kan als basis dienen in het vergelijken met waterstof.

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 te verkleinen.

1.1 HyDelta 2.0 versus HyDelta 1.0

In het HyDelta programma 2021-2022 (HyDelta 1.0) was daartoe het werkpakket ‘Waterstof en Veiligheid’ gedefinieerd met de volgende hoofddoelstelling:

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.

In het kader hiervan werden onder andere experimenten uitgevoerd naar de verspreiding van waterstof en aardgas in een container bij verschillende vormen van ventilatie. De gasuitstroom bij deze experimenten was beperkt tot 20 dm³/h. Het voorliggende onderzoek, dat valt onder HyDelta 2.0, Werkpakket 6a/Taak1 heeft dezelfde hoofddoelstelling als HyDelta 1.0. De experimenten zijn een uitbreiding op de experimenten van HyDelta 1.0; met hogere gasuitstromen dan bij 1.0. Met dezelfde testopstelling is (met gasuitstromen van 50, 100, 300 en 1.000 dm³/h) de verspreiding en concentratieopbouw in de container gemeten onder verschillende ventilatie-omstandigheden. De metingen zijn uitgevoerd met zowel aardgas als waterstof.

1.2 Terminologie

LEL, UEL, onderste en bovenste brandbaarheidsgrens

In dit rapport wordt voor de onderste en bovenste brandbaarheidsgrens van een gas respectievelijk de afkorting LEL en UEL gebruikt. Deze afkortingen sluiten aan bij de Nederlandse en Europese in gebruik zijnde normen. In deze normen wordt geen onderscheid gemaakt tussen LEL/UEL en LFL (lower flammability limit)/UFL, daarom wordt in dit rapport dat onderscheid ook niet gemaakt.

Met LEL wordt de onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Onder de onderste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende brandstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met LEL en LFL wordt hier dezelfde onderste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de LEL/LFL 4 vol% waterstof in lucht, voor aardgas is deze waarde 5,8 vol%

Met UEL wordt de bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Boven de bovenste brandbaarheidsgrens is er onvoldoende zuurstof aanwezig om een verbrandingsreactie in stand te houden. Met UEL en UFL wordt hier dezelfde bovenste brandbaarheidsgrens bedoeld. Voor waterstof is de UEL/UFL 75 vol% waterstof in lucht, voor aardgas is deze waarde 15,9 vol%

Ventilatievoud (het)

Het aantal luchtverversingen van een ruimte of gebouw per uur.

2 Uitvoering van de experimenten

2.1 Algemeen

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. Deze container is eerder gebruikt voor HyDelta 1.0, wat hergebruik voor Hydelta 2.0 en specifiek dit onderzoek ook logisch maakt. Voor HyDelta 2.0 zijn de mogelijkheden verder uitgebreid, waardoor er een groter debiet van uitstromend gas mogelijk werd en zodat het ventilatievoud kon worden ingesteld door het gecontroleerd inblazen en afzuigen van lucht.

De inwendige afmetingen van de container zijn 600 cm x 250 cm x 250 cm (l x b x h) met een werkvolume van ongeveer 36 m³. Het voordeel van deze kantoorunit container is dat alle wanden vlak zijn en de unit geïsoleerd is, waardoor de container makkelijk in te richten is en invloeden van buitenaf (temperatuur, wind, etc.) tot een minimum beperkt zijn.

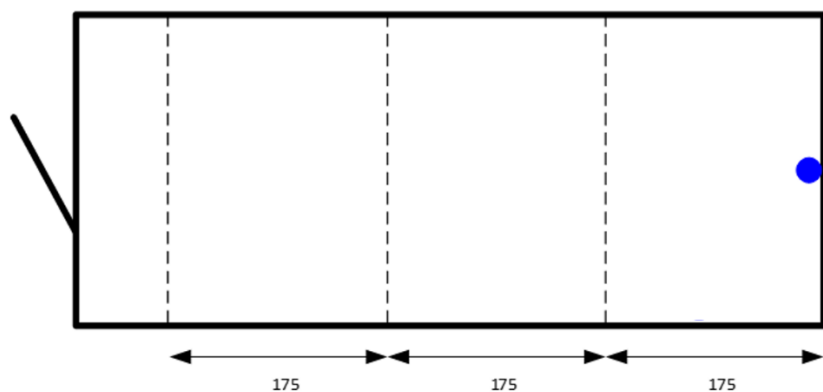


Figuur 1: Foto van de standaard kantoorunit container

2.2 Indeling van de container

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

Op de wanden, vloer en plafond zijn houten regels aangebracht; tegen de houten regels kunnen platen worden gemonteerd om zo de binnenruimte te kunnen verdelen in compartimenten van 10, 20 of 30 m³ (zie ook Fig.2). De meterkast uit onderzoek [1] is hiervoor gebruikt. De doorlaat van de ventilatieroosters in de meterkastdeur voldoen aan de norm; zie Bijlage VII. Voorafgaand aan de experimenten kan de container verwarmd worden tot 20°C. Indien nodig kan de container worden afgeschermd van direct zonlicht.



Figuur 2 Indeling van de container (bovenaanzicht) met de in te richten ruimtes van 10-20-30m³ (rechts naar links) en met de locatie van de uitstroom (blauwe punt)

Om de verspreiding van gas in de container te volgen is er een matrix van 50 gassensoren met verschillende horizontale en verticale posities geplaatst waarbij op verschillende plaatsen de methaan- of waterstofconcentratie gemonitord kan worden.

Tabel 1: Gegevens van de gassensoren

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)

De gassensoren worden met behulp van een stalen dradenrooster verspreid door de ruimte (zie bijv. Figuur 3). Per experiment kan de locatie van de sensoren worden aangepast.

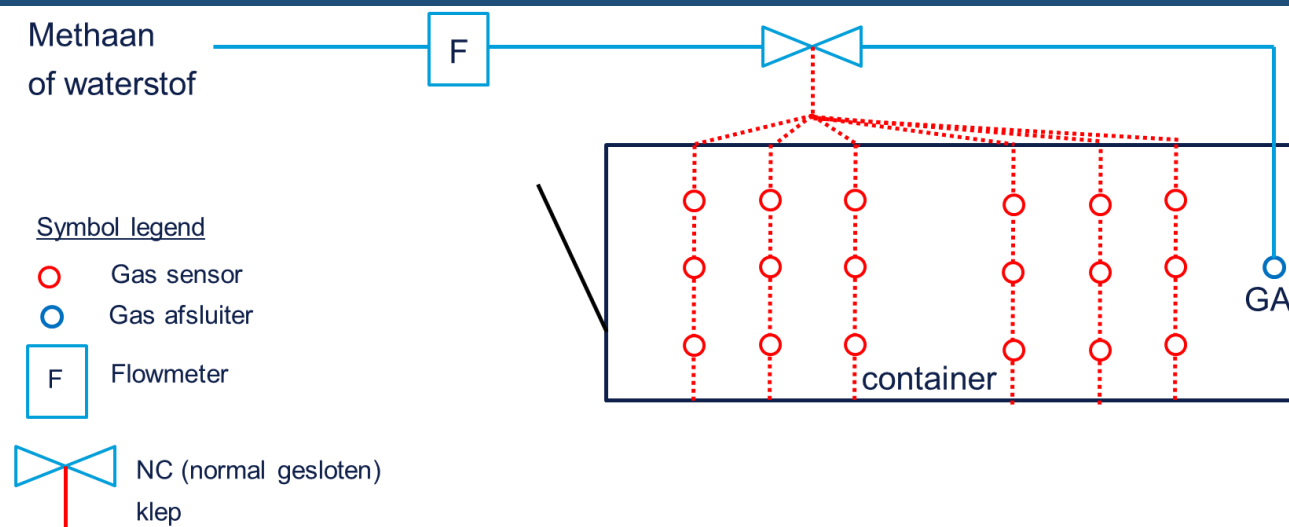


Figuur 3 Matrix van sensoren aan de binnenkant van de container

2.3 Simulatie van een gaslekkage

Het simuleren van een gaslekkage in de container is in Figuur 4 schematisch weergegeven. Tijdens de experimenten worden de methaan- of waterstofgasstromen gemeten met een Bronkhorst EL-FLOW mass flow meter. De uitstroom van gas kan hiermee tussen 50 - 1000 dm³/h worden ingesteld. Het gas stroomt in de container met behulp van een gasafsluiter (Figuur 5). Om de veiligheid tijdens de experimenten te waarborgen, zal in het geval dat de geplaatste gassensoren een overschrijding van 50% van de onderste brandbaarheidsgrens (LEL) registreren, de Normally Closed (NC) klep¹ sluiten zodat er geen gas meer naar de container stroomt. Als extra veiligheidsmaatregel is een sensor geplaatst die 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 zal tijdens de experimenten de gangbare druk voor woningen van 30 mbar worden gebruikt.

¹ De NC klep is een normaal gesloten klep, dat wil zeggen dat bij een stroomuitval de klep automatisch sluit.



Figuur 4 Schematisch overzicht van de gasuitstroom



Figuur 5 Gasafsluiter met opening voor uitstroom

2.4 Ventilatie

in de container dient gecontroleerd en gemeten 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.

De meetopstelling kent verschillende opties waarmee de ventilatie beïnvloed kan worden, namelijk natuurlijke ventilatie, mechanische luchttoevoer en mechanische luchtafvoer. Deze worden hieronder besproken, waarbij eerst de situatie zonder ventilatie wordt toegelicht.

Geen ventilatie

Diverse experimenten zijn uitgevoerd zonder ventilatie van de container. Deze metingen zijn de “worst case”-situatie en dienen als referentie voor metingen met ventilatie. Hoewel de container in deze situatie geen ventilatievoorzieningen heeft is de container niet geheel luchtdicht.

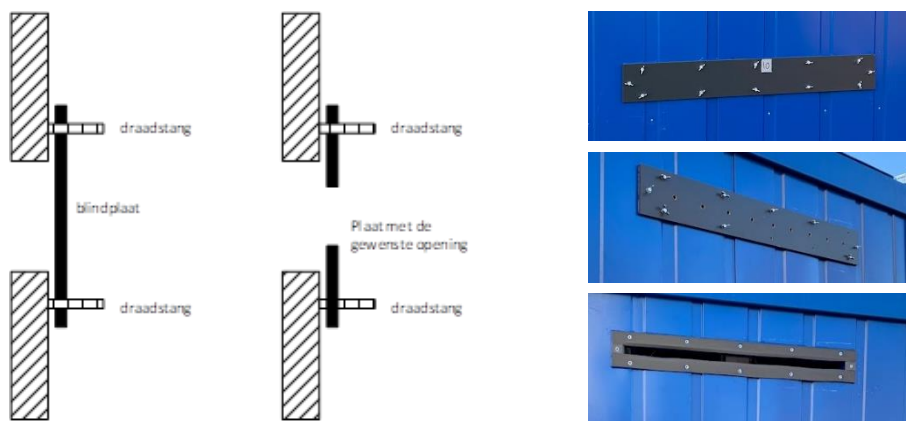
Natuurlijke ventilatie

Zoals in Figuur 6 is weergegeven zijn aan beide zijanten 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 6 Foto van zijkant van de container met de 6 ventilatie openingen

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

De ventilatieopeningen zijn 50 x 2 cm (l x b) bij volledige openingen. Voor een aantal experimenten is een plaat gemaakt met 9 gaten met een diameter van 1 cm.

Een bijzondere vorm van natuurlijke ventilatie is wanneer alle ventilatieroosters gesloten zijn. De container is namelijk niet 100% kierdicht, zoals bij HyDelta 1.0 is gebleken. Ook dan wordt de container dus enigszins geventileerd.

Mechanische luchttoevoer

Het natuurlijke ventilatiedebiet zoals hiervoor beschreven is moeilijk in te stellen op een bepaalde waarde omdat deze wordt beïnvloed door de weersomstandigheden. Bij natuurlijke ventilatie komt de lucht laag in het vertrek binnen, stijgt op door opwarming en stroomt via een hoger gelegen

ventilatieopening naar buiten. Na afloop van de metingen kan de ventilatievoud wel ruwweg worden afgeleid op basis van de snelheid waarmee de gasconcentratie verandert. Echter het ventilatievoud kan niet vooraf worden ingesteld.

Om toch te kunnen meten bij ventilatievouden van 0,5 per uur en 1 per uur is er gebruik gemaakt van een geforceerde toevoer van lucht via een lage sleuf in de container. Met deze lage sleufvormige luchttoevoer werd de “natuurlijke” toevoer onder de deur nagebootst. De lucht werd ingeblazen met een ventilator en gedoseerd met een mass flow controller. Zie Figuur 8.



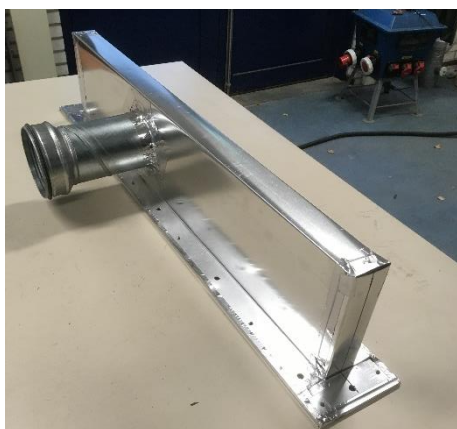
Figuur 8: Gecontroleerde sleufvormige luchttoevoer. Links de toevoerventilator met mass flow controller waarmee een ventilatietoever kan worden ingesteld (Rechts de doorvoering door de containerwand en de luchtverdeelbak).

Een ventilatievoud $R = 1$ kan dus (gegeven de containerinhoud van 36 m³) worden ingesteld door de luchttoevoer af te stellen op 36 m³/h en $R = 0,5$ door 18 m³/h.

Mechanische luchtafvoer

Naast het geforceerd toevoeren van lucht is er gewerkt met een tweede methode voor het instellen van de ventilatievoud, namelijk met mechanische luchtafvoer.

Op vergelijkbare wijze als bij mechanische luchttoevoer werd met gecontroleerde ventilatievouden van 0,5 per uur en 1 per uur gewerkt door lucht af te zuigen via ventilatiesleuf nr. 1. Deze bevindt zich, staande voor de ingang van de container, links achter (bovenste sleuf). Dezelfde ventilator en mass flow controller werden gebruikt, echter met een andere luchtafzuigbak. Zie Figuur 9.



Figuur 9: Luchtafzuigbak, gebruikt voor afzuigdebielen 18 en 36 m³/h.

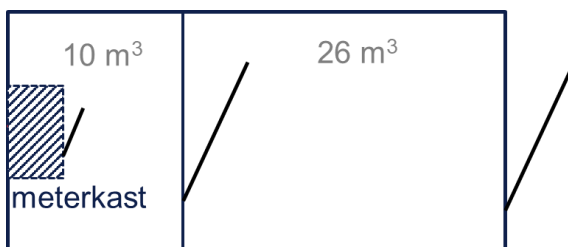
3 Gasuitstroom met meterkast, 10 m³ en 26 m³ ruimten

3.1 Indeling en plaatsing van sensoren

De binnenruimte van de container is (evenals fase 2 in HyDelta 1.0) opgedeeld in twee compartimenten van 10 m³ en 26 m³ (hal respectievelijk kamer) door het plaatsen van een tussenwand met een deur. Hiermee wordt een in de hal geplaatste meterkast gesimuleerd waarbij de hal is verbonden met 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 m³ bevat daarnaast 24 sensoren, de overige sensoren bevinden zich in de ruimte van 26 m³. Figuur 10 laat foto's van de binnenruimtes en de locaties van de sensoren zien.



Figuur 10 Foto's van de opstelling.



Figuur 11 Boveenaanzicht van container met indeling voor fase 2 experimenten

In de experimenten vindt de gasuitstroom in de meterkast plaats en wordt gekeken naar het effect van verschillende ventilatieomstandigheden.

Opmerking: Deze ruimte staat alleen model voor een meterkast, niet voor een stijpkast in bijvoorbeeld een flatgebouw.²

3.2 Variabelen

De experimenten in HyDelta 1.0 (2021-2022) waren beperkt tot gasuitstromen van maximaal 20 dm³/h. In dit vervolg in HyDelta 2.0 is gewerkt met veel grotere gasuitstromen, namelijk 50, 100, 300 en 1000 dm³/h. In Tabel 2 staat bij elke lek grootte een voorbeeld van een toepassing waarbij deze lekkage voor zou kunnen komen. De voorbeelden zijn gebaseerd op een rapport van Hy4Heat [2]. Zie

² Stijpkast: een schacht (kanaal) waar de leidingen van de nutsbedrijven zich bevinden en van waaruit op elke gewenste verdieping een meterkast aangesloten kan worden.

Bijlage I voor meer voorbeelden en voor een toelichting voor de wijze waarop de gegevens uit dit rapport zijn gebruikt.

Tabel 2: Voorbeelden van lekgrootten (meer voorbeelden staan in Bijlage I)

Lekgrootte waterstof (dm ³ /h) bij 20 à 30 mbar	Lek (orde van grootte) komt voor bij:	Afbeelding
50	Lekkende schroefdraadverbinding (50 à 75 dm ³ /h).	
100	Knelkoppeling, handvast aangedraaid zonder sleutel/tang (100 à 150 dm ³ /h).	
300	Boorgat 1 mm in dunwandig koperen gasleiding (250 à 375 dm ³ /h).	
1000	Boorgat 2 mm in dunwandig koperen gasleiding (1000 à 1500 dm ³ /h)	

In de experimenten is gevarieerd met de volgende parameters, zie Tabel 3.

Tabel 3: Variabelen bij de experimenten.

Parameter	Opties
Gasuitstroom	50, 100, 300 en 1000 dm ³ /h
Gassoorten	waterstof/aardgas ³
Ventilatioeroosters in de meterkastdeur (ventilatie meterkast naar hal)	open/gesloten (dichtgeplakt)
Ventilatioerooster hal naar buiten (links, boven)	open/gesloten
Deur tussen hal en kamer	open/gesloten
Geforceerde luchttoevoer over vloer (simulatie luchttoevoer over drempel)	18 en 36 dm ³ /h (resp. ventilatievoud 0,5 en 1/h)
Geforceerde luchtafvoer via buitenluchtrooster nr. 1 (linksachter, bovenste rooster)	18 en 36 dm ³ /h (resp. ventilatievoud 0,5 en 1/h)

Een overzicht van alle uitgevoerde experimenten staat in Tabel 4:

³ In afwijking van HyDelta 1.0 (methaan) is in HyDelta 2.0 gewerkt met aardgas omdat dit het huidige distributiegas is in Nederland.

Tabel 4: Uitgevoerde experimenten

Configuratie code		1	3	4	7	7/0.5	7/1	8/0.5	8/1
Roosters meterkast		Dicht	Open	Open	Open	Open	Open	Open	Open
Tussendeur hal/kamer		Dicht	Dicht	Open	Open	Open	Open	Open	Open
Ventilatie containerunit		Geen	Geen	Geen	Eén sleuf*	Toevoer onderin 18 m³/h	Toevoer onderin 36 m³/h	Afvoer bovenin 18 m³/h	Afvoer bovenin 36 m³/h
Configuratie gemeten met gasuitstroom:	Waterstof (dm³/h)	50	50	50	50	50	50	50	50
		100	100	100	100	100	100	100	100
		300	300	300	300	300	300	300	300
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Aardgas (dm³/h)	50	50	50	50	50	50	50	50
		100	100	100	100	100	100	100	100
		300	300	300	300	300	300	300	300
		1000	1000	1000	1000		1000	1000	1000
*natuurlijke ventilatie door aanbrengen van een plaat met 9 gaten van rond 1 cm; effectief ventilatievoud verschilt per experiment en kan achteraf worden benaderd.									

4 Resultaten in het kort

4.1 Hoofdconclusie

In dit hoofdstuk wordt een totaaloverzicht van alle experimenten gegeven met als belangrijkste vraag in hoeverre de eindconcentratie van het gas een risico kan opleveren en wat het effect van ventilatie is op de eindconcentratie. In de volgende hoofdstukken wordt dieper op de afzonderlijke meetresultaten ingegaan.

Het samenvattende antwoord op de voorliggende vraag is als volgt:

Bij aanwezigheid van meterkastventilatie (ventilatie conform huidige voorschriften) zal bij een lekkage van 50 dm³/h (vergelijkbaar met een lekkende schroefdraadverbinding waterstof bij 20 mbar of dezelfde verbinding met aardgas bij 26 mbar) de brandbaarheidsgrens van zowel aardgas als waterstof niet bereikt worden. Bij grotere lekkages, in ieder geval vanaf 100 dm³/h zal de brandbaarheidsgrens (100% LEL) wel overschreden worden als de meterkast niet wordt geventileerd. Dit geldt voor waterstof en voor aardgas.

Zolang de brandbaarheidsgrens niet wordt overschreden is er geen risico op brand of explosie.

4.2 De meetresultaten samengevat in twee tabellen

Zie Tabel 5 voor de metingen in de meterkast en Tabel 6 voor de metingen buiten de meterkast. De configuraties 2, 5 en 6 ontbreken in deze schema's. Deze configuraties zijn tijdens de uitvoering van het project geschrapt. De configuraties 7/0.5, 7/1.0, 8/0.5 en 8/1.0 zijn tijdens het project toegevoegd aan het meetplan.

Van elke meting is de eindconcentratie met een kleur weergegeven. De eindconcentratie is de concentratie op het moment dat de sensoren een stabiele waarde laten zien. Niet bij alle metingen wordt deze stabiele situatie bereikt omdat de gasuitstroom wordt afgebroken als een van sensoren de 50% LEL waarde heeft bereikt. Bij deze metingen is door middel van extrapolatie ingeschat of de eindconcentratie groter of kleiner is dan 100% LEL. Door de metingen uit te voeren in verschillende configuraties is het mogelijk inzicht te krijgen in de verspreiding en het effect van ventilatie op de concentratieopbouw.

Tabel 5: Eindconcentratie in de meterkast bij configuratie 1, 3 en 4

Configuratie code		1	3	4
Roosters meterkast		Dicht	Open	Open
Tussendeur hal/kamer		Dicht	Dicht	Open
Ventilatie containerunit		Geen	Geen	Geen
Configuratie gemeten met gasuitstroom:	Waterstof (dm ³ /h)	50	50	50
		100	100	100
		300	300	300
	Aardgas (dm ³ /h)	50	50	50
		100	100	100
		300	300	300

Eindconcentratie < 50% LEL
 Eindconcentratie ≥ 50% LEL en <100% LEL
 Eindconcentratie ≥ 100% LEL

Tabel 6: Eindconcentratie **buiten** de meterkast (hal en kamer)

Configuratie code		1	3	4	7	7/0.5	7/1	8/0.5	8/1
Roosters meterkast		Dicht	Open	Open	Open	Open	Open	Open	Open
Tussendeur hal/kamer		Dicht	Dicht	Open	Open	Open	Open	Open	Open
Ventilatie containerunit		Geen	Geen	Geen	Eén sleuf	Toevoer onderin 18 m ³ /h	Toevoer onderin 36 m ³ /h	Afvoer bovenin 18 m ³ /h	Afvoer bovenin 36 m ³ /h
Configuratie gemeten met gasuitstroom:	Waterstof (dm ³ /h)	50	50	50	50	50	50	50	50
		100	100	100	100	100	100	100	100
		300	300	300	300	300	300	300	300
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Aardgas (dm ³ /h)	50	50	50	50	50	50	50	50
		100	100	100	100	100	100	100	100
		300	300	300	300	300	300	300	300
		1000	1000	1000	1000	Geen meting	1000	1000	1000

	Eindconcentratie < 50% LEL
	Eindconcentratie ≥ 50% LEL en <100% LEL
	Eindconcentratie ≥ 100% LEL

4.3 De grens van 100% LEL

De bovenstaande tabellen kunnen de indruk wekken dat met de kleuren het risico van waterstof met dat van aardgas vergeleken kan worden. Dat is echter niet het geval, want bijvoorbeeld 100% LEL van waterstof brengt een ander (kleiner) risico met zich mee dan 100% LEL aardgas. Bij lage gasconcentraties (<8 à 10% vol) is de kans op ontsteken van waterstof namelijk lager dan die van aardgas, en ook het effect bij ontsteken is geringer [6].

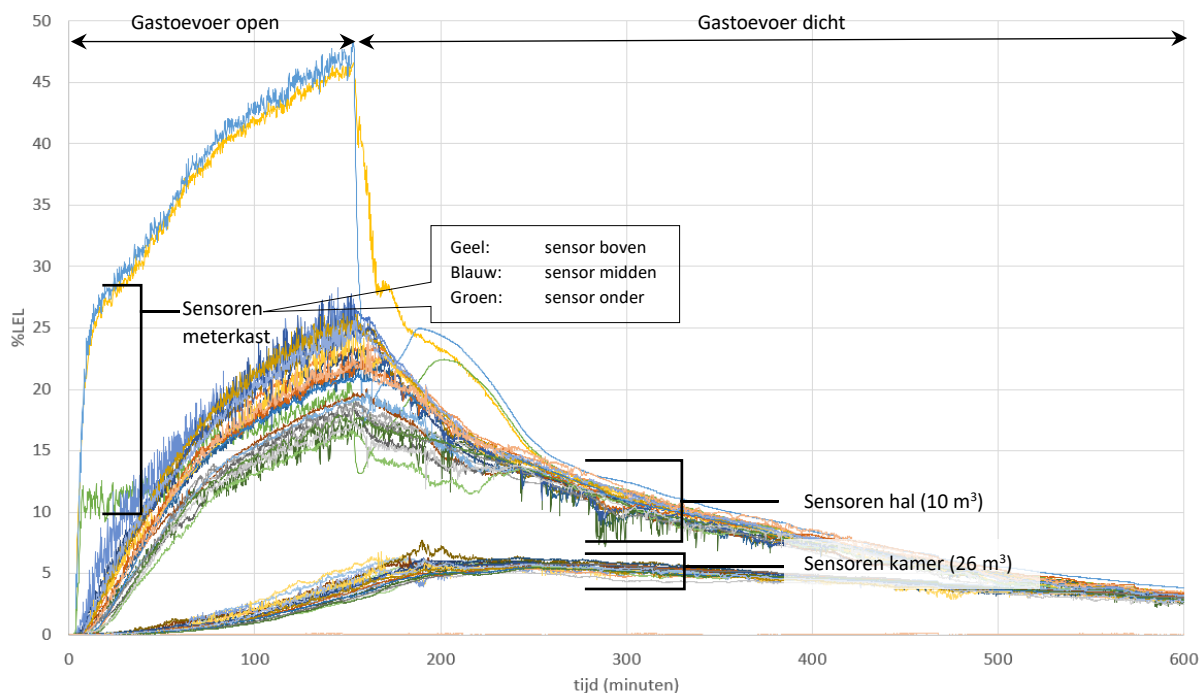
Toch is in dit rapport gewerkt met een grens van 100% LEL. Daarvoor zijn twee redenen:

- Aangezien de gasuitstroom stopt bij 50% LEL is de grens van 100% LEL nog met enige betrouwbaarheid te extrapoleren. Voor hogere concentraties is dat niet meer mogelijk.
- Deze concentratie is voor beide gassen een veilige keuze: als deze concentratie niet bereikt wordt, is er in elk geval geen risico op ontsteking.

4.4 Opbouw van de profielen en bepalen eindconcentratie

De meetresultaten die ten grondslag liggen aan Tabel 5 en Tabel 6 worden besproken in respectievelijk hoofdstuk 5 en 6. In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe de betreffende meetgrafieken zijn opgebouwd en hoe hieruit is afgeleid of de eindconcentratie ≥ 100% LEL wordt.

In Figuur 12 zijn de gemeten waterstofconcentratieprofielen van de sensoren in de meterkast en in de 10 m³ en 26 m³ ruimte (hal en kamer) weergegeven. Het betreft het experiment met een waterstofuitstroom van 50 dm³/h, geopende meterkastroosters en zonder ventilatie van de container. De deur tussen de hal en de kamer was tijdens het experiment gesloten. In de figuur is de gemeten gasconcentratie (in % LEL) weergegeven als functie van de tijd.



Figuur 12: Gemeten profielen van waterstof (uitstroom 50 dm³/h). Omstandigheden: geen ventilatievoorzieningen naar de buitenlucht; de ventilatieroosters in de meterkastdeur geopend (configuratie 3, zie paragraaf 5.2).

De sensoren in de meterkast, hal en kamer zijn in deze figuur als groepen herkenbaar: de profielen van de meterkast verlopen het steilst, daarna de profielen van de hal en daarna de profielen van de kamer. Omdat het gas in de meterkast vrijkomt is dit ook te verwachten.

Op het moment dat één van de sensoren een concentratie van 50% LEL meet (hier: het lichtblauwe profiel met de hoogste concentratie) wordt de gastoevoer afgesloten. De evenwichtssituatie is dan echter nog niet bereikt aangezien de concentraties op dat moment nog stijgen. De concentratie in evenwicht moet daarom worden geëxtrapoleerd uit het verloop tot het moment dat de gastoevoer sluit.

Voorbeeld van het extrapoleren, a.d.h.v. Figuur 12:

- Meterkast: De concentratie in de meterkast bereikt zeker 50% LEL maar de profielen zullen 100% LEL waarschijnlijk niet bereiken als het gas blijft uitstromen → lichtpaarse arcering in Tabel 5.
- Hal/kamer: de eindconcentratie blijft lager dan 50% LEL → geen arcering (wit) in Tabel 6.

4.5 Meetdata

De meetgrafieken zijn integraal opgenomen in Bijlage V. Dezelfde grafieken staan bovendien schematisch gerangschikt in de Bijlagen III (meterkast) en IV (hal en kamer). Deze weergave maakt het eenvoudiger de figuren onderling te vergelijken.

In de volgende hoofdstukken worden zoals eerder vermeld de grafieken besproken die ten grondslag liggen aan Tabel 5 en Tabel 6. De meetresultaten in de meterkast worden behandeld in hoofdstuk 5 en de resultaten buiten de meterkast in hoofdstuk 6.

5 Sectie 1: Metingen in de meterkast

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten in de meterkast besproken. Deze metingen zijn uitgevoerd onder omstandigheden waarbij de container als geheel geen ventilatievoorzieningen heeft: de ventilatiesleuven zijn afgesloten en er wordt geen toe- of afvoerventilator gebruikt. Ondanks dat vindt er wel enige niet-opzettelijke ventilatie van de container plaats via naden en kieren. Doordat er weinig verse lucht in de container komt is dit echter wel te beschouwen als de “worst case” situatie voor de meterkast.

De metingen in de meterkast zijn uitgevoerd in drie varianten:

- met afgesloten roosters van de meterkast (configuratie 1),
- met open roosters en met gesloten tussendeur (configuratie 3), en
- met open roosters en met open tussendeur (configuratie 4).

Let wel: Tegelijk met de metingen in de meterkast is ook de concentratie *buiten* de meterkast gemeten in de hal en kamer. Deze resultaten worden in hoofdstuk 6 besproken.

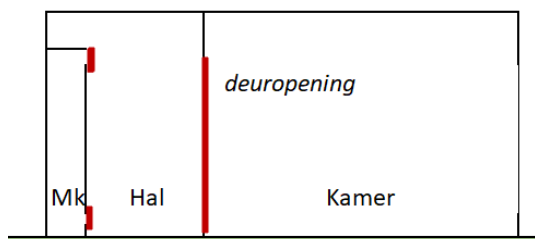
De meetgrafieken staan in Bijlage III in een matrix met van links naar rechts de verschillende configuraties en van boven naar beneden de oplopende gasuitstromen (50, 100 en 300 dm³/h) waarbij is gemeten. Dezelfde grafieken staan tevens in Bijlage V in groter formaat.

In de volgende paragrafen worden de resultaten besproken. Hierbij komt ook aan de orde of 50% LEL is bereikt (dat is de concentratie waarbij de gasuitstroom wordt gestopt) en wordt op basis van extrapolatie een inschatting gedaan of 100% LEL na verloop van tijd wordt bereikt.

Bij onderstaande bespreking zijn enkele meetgrafieken uit de bijlagen tussen de teksten overgenomen om al te veel heen en weer bladeren te voorkomen.

5.1 Gesloten ventilatieroosters in de meterkast (configuratie 1)

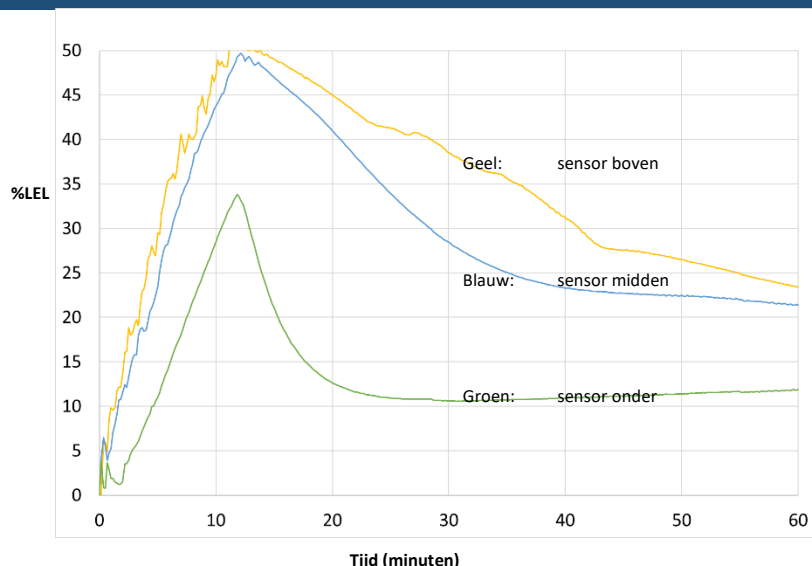
Bij dit experiment zijn de ventilatieroosters in de meterkastdeur (zie ook Figuur 10) afgeplakt. Dit is in strijd met de ventilatie-eisen in meterkastnorm NEN 2768+A1. Wel kan er langs kieren van de meterkastdeur een kleine hoeveelheid lucht uit de hal in en uit de meterkast stromen. Tijdens het experiment is de deur tussen de hal en kamer gesloten.



Figuur 13: Configuratie 1 (zijaanzicht)

Waterstof

Figuur 14 toont het verloop van de waterstofconcentratie voor de sensoren in de meterkast.



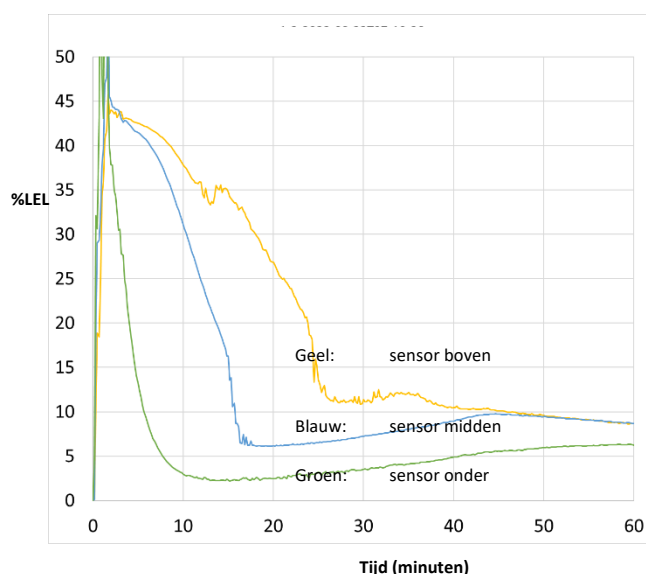
Figuur 14: Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren. Na ongeveer 12 minuten wordt de toevoer afgesloten (50 dm³/h).

Na het openen van de waterstoftoevoer (50 dm³/h) neemt de waterstofconcentratie in de meterkast snel toe, zie Figuur 14. De concentratie bereikt na 12 minuten een waarde van 50% LEL, waarna de gastoevoer wordt beëindigd.

De stijgende delen van de grafieken (dat is tijdens de gastoevoer) verlopen min of meer lineair. Dit is logisch, want doordat er weinig lucht in de meterkast komt, wordt de concentratie hoofdzakelijk bepaald door het debiet van de gastoevoer.

Na het sluiten van de waterstoftoevoer daalt de concentratie in de meterkast door lucht die via kieren binnendringt. Uit extrapolatie volgt dat de concentratie na enige tijd zou oplopen tot > 100% LEL als de waterstoftoevoer niet afgebroken zou zijn. Tot welke waarde deze concentratie zou stijgen (de eindconcentratie) kan echter niet worden geëxtrapoleerd; daarvoor ligt de eindwaarde te ver buiten de gemeten reeks.

Het experiment is herhaald bij 100 en 300 dm³/h. In Figuur 15 staan de profielen van 300 dm³/h.



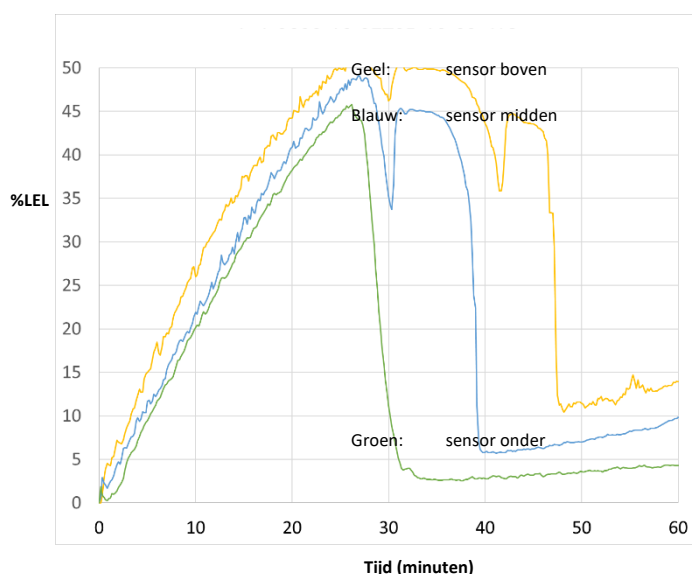
Figuur 15: Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren (300 dm³/h).

Zoals te verwachten geldt: hoe hoger de waterstoftoevoer, hoe sneller de stijging. Bij een lekdebiet van 300 dm³/h (vergelijkbaar met een boorgat van 1 mm in een leiding) is de concentratie binnen 2 minuten opgelopen tot 50% LEL. Binnen 5 minuten is een concentratie >100% LEL te verwachten als de waterstoftoevoer niet wordt gestopt.

Bij gesloten roosters in de meterkast zal de waterstofconcentratie dus oplopen tot > 100% LEL bij een gasuitstroom van 50 dm³/h (vergelijkbaar met een lekke schroefdraadverbinding) en hoger. Hoe hoger de uitstroom, hoe sneller de toename. De eindconcentratie is op basis van deze metingen niet te bepalen.

Aardgas

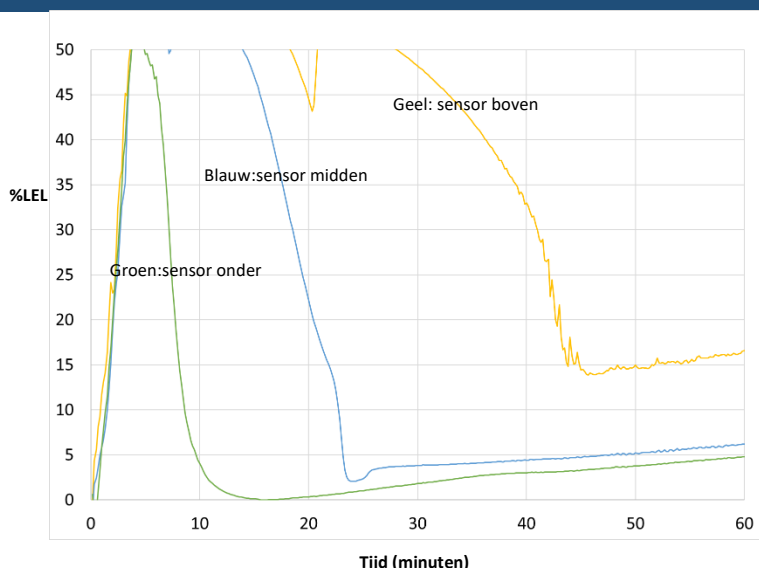
Na het openen van de aardgastoevoer (50 dm³/h) bereikt de concentratie in de meterkast na 25 minuten 50% LEL. In afwijking van waterstof lopen de profielen niet geheel lineair maar buigen ze na circa 12 minuten enigszins af richting de horizontaal. Zie Figuur 16.



Figuur 16: Gemeten concentratieprofielen van aardgas waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren. (50 dm³/h).

Vanwege deze afbuiging richting de horizontaal zijn de profielen moeilijker te extrapoleren dan bij waterstof (Figuur 14). Echter waarschijnlijk wordt ook hier na verloop van tijd 100% LEL bereikt. De eindconcentratie is niet te bepalen. Na het sluiten van de waterstoftoevoer daalt de concentratie in de meterkast door binnendringende lucht via naden en kieren.

Ook dit experiment is herhaald bij 100 en 300 dm³/h. Zie Figuur 18 voor de profielen van 300 dm³/h.



Figuur 17: Gemeten concentratieprofielen van aardgas waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren. (300 dm³/h)

Ook hier geldt: hoe hoger de aardgastoevoer, hoe sneller de stijging. Bij een gastoevoer van 300 dm³/h is binnen 10 minuten een concentratie >100% LEL te verwachten.

Waterstof versus aardgas

Voor alle metingen geldt dat 50% LEL en waarschijnlijk ook 100% LEL bij waterstof sneller wordt bereikt dan bij aardgas bij dezelfde gastoevoer. Dit betekent overigens niet dat het risico bij waterstof hoger is, zie paragraaf 4.3.

Voor een belangrijk deel komt de (ogenschijnlijk) snellere toename van waterstof doordat LEL van waterstof lager is dan van aardgas (4,0% respectievelijk 5,8%). Met andere woorden:

- 1% vol waterstof is 25% LEL, maar
- 1% vol aardgas is 17% LEL.

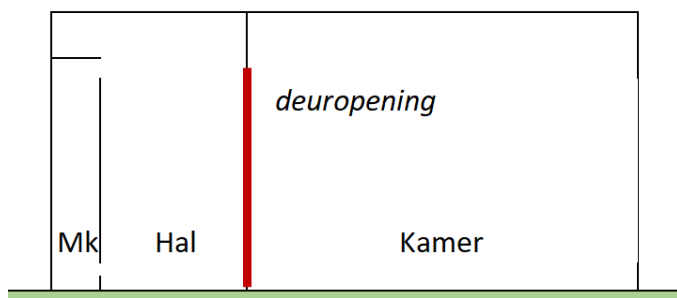
Een tweede oorzaak voor een snellere toename van de profielen van waterstof is dat waterstof zich door de lagere dichtheid meer ophoopt bovenin de meterkast dan aardgas, en dus minder mengt met lucht; in elk geval bij lage gasuitstroom: in Figuur 14 (waterstof) verloopt het onderste profiel (onderste sensor) aanzienlijk lager dan de hoger gelegen profielen; in Figuur 16 (aardgas) gaan de profielen gelijkop.

Bij hogere gasuitstromen (300 dm³/h) houden de sensoren onderling wel gelijke tred, zowel bij de uitstroom van waterstof als bij aardgas.

5.2 Effect ventilatieroosters in de meterkast (configuratie 3)

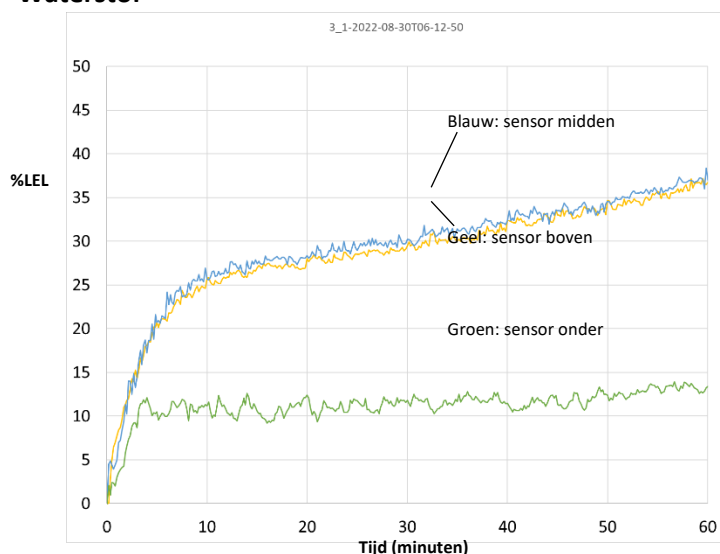
De deur tussen de hal en kamer is gesloten. De ventilatieroosters in de meterkastdeur zijn open.

OPMERKING: De roosters van de meterkast zijn, behalve bij configuratie 1, bij alle metingen geopend. Dit wordt hierna niet meer bij elk experiment afzonderlijk vermeld.



Figuur 18: Configuratie 3

Waterstof



Figuur 19: Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de tussendeur gesloten was (50 dm³/h);

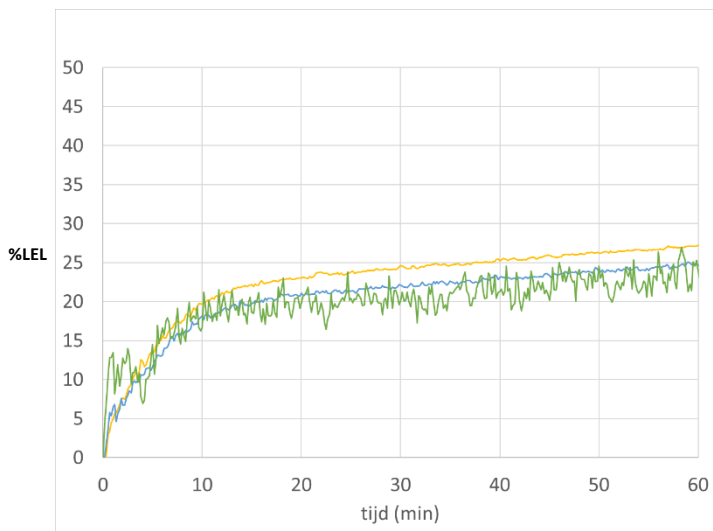
Na een snelle toename tot 20% LEL in de eerste 4 minuten boven en midden in de meterkast buigen de profielen af: het gas wordt verdund door luchttoevoer vanuit de hal. De concentratie onderin de meterkast stijgt het eerste uur licht van circa 11% LEL na 5 minuten tot 13% LEL na 60 minuten. Er lijkt een constante toevoer van lucht uit de hal richting de onderste sensor te zijn.

De eindconcentratie in de meterkast komt waarschijnlijk niet boven 100% LEL. Bij vergelijking met de situatie met gesloten meterkastroosters (Figuur 14) blijkt dat geopende roosters een groot effect hebben op het verlagen van de waterstofconcentratie aangezien de concentratie nu onder 100% LEL blijft.

Ook bij een uitstroom van 100 dm³/h is de invloed van ventilatieroosters in de meterkast goed waarneembaar (Bijlage IV). De profielen buigen af naar de horizontaal. De eindconcentratie is hier moeilijk in te schatten; waarschijnlijk wordt uiteindelijk een concentratie van 100% LEL wel bereikt.

Bij een uitstroom van 300 dm³/h buigen de profielen nauwelijks af. De grafieken verlopen wat minder steil dan bij afgeplakte meterkastroosters maar het effect van de roosters is klein. De ventilatie is veel te laag om het toegevoerde gasdebiet af te voeren.

Aardgas



Figuur 20: Gemeten concentratieprofielen van aardgas waarbij de tussendeur gesloten was (50 dm³/h)

Bij aardgasuitstroom van 50 dm³/h vertonen de sensoren onder, midden en boven onderling vrijwel hetzelfde profiel. Dit is een duidelijk verschil met de concentratieopbouw bij waterstof (Figuur 19) waar het onderste profiel sterkt afwijkt van de andere twee. Net als bij waterstofuitstroom 50 dm³/h wordt de 100% LEL van aardgas niet bereikt.

Bij aardgasuitstromen van 100 en 300 dm³/h vlakt het concentratieprofiel in de meterkast eerder af dan bij waterstof maar uiteindelijk wordt 100% LEL waarschijnlijk wel bereikt.

Resumé waterstof versus aardgas

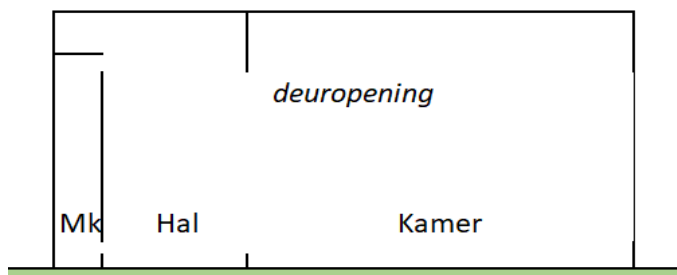
Voor zowel waterstof als aardgas geldt:

- De aanwezigheid van roosters in de meterkast, uitgevoerd volgens NEN 2768 + A1 is een effectieve maatregel om de gasconcentratie in de meterkast te verlagen.
- Bij een uitstroom van 50 dm³/h wordt de eindconcentratie bij geen van de drie sensoren hoger dan 100% LEL.
- Bij een uitstroom van 100 dm³/h of 300 dm³/h bedraagt de eindconcentratie waarschijnlijk meer dan 100% LEL als de hal niet geventileerd wordt.

Bij een uitstroom van 50 en 100 dm³/h waterstof verloopt het onderste profiel (onderste sensor) aanzienlijk lager dan de hoger gelegen profielen; bij aardgas gaan de profielen meer gelijkop. Bij een uitstroom van 300 dm³/h vertonen de profielen onder, midden en bovenin onderling ongeveer hetzelfde verloop bij zowel waterstof als aardgas.

5.3 Effect open tussendeur (configuratie 4)

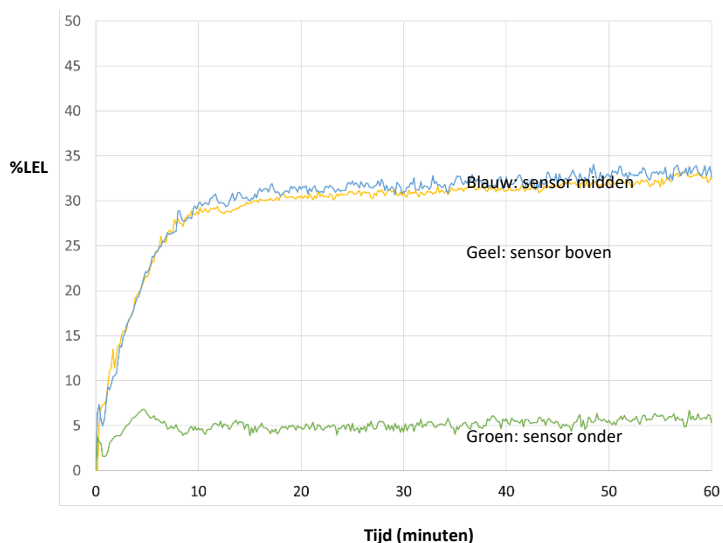
Bij dit experiment is de deur tussen de hal en kamer geopend.



Figuur 21: Configuratie 4

Waterstof

Zie Figuur 22 voor een uitstroom van 50 dm³/h.

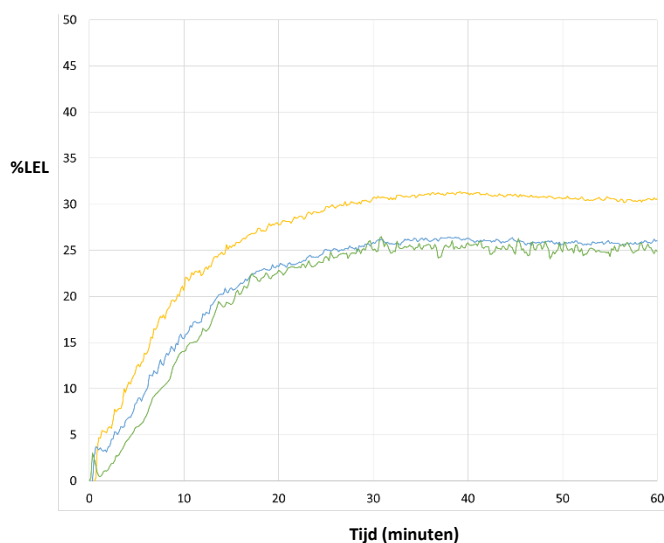


Figuur 22 Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de tussendeur open was (50 dm³/h)

Er is nu meer lucht beschikbaar voor de ventilatie van de meterkast dan bij een gesloten tussendeur. In vergelijking met een gesloten tussendeur (Figuur 19) wordt de concentratie onderin 5% LEL in plaats van 10% LEL en bovenin 33% LEL in plaats van 37% LEL. Het effect op de maximale concentratie (bovenin de meterkast) is dus beperkt.

De eindconcentratie blijft <100% LEL bij elke sensor. Bij een uitstroom van 100 en 300 dm³/h ontstaat een vergelijkbare concentratieopbouw als bij gesloten tussendeur (zie Bijlage III).

Aardgas



Figuur 23 Gemeten concentratieprofielen van aardgas waarbij de tussendeur gesloten was (50 dm³/h).

De drie sensoren volgen globaal hetzelfde profiel. Dat betekent dat bij uitstroom van aardgas het gas sterker met lucht gemengd is dan bij waterstof het geval is. De eindconcentratie blijft onder 100% LEL. Bij 100 en 300 dm³/h ligt de eindconcentratie boven LEL.

Resumé waterstof versus aardgas

Bij geopende tussendeur loopt de concentratie in de meterkast enkele procenten lager op dan bij een gesloten tussendeur (configuratie 3; paragraaf 5.2) als de rest van de container niet geventileerd wordt.

6 Sectie 2: Metingen buiten de meterkast

De metingen buiten de meterkast zijn als volgt onder te verdelen:

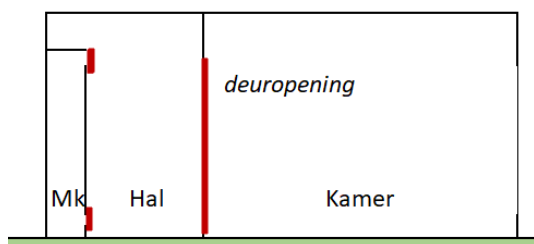
- Geen ventilatie van de container. Dit zijn dezelfde experimenten als die van hoofdstuk 5 maar nu worden niet de meetresultaten in de meterkast besproken maar in de hal en kamer (configuratie 1, 3 en 4).
- Ventilatie met ventilatieopening in de zijwand van de container (configuratie 7).
- Ventilatie met geforceerde toevoer van buitenlucht (configuratie 7/0.5 en 7/1.0).
- Ventilatie met geforceerde afvoer van lucht uit de container (configuratie 8/0.5 en 8/1.0).

N.B. Bij de metingen bij de laatste drie bullets is de concentratie in de meterkast niet gemeten.

De meetgrafieken staan in Bijlage IV in een matrix en tevens in Bijlage V in groter formaat.

6.1 Gesloten roosters in de meterkast (configuratie 1)

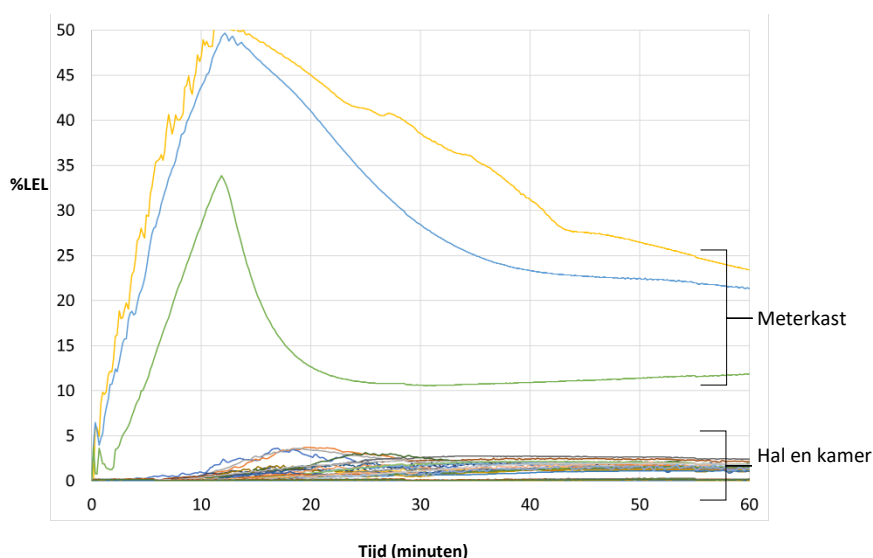
De ventilatieroosters in de meterkastdeur zijn afgeplakt. Wel kan er langs kieren van de meterkastdeur een kleine hoeveelheid lucht uit de hal in en uit de meterkast stromen. De deur tussen hal en kamer is gesloten.



Figuur 24: Configuratie 1 (zijaanzicht)

Waterstof en aardgas

De gasuitstroom duurt bij deze experimenten kort want de concentratie in de meterkast gaat snel naar 50% LEL. Zie bijvoorbeeld de profielen van hal en kamer bij 50 dm³/h (Figuur 27).

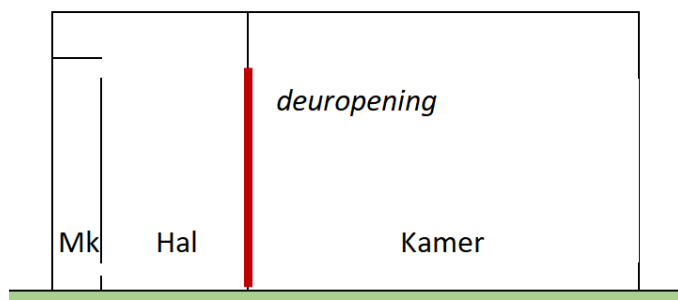


Figuur 25: Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de ventilatieroosters in de meterkastdeur gesloten waren. Na ongeveer 12 minuten wordt de toevoer afgesloten (50 dm³/h).

Tijdens deze korte tijd is de concentratie gas in de hal en kamer laag; het gas bevindt zich hoofdzakelijk in de meterkast. Gezien de korte uitstroomtijd en de lage concentraties buiten de meterkast kan er geen uitspraak gedaan worden over de profielen in hal en kamer na langere tijd.

6.2 Effect open roosters in de meterkast (configuratie 3)

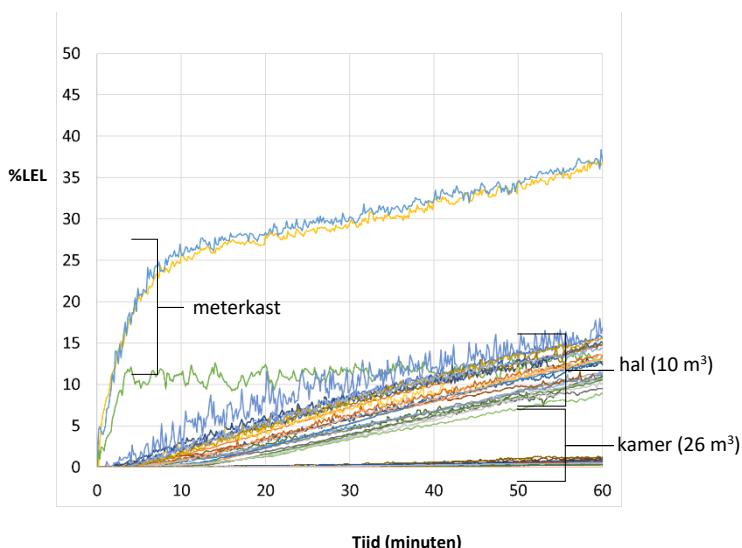
De deur tussen de hal en kamer is gesloten. De ventilatieroosters in de meterkastdeur zijn open.



Figuur 26: Configuratie 3

Waterstof

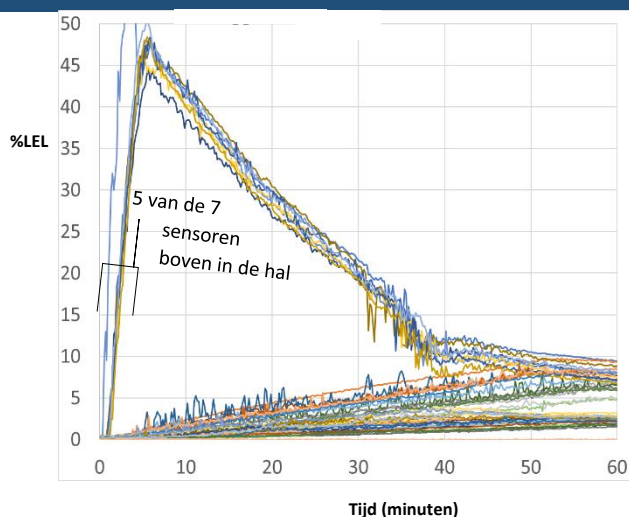
Zie Figuur 27 voor een uitstroom van 50 dm³/h.



Figuur 27: Gemeten concentratieprofielen van waterstof waarbij de tussendeur gesloten was (50 dm³/h);

De waterstofconcentratie in de hal stijgt sneller dan bij afgesloten meterkastroosters (Figuur 25), doordat het gas nu eenvoudiger via de roosters naar de hal kan stromen. Na 60 minuten is de maximale concentratie in de hal circa 17% LEL. De gesloten tussendeur kan niet geheel verhinderen dat het gas van de hal naar de kamer stroomt maar de concentratie in de kamer is wel aanzienlijk lager dan in de hal, namelijk ten hoogste 2% LEL.

De meting is, naast de experimenten bij 50, 100 en 300 dm³/h ook uitgevoerd bij 1000 dm³/h. Bij dit debiet zijn de sensoren in de meterkast losgekoppeld omdat de gasuitstroom anders zeer snel zou stoppen. De meterkastsensoren zouden namelijk vrijwel direct 50% LEL meten en de gastoevoer afsluiten. Evengoed duurde de gasuitstroom maar 3 minuten. Zie Figuur 28.

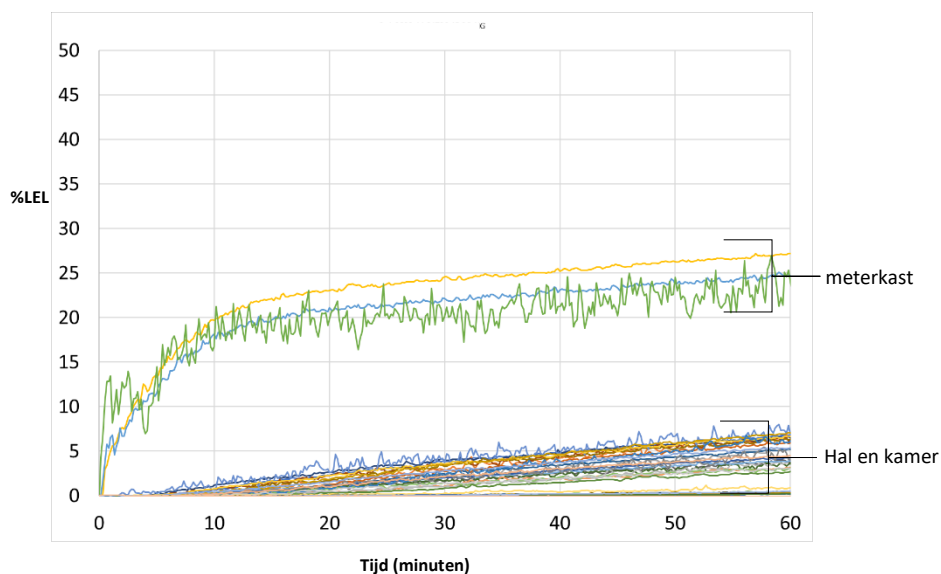


Figuur 28: Gemeten concentratieprofielen van waterstof (hal + kamer) waarbij de tussendeur gesloten was (1000 dm³/h);

Vijf profielen stijgen snel en vrijwel lineair. Dit betreft vijf sensoren bovenin de hal. Na 3 minuten meet één van de sensoren 50% LEL en stopt de gasuitstroom. Zou dat niet gebeuren dan zou in korte tijd ook 100% LEL bereikt zijn.

Aardgas

Ook bij aardgas stijgt de concentratie in de hal sneller bij open dan bij afgesloten meterkastroosters. Voor een uitstroom van 50 dm³/h, zie Figuur 29:

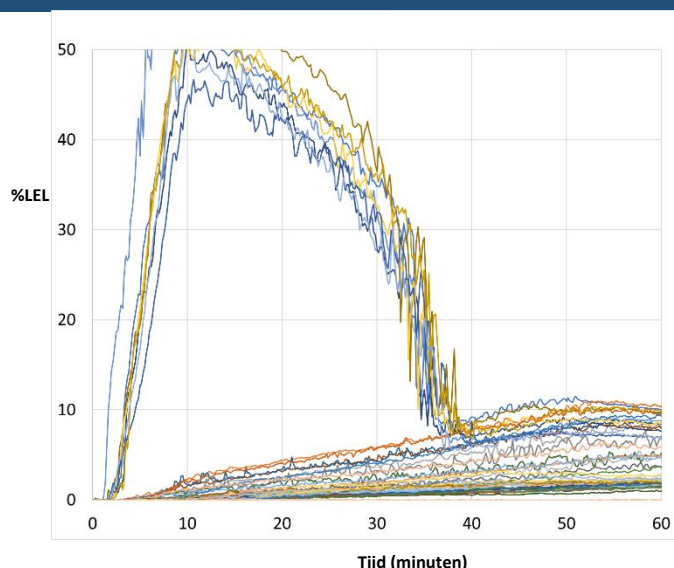


Figuur 29: Gemeten concentratieprofielen van aardgas waarbij de tussendeur gesloten was (50 dm³/h);

Bij dit gasdebiet wordt de maximale concentratie in de hal circa 7% LEL na 60 minuten. Dat is aanzienlijk lager dan de 17% LEL gemeten bij waterstof (Figuur 27). Dit wordt veroorzaakt doordat de onderste ontstekingsgrens LEL van waterstof 30 procentpunten lager is dan bij aardgas (zoals besproken in 5.1) en doordat aardgas sterker mengt met de lucht waardoor de uitschieters minder hoog zijn.

De gesloten tussendeur kan niet geheel verhinderen dat het aardgas naar de kamer stroomt maar de concentratie in de kamer is wel aanzienlijk lager dan in de hal, namelijk ten hoogste 1% LEL.

In Figuur 30 is staan de profielen van aardgas (hal en kamer) bij 1000 dm³/h.



Figuur 30: Gemeten concentratieprofielen van aardgas (alleen hal + kamer) waarbij de tussendeur gesloten was (1000 dm³/h);

Tien profielen stijgen snel en vrijwel lineair. Dit betreft acht sensoren bovenin de hal en twee in het midden. Na ruim 6 minuten meet één van de sensoren 50% LEL en de gasuitstroom stopt. Zou dat niet gebeuren dan zou in korte tijd ook 100% LEL bereikt zijn.

Evenals bij lagere uitstroom blijkt aardgas sterker te mengen dan waterstof: bij waterstof behoren de snelst stijgende profielen alleen bij sensoren bij het plafond; bij aardgas zijn het ook sensoren in het midden tussen vloer en plafond.

Resumé: waterstof versus aardgas

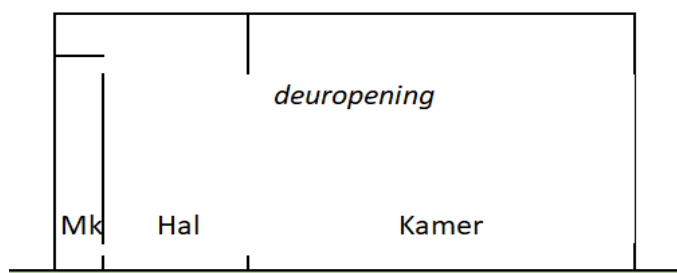
Door het openen van de meterkastroosters blijft er minder gas in de meterkast (zoals gezien in paragraaf 5.2) en neemt de concentratie in de hal logischerwijs sneller toe. Dit geldt voor zowel voor waterstof als voor aardgas.

Voor beide gassen geldt ook dat de tussendeur een significante barrière vormt voor het gasluchtmengsel uit de hal om zich naar de kamer te verspreiden.

Bij een zelfde uitstroomdebiet zal waterstof plaatselijk sneller een concentratie van 100% LEL bereiken dan aardgas. Dat komt doordat LEL van waterstof lager ligt, en doordat aardgas sterker mengt met lucht dan waterstof.

6.3 Effect open tussendeur (configuratie 4)

Bij dit experiment is de deur tussen de hal en kamer geopend.

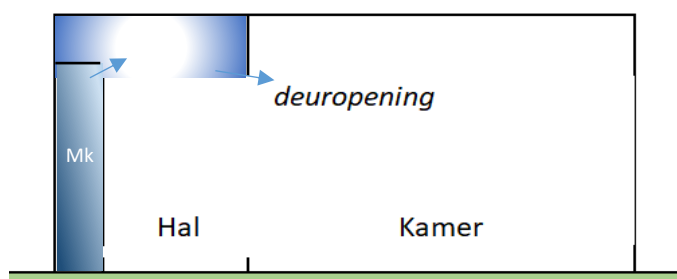


Figuur 31: Configuratie 4

Waterstof versus aardgas

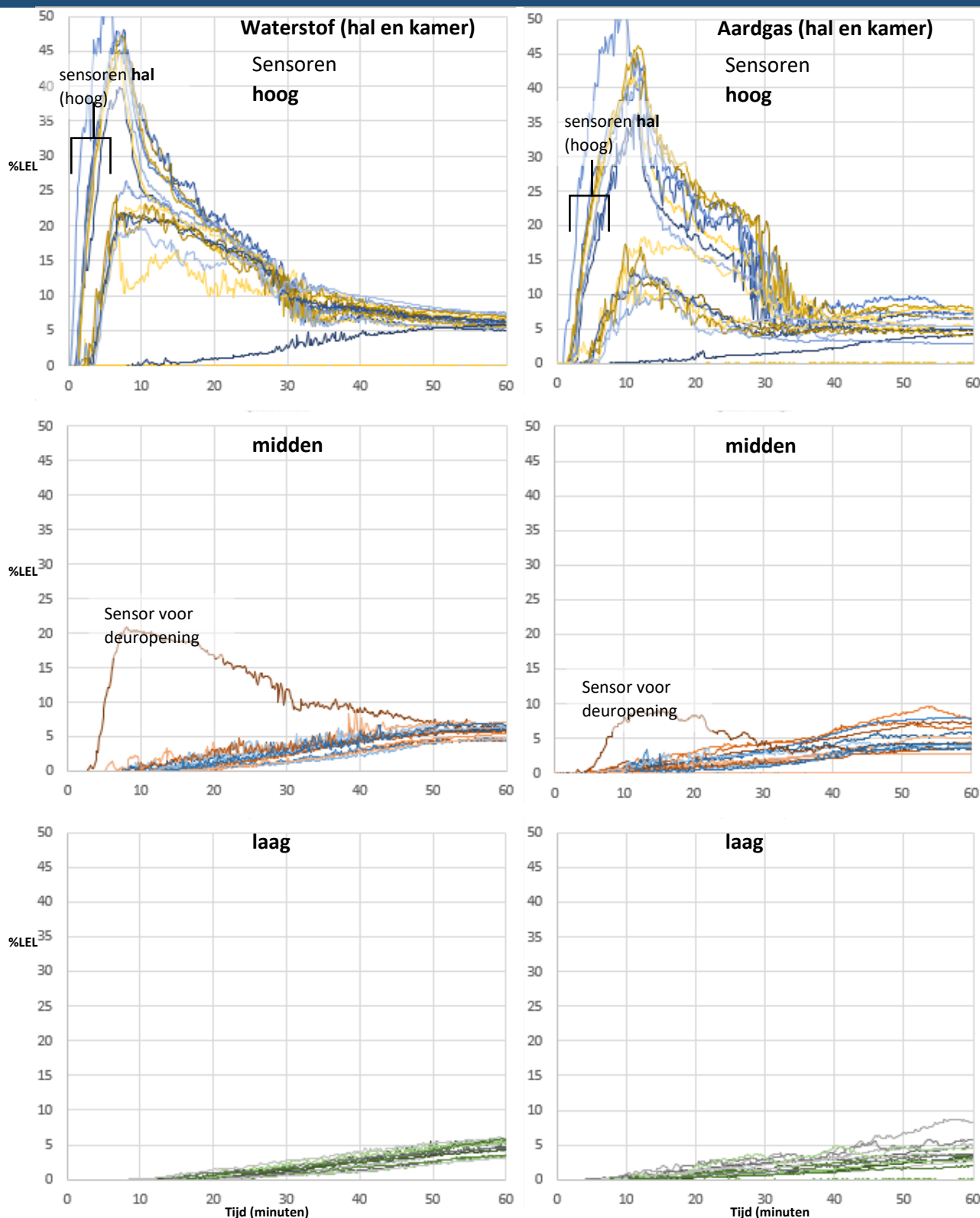
Door het openen van de tussendeur stroomt het gas (zowel waterstof als aardgas) eenvoudiger van de hal naar de kamer. Dat is het duidelijkst te zien in de metingen bij 1000 dm³/h. Zie Figuur 33, met links de profielen van waterstof en rechts de profielen van aardgas. Bij beide gassen zijn de profielen hoog, midden en laag in de container in afzonderlijke figuren weergegeven.

Te zien is dat het gas zich in de ruimte opbouwt van boven naar beneden want de sensoren bovenin meten de sterkste stijging. Bij de bovenste laag is bovendien duidelijk het verschil te zien tussen sensoren in de hal en in de kamer. Dit komt doordat de deuropening niet doorloopt tot aan het plafond: doordat het gas in de hal zich opbouwt van boven naar beneden (Figuur 32) duurt het enige tijd voordat het gas via de deuropening naar de kamer kan stromen.



Figuur 32: De ruimte vult zich van boven naar onder met gas (schematische weergave)

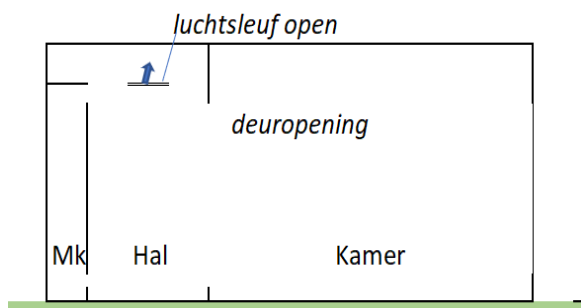
De grafieken van de sensoren in het midden (Figuur 33, midden) hebben allebei één afwijkend profiel, dat hoger ligt dan de rest. De betreffende sensor bevindt zich voor de deuropening op de plaats waar het gas van de hal naar de kamer stroomt.



Figuur 33:: Gemeten concentratieprofielen van waterstof en aardgas (alleen hal + kamer) waarbij de tussendeur open was (1000 dm³/h).

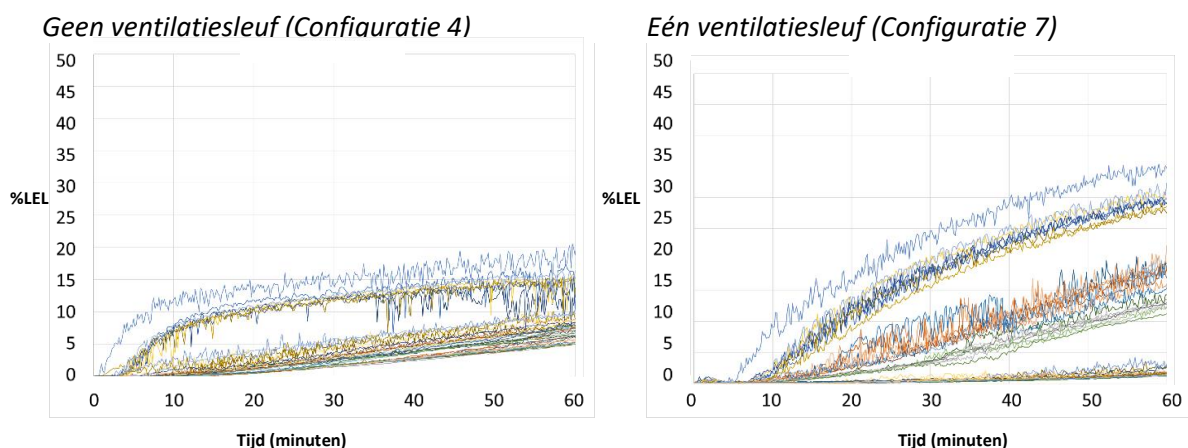
6.4 Effect van natuurlijke ventilatie in de container (configuratie 7)

Om het effect van de ventilatie in de container op het concentratieverloop te bestuderen is een ventilatieopening aan de zijkant van de container geopend (sleuf met 9 gaatjes). De gebruikte ventilatieopening bevindt zich -gezien vanaf de toegangsdeur- linksboven, het achterste rooster (dus in de hal).



Figuur 34: Configuratie 7

In de concentratieprofielen is te zien dat de onderlinge verschillen van plaats tot plaats groter werden door het aanbrengen van een ventilatiesleuf. Zie hiervoor de verschillende profielen van configuratie 4 versus configuratie 7 (Bijlage IV) en het voorbeeld in Figuur 35.



Figuur 35: Concentratieverloop waterstof gedurende een uur, (waterstof, 100 dm³/h). Schaal Y-as: 50% LEL

De lage profielen in de rechter figuur zijn de profielen van de kamer, de hoge profielen zijn de profielen van de hal. De profielen bij configuratie 7 liggen gemiddeld iets hoger dan configuratie 4. Het lijkt er dus op dat er na het aanbrengen van ventilatie niet *meer* wordt geventileerd, maar juist *minder*.

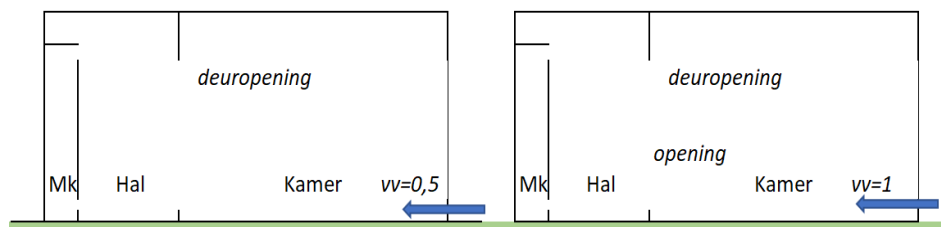
Wellicht worden de verschillen veroorzaakt door de gelaagdheid van waterstofgas. Bij *afwezigheid* van ventilatie is er weinig luchtstroming. Er vormt zich een laag met een hoge concentratie gas aan het plafond, boven het bereik van de hoogste sensoren (die deze hoge concentratie dus niet waarnemen). Door de lage dichtheid heeft het waterstof een sterke opwaartse druk waardoor een deel van het gas “ontsnapt” via naden in het dak zonder opgemerkt te worden door de sensoren. Bij *aanwezigheid* van een ventilatiesleuf komt de bovenste gaslaag meer in beweging zodat het zich beter mengt met lucht, en zodat het niet meer in hoge concentraties weg kan lekken. De sensoren registreren dit gas nu ook doordat het lager komt.

In dit scenario zou dit betekenen dat het gas minder snel wordt afgevoerd bij de aanwezigheid van een ventilatiesleuf.

Bij aardgas is de ventilatie met ventilatiesleuf wel hoger dan zonder ventilatiesleuf. Dit komt mogelijk doordat er bij aardgas minder gelaagdheid optreedt.

6.5 Effect van geforceerde toevoer van ventilatie in de container (configuratie 7/0.5 en 7/1.0)

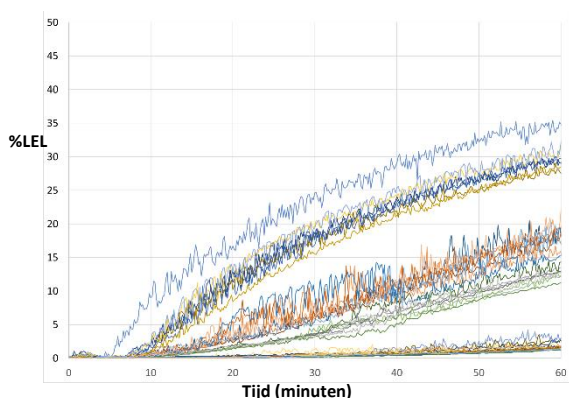
Bij natuurlijke ventilatie is het ventilatievoud/ventilatiedebit moeilijk in te stellen. Om meer invloed op het ventilatievoud te krijgen werd bij de experimenten bij configuratie 7/0.5 en 7/1.0 een vast ingesteld luchtdebit in de container ingeblazen. In plaats van de natuurlijke luchttoevoer langs de onderkant van de deur werd lucht ingeblazen via een sleufvormige luchttoevoer. Er werd lucht ingeblazen met debieten van 18 m³/h en 36 m³/h. Als er verder geen andere buitenlucht binnenkomt leidt dat tot ventilatievouden van respectievelijk 0,5/h en 1,0/h.



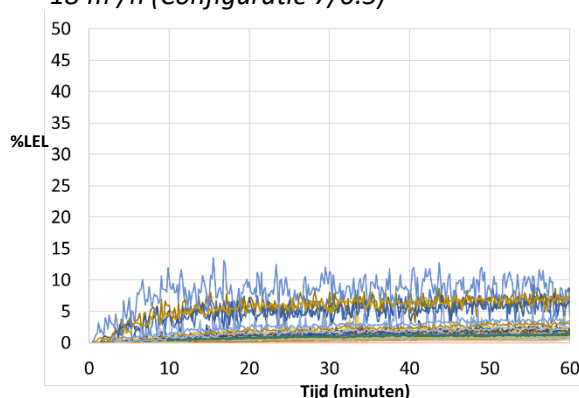
Figuur 36: Configuratie 7/0.5 en 7/1.0

In Bijlage IV is te zien dat de concentratieprofielen bij ingeblazen lucht veel minder van elkaar verschillen dan bij één ventilatiesleuf. Vergelijk bijvoorbeeld in Figuur 37 de profielen met één ventilatiesleuf (links) met de profielen zonder ventilatiesleuf en met toevoer van 18 m³/h (rechts), bij waterstof:

Eén ventilatiesleuf open (Configuratie 7)



Geen ventilatiesleuf open, luchttoevoer 18 m³/h (Configuratie 7/0.5)

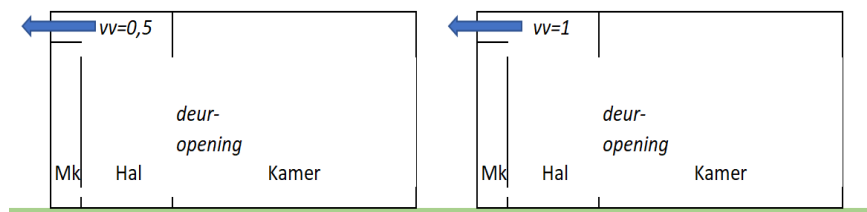


Figuur 37: Concentratieverloop waterstof gedurende een uur, (waterstof, 100 dm³/h). Schaal Y-as: 50% LEL

De geforceerde ventilatie zorgt ervoor dat de profielen van waterstof dichter bij elkaar liggen en veel lager. Bij aardgas is hetzelfde verschijnsel te zien. Het laag inblazen van lucht leidt dus tot een veel lagere gasconcentratie dan bij natuurlijke ventilatie.

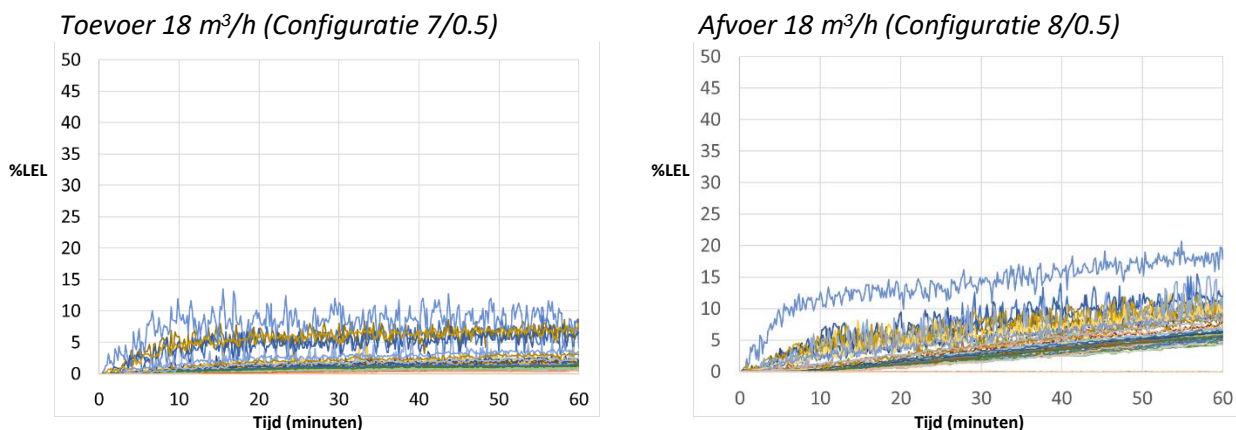
6.6 Effect van geforceerde afvoer van ventilatie in de container (configuratie 8/0.5 en 8/1.0)

Een tweede manier om het ventilatievoud te beïnvloeden (naast de geforceerde toevoer van lucht zoals in paragraaf 6.5) is een geforceerde *afvoer* van lucht. Via een van de ventilatiesleuven werd lucht afgezogen met een afzuigdebiet van 18 m³/h en 36 m³/h (ventilatievoud 0,5 respectievelijk 1,0). Zie bladzijde 18 voor de technische details.

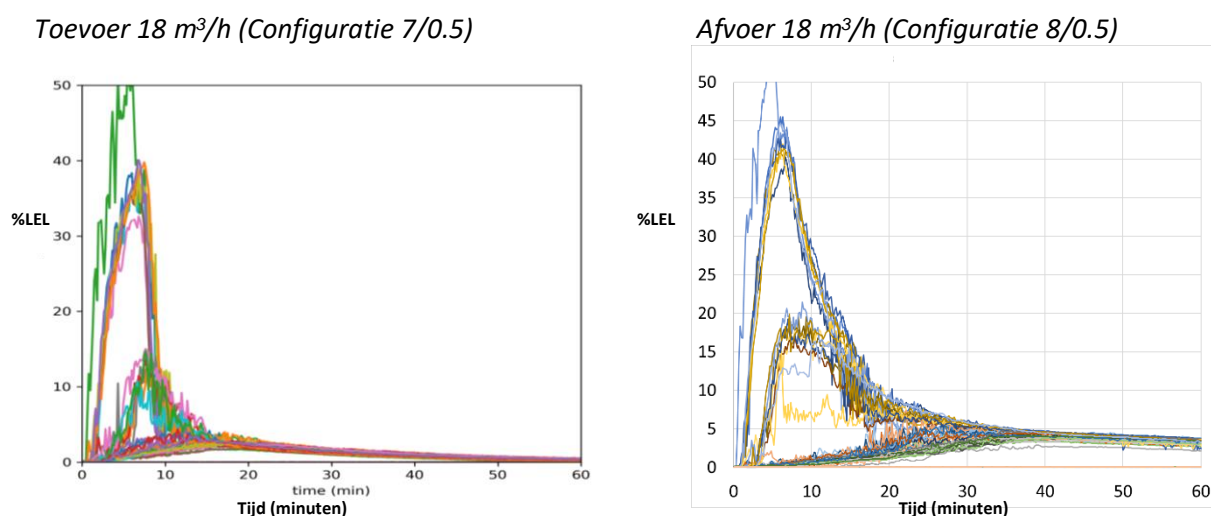


In Bijlage IV zijn de profielen weergegeven bij een gasuitstroom van 1000 dm³/h, zowel bij waterstof als bij aardgas.

In Figuur 38 en Figuur 39 zijn de luchtinblaas en luchtafzuiging naast elkaar gezet:



Figuur 38 Concentratieverloop waterstof gedurende een uur, (waterstof, 100 dm³/h).



Figuur 39: Concentratieverloop waterstof gedurende een uur, (waterstof, 1000 dm³/h).

In de figuren is te zien dat de onderlinge verschillen binnen de container groter zijn bij luchtafzuiging dan bij het inblazen van lucht. Bij het inblazen (links) is er ook een aantal sensoren dat 0% LEL meet.

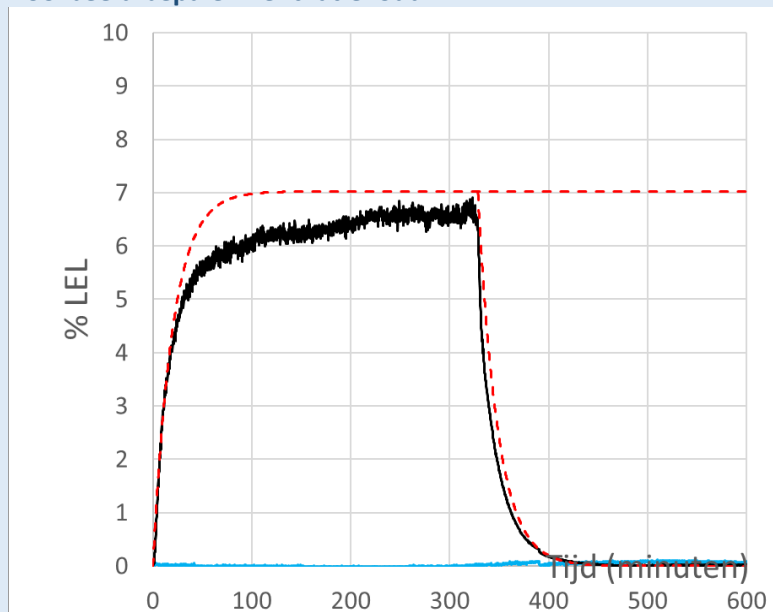
Dit zou erop kunnen wijzen dat bij afzuiging de gelaagdheid binnen de container minder wordt beïnvloed dan bij het inblazen van lucht.

7 Bepaling van het ventilatievoud op basis van de gemeten concentratieprofielen

7.1 Algemeen

Bij een aantal experimenten is achteraf het ventilatievoud berekend op basis van de gemiddelde gasconcentratie. De resultaten staan in Bijlage VI en in Tabel 7. De methode en de theoretische achtergrond staan in Bijlage II. Een korte uitleg met een voorbeeld staat in het blauwe kader.

Voorbeeld bepalen ventilatievoud



Figuur 40: Configuratie 7/0.5, waterstof, 300 dm³/h luchttoevoer 18 m³/h.

Zwart: gemiddelde gemeten concentratie. Rood: gefitte theoretische profielen bij een ventilatievoud $R=3,0$.

De zwarte curve is de gemiddelde concentratie in de container. Na circa 330 minuten stopt de gastoevoer en daalt de concentratie. De rode gestreepte profielen zijn de theoretische curven die in de figuur zijn passend gemaakt door het variëren van het ventilatievoud. De best passende curven werden gevonden bij een ventilatievoud van 3,0.

De theoretische curven gaan uit van een constante ventilatie en van homogene menging. In werkelijkheid echter:

- zal de ventilatie enigszins fluctueren (door de invloed van bijvoorbeeld de wind), en
- is het gas niet homogeen gemengd met lucht.

Dat verklaart dat de theoretische curve niet geheel samenvalt met de gemeten curve.

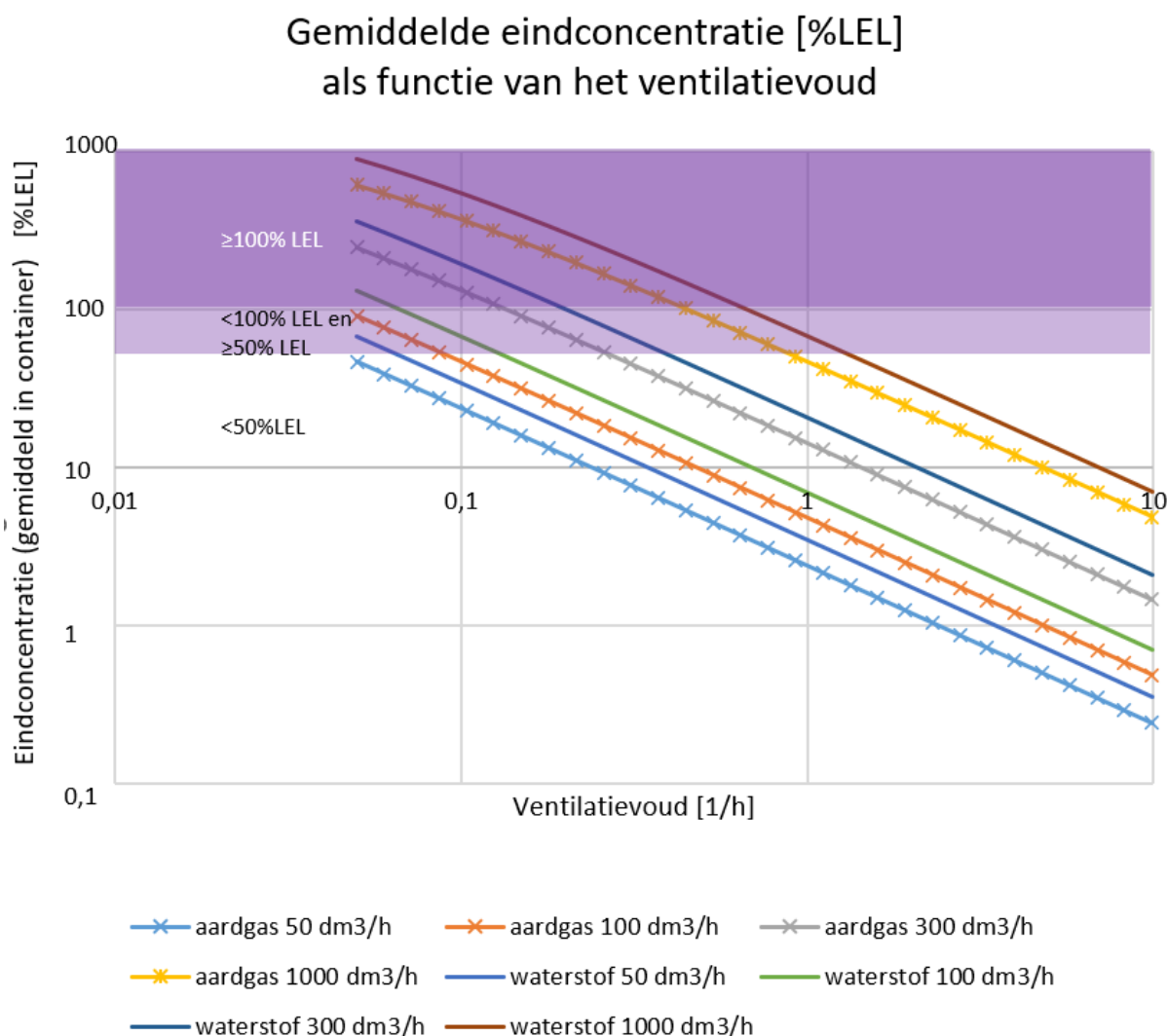
In dit voorbeeld lijkt het erop dat de stijgende theoretische curve lager gelegd moet worden, op circa 6,5% in plaats van 7% LEL. Dat betekent een iets hoger ventilatievoud van $R=3,0$. Echter dan wijkt de dalende curve weer sterk af van de gemeten curve.

Het ventilatievoud wordt dus gekozen bij de best passende curven; zowel de stijgende als de dalende. De gemiddelde eindconcentratie volgt dan uit het ventilatievoud in combinatie met de gasuitstroom, en de inhoud van de container (formule 2 in Bijlage II).

Tabel 7: Ventilatievoud en eindconcentratie, bepaald aan de hand van gemeten concentraties

Configuratie	Gassoort	Gastoevoer	Ventilatievoud	Gemiddelde eindconcentratie
		dm ³ /h	<i>Bepaald door passend maken van theoretische en gemeten curven (zie voorgaande blauwe kader)</i> 1/h	<i>Berekend uit ventilatievoud (zie voorgaande blauwe kader)</i> %LEL
3	waterstof	50	0,14	25
3	waterstof	100	0,40	17
3	waterstof	300	0,15	132
3	aardgas	50	0,20	12
3	aardgas	100	0,15	31
3	aardgas	300	0,15	91
3	aardgas	1000	0,15	269
4	waterstof	50	0,09	38
4	waterstof	100	0,25	27
4	waterstof	300	0,40	51
4	aardgas	50	0,40	6
4	aardgas	100	0,15	31
4	aardgas	300	0,08	163
4	aardgas	1000	0,10	375
7	waterstof	100	0,2	34
7	waterstof	300	0,2	100
7	aardgas	100	0,5	10
7	aardgas	300	0,2	69
7/0,5	waterstof	300	3,0	7
7/0,5	aardgas	300	4,0	4
7/1,0	waterstof	300	3,0	7
7/1,0	aardgas	300	4,8	3
8/0,5	waterstof	1000	0,6	111
8/0,5	aardgas	1000	0,5	91
8/1,0	waterstof	1000	1,7	40
8/1,0	aardgas	1000	1,0	47

De gemiddelde eindconcentratie uit Tabel 7 is berekend met Formule 2 (Bijlage II). Figuur 41 is een grafische weergave van de relatie: ventilatievoud – gemiddelde eindconcentratie.



Figuur 41: Eindconcentratie als functie van het ventilatievoud.

In de figuur zijn drie concentratiezones gemarkeerd met paars, roze en wit. Let wel dat dit slaat op de **gemiddelde** eindconcentratie in de gehele container. In hoofdstuk 4 wordt dezelfde indeling gehanteerd, echter daar slaat het op de maximale **plaatselijke** concentratie (dus ter plaatse van de sensor met de hoogste gasconcentratie).

7.2 Effect van natuurlijke ventilatie op het ventilatievoud.

In Tabel 8 staan de ventilatievouden van de situatie zonder ventilatie (configuratie 4) en met één ventilatiesleuf (configuratie 7) naast elkaar.

Tabel 8: De invloed van een ventilatiesleuf op het ventilatievoud.

Gassoort	Gasuit- stroom	Achteraf berekend ventilatievoud	
		Configuratie 4 Geen ventilatie	Configuratie 7 Met één ventilatiesleuf
	dm ³ /h	1/h	1/h
Waterstof	100	0,25	0,20
	300	0,40	0,20
Aardgas	100	0,15	0,50
	300	0,08	0,20

Net als in paragraaf 6.4 is te zien dat bij waterstof *minder* geventileerd wordt als de ventilatiesleuf wordt geopend. Mét ventilatiesleuf is namelijk tweemaal een ventilatievoud van 0,20/h vastgesteld, echter zonder ventilatiesleuf is het ventilatievoud *hoger*, namelijk 0,25/h en 0,40/h.

Om een verklaring te kunnen geven voor het verschil in ventilatievoud is met behulp van de beschikbare data het ventilatievoud *per sensor afzonderlijk* berekend. De resultaten van deze berekeningen laten een sterk variërend beeld zien. Daardoor kan er geen eenduidige verklaring gegeven worden voor de verschillen in ventilatievoud.

Bij aardgas is het ventilatievoud wel hoger met ventilatiesleuf dan zonder.

7.3 Effect van geforceerde toevoer van lucht op het ventilatievoud

In Tabel 8 staan staat het ingestelde en berekende ventilatievoud naast elkaar (configuratie 7/0.5 en 7/1.0), voor een gasuitstroom van 300 dm³/h.

Tabel 9: Ventilatievoud, bepaald op basis van toevoerdebiet en op basis van gemeten gasconcentraties.

Gassoort	Gasuit- stroom	Luchttoevoer	Ventilatievoud	
			Ingesteld met het luchttoevoerdebiet	Berekend op basis van gemeten gas- concentraties
	dm ³ /h	m ³ /h	1/h	1/h
Waterstof	300	18	0,5	3,0
	300	36	1,0	4,0
Aardgas	300	18	0,5	3,0
	300	36	1,0	4,8

Bij waterstof blijkt dat er veel sterker wordt geventileerd dan verwacht: Bij een ingesteld ventilatievoud van 0,5 is het berekende ventilatievoud 3,0. Bij een ingesteld ventilatievoud van 1,0 neemt het berekende ventilatievoud toe tot 4,0. Ook bij aardgas is het berekende ventilatievoud veel hoger dan verwacht: respectievelijk 3,0 en 4,8.

Omdat het berekende ventilatievoud zo veel hoger is dan het ingestelde ventilatievoud zijn er diverse controleberekeningen uitgevoerd. Met behulp van de beschikbare data is het ventilatievoud per sensor afzonderlijk berekend. De resultaten van deze berekeningen laten een sterk variërend beeld

zien. Daardoor kan er ook op basis van deze berekeningen geen eenduidige verklaring gegeven worden voor de verschillen in ventilatievoud.

Wel kan worden geconcludeerd dat het inblazen van lucht een effectieve manier van ventileren is om de gasconcentratie laag te houden.

7.4 Effect van geforceerde afvoer van lucht op het ventilatievoud

In Tabel 10 staan de ventilatievouden van (configuratie 8/0.5 en 8/1.0) en bij een gasuitstroom van 1000 dm³/h naast elkaar.

Tabel 10: Ventilatievoud, bepaald op basis van toevoerdebiet en op basis van gemeten gasconcentraties.

Gassoort	Gasuit- stroom	Luchttoevoer	Ventilatievoud	
			Ingesteld met het luchttoevoerdebiet	Berekend op basis van gemeten gas- concentraties
			1/h	1/h
Waterstof	1000	18	0,5	0,6
	1000	36	1,0	1,7
Aardgas	1000	18	0,5	0,5
	1000	36	1,0	1,0

Uit de tabel volgt dat de achteraf bepaalde ventilatievouden bij waterstof veel meer in de grootteorde liggen van het *afgezogen* ventilatievoud (configuratie 8/0.5 en 8/1.0) dan bij *luchttoevoer* (7/0.5 en 7/1.0)

Bij aardgas komen berekende en ingeblazen waarde geheel overeen.

8 Discussie van de resultaten van de experimenten

8.1 Algemeen

Uit HyDelta 1.0 is gebleken dat bij gasuitstromen tot 20 dm³/h geen hoge concentraties gevonden werden. Bij steeds grotere lekkages gaat dit vanzelfsprekend wel een keer gebeuren. Die grens lijkt in elk geval boven 50 dm³/h te liggen. Dat is aanzienlijk hoger dan de maximaal 1 dm³/h op één bepaalde plaats die voor aardgas acceptabel is.

In dit onderzoek is gezocht naar de grens waarbij de concentratie lager blijft dan LEL, als functie van de ventilatie. Zolang deze grens niet overschreden wordt is er sprake van een veilige situatie. Of er bij het overschrijden van de onderste brandbaarheidsgrens (LEL) ook direct sprake is van een onveilige situatie wordt door een aantal factoren bepaald. Een van deze factoren is de kans op ontsteking. Het rapport 'gedrag van waterstof bij lekkages in het gasdistributienet' [6] beschrijft dat waterstof in lucht tot ongeveer 8 – 10 vol % een lagere kans op ontsteken heeft dan aardgas in dezelfde concentratie en, als het toch ontsteekt, is het effect kleiner.

Ten aanzien van het niet overschrijden van de brandbaarheidsgrens (100% LEL) zijn er enkele kanttekeningen te plaatsen.

In de eerste plaats zal er nabij de lekbron altijd een gebied zijn waarin de gasconcentratie zich tussen de onderste en bovenste brandbaarheidsgrens (LEL en UEL) bevindt. Hoe groot dit gebied is en daarmee het potentiële effect bij ontsteking wordt bepaald door de hoeveelheid gasuitstroom.

Een tweede kanttekening betreft de uitvoering van de meterkast. De bovenkant van de meterkast bevindt zich circa 10 cm boven het bovenste ventilatierooster. Er zijn echter ook vele andersoortige ruimten waarin gasmeters hangen, al of niet gevuld met objecten die niet in een meterkast thuishoren (stofzuigers, voorraadplanken etc). Het gas gedraagt zich daarin mogelijk anders.

Een derde kanttekening ten slotte betreft de gasuitstroom. De onderzoeken zijn uitgevoerd met gasuitstromen tot 1000 dm³/h. De gasconcentraties bleven hierbij nog ver beneden de concentraties (8 – 10 vol %) waarbij de risico's van aardgas en waterstof gelijk zijn. Uit het onderzoek komt niet naar voren bij welke gasuitstroom deze concentratie daadwerkelijk bereikt wordt.

Ook blijkt er niet uit wat het daadwerkelijke effect is in deze proefopstelling indien een degelijk gasluchtmengsel ontsteekt.

8.2 Ventilatie van de meterkast volgens voorschriften is essentieel

In deze studie zijn zes uitstroomexperimenten uitgevoerd waarbij de ventilatieroosters van de meterkast waren afgeplakt bij 50, 100 en 300 dm³/h en waarbij de rest van de container niet werd geventileerd. De gasconcentratie stijgt vrijwel lineair met de tijd en bereikt in korte tijd 100% LEL. In het geval van aardgas mengt dit direct met lucht zodat de concentratie onder en bovenin vrijwel gelijk is, waterstof mengt echter minder waardoor de concentratie onderin de meterkast circa 30% lager dan bovenin. Ook bij dichte roosters blijft niet al het gas in de meterkast. Via kieren en naden ontsnapt er gas naar de hal. Op het moment dat de concentratie in de meterkast 50% LEL bedraagt is de concentratie in de hal 2 à 4% LEL (zowel bij aardgas als bij waterstof).

Zijn de ventilatieroosters van de meterkast geopend dan stijgt de gasconcentratie in de meterkast veel minder snel en minder hoog dan bij afgesloten ventilatieroosters. Bij een uitstroom van 50 dm³/h zal de concentratie in de meterkast 100% LEL niet bereiken. Dit geldt voor waterstof en aardgas. Zelfs bij een zeer gering ventilatievoud van de container ($R = 0,15/h$ voor waterstof, $R = 0,20/h$ voor aardgas) blijft de concentratie in de meterkast < 100% LEL.

Bij een uitstroom van 100 en 300 dm³/h ligt de eindconcentratie in de meterkast voor beide gasen wel hoger dan 100% LEL.

Hieruit volgt dat het toepassen van ventilatie conform NEN 2768 + A1 essentieel is voor zowel aardgas als waterstof.

8.3 Grenswaarde voor lekgrootte voor waterstof hoeft niet anders dan aardgas

Voor aardgas gelden de volgende eisen (zie kader):

LEKDICHTHEIDSEISEN AARDGAS:

Gasmeteropstelling: maximaal 0,1 dm³/h

Binnenleidinginstallatie tot 50 dm³ leidinginhoud:

Nieuwbouw: 1 mbar drukdaling in 3 minuten, gemeten met aardgas. Bij een leidinginhoud van 50 liter is dat 1 dm³/h. Bij een leidinginhoud van 5 liter (een meer gangbare leidinginhoud voor woningen) is dat 0,1 dm³/h.

Bestaande bouw: 5 dm³/h en maximaal 1 dm³/h op dezelfde plaats.

Op basis van paragraaf 9.1 is het *technisch gezien* verantwoord een lekgrootte van maximaal 50 dm³/h toe te staan omdat de onderste brandbaarheidsgrens (LEL) dan nog niet bereikt wordt en er dus geen kans op ontsteking is.

Op basis van de experimenten is er geen aanleiding om een andere grenswaarde voor waterstof te kiezen dan die nu voor aardgas geldt. Bij deze lekgrootten zullen geen gevaarlijke situaties ontstaan. Ook een factor 3 hoger (maximum factor van waterstof ten opzichte van aardgas bij dezelfde gatgrootte) zou daar geen aanleiding voor geven.

8.4 Mechanische toevoer van lucht is zeer effectief om de gasconcentratie laag te houden.

Bij dit onderzoek is geprobeerd concentratiemetingen te doen bij een ventilatievoud van 0,5/h en 1,0. Hierbij is getracht de luchtstroming van natuurlijke ventilatie na te bootsen door lucht via een spleetvormige opening toe te voeren nabij de deur.

De opbouw van concentraties in de kamer en hal blijkt hierbij langzamer te gaan en de daling sneller dan te verwachten is op basis van de hoeveelheid toegevoerde lucht. De achteraf berekende ventilatie is veel hoger dan alleen de ingeblazen lucht. Mogelijke oorzaken kunnen zijn:

- De ingeblazen lucht induceert zoveel stromingssnelheid in de container dat dit ook leidt tot de toevoer van lucht via andere openingen.
- Bij het inblazen worden zones met hoge gasconcentraties onevenredig sterk geventileerd.

Het inblazen van lucht leidt ook tot een betere menging. Er zijn dus minder uitgesproken lage of hoge concentraties. Waarschijnlijk is dit een gevolg extra luchtbeweging in de container, veroorzaakt door de ingeblazen lucht.

Hieruit volgt dat de mechanische toevoer van lucht zeer effectief is om de gasconcentratie laag te houden.

8.5 Mechanische afvoer van lucht is eveneens effectief.

De experimenten laten zien dat bij een gasuitstroom in de meterkast van 300 dm³/h en een ventilatievoud van 0,5/h er in de ruimte buiten de meterkast er geen gasconcentraties ontstaan van meer dan 100% LEL.

Bij aardgas bleek het ventilatievoud goed overeen te komen met de afgezogen luchthoeveelheid. Bij waterstof was het ventilatievoud wat hoger dan de afgezogen luchthoeveelheid: het grootste gemeten verschil was een ventilatievoud 1,7/h bij een ingestelde luchttoevoer van 1/h.

8.6 Gelaagdheid bij waterstof

In het HyDelta 1.0 bleek in de lege container de stratificatie van methaan (bij een uitstroom tot 20 dm³/h) sterker in de meterkast dan voor waterstof. Dit werd op basis van de fysische eigenschappen niet verwacht.

In dit onderzoek onder HyDelta 2.0, met hogere uitstroom, vertoont waterstof een veel sterkere gelaagdheid dan aardgas. Dat leidt tot zones met een hogere concentratie bovenin. Waarschijnlijk is dat mede de oorzaak dat het achteraf bepalen van het ventilatievoud bij waterstof minder goed werkt dan bij aardgas. Die methode is namelijk gebaseerd op homogeniteit.

9 Conclusies uit de experimenten

9.1 Ventilatie van de meterkast is noodzakelijk

Bij een lekkage van 50 dm³/h (ter indicatie vergelijkbaar met een lekkende schroefdraad-verbindingen) zal de onderste brandbaarheidsgrens (LEL) zowel bij waterstof als aardgas niet bereikt worden. Dit geldt alleen als er luchtroosters conform de voorschriften in de meterkast aanwezig zijn. Zolang deze brandbaarheidsgrens niet wordt bereikt is er geen kans op ontsteking en is er een veilige situatie.

Aanbevolen wordt om in meterkasten voor waterstofgasmeteropstellingen luchtroosters aan te brengen conform de huidige voorschriften voor aardgasmeterkasten.

9.2 Grenswaarde voor lekgrootte voor waterstof niet anders dan voor aardgas

Op basis van de experimenten is er geen aanleiding om een andere grenswaarde voor waterstof te kiezen dan welke nu voor aardgas geldt. Bij deze lekgrootten zullen geen gevaarlijke situaties ontstaan. Ook een factor 3 hoger (maximum factor van waterstof ten opzichte van aardgas bij dezelfde gatgrootte) zou daar geen aanleiding voor geven.

9.3 Bij lekgrootte van 50 tot 100 dm³/h geen ontsteekbare concentratie buiten de meterkast

Voor de ruimte buiten de meterkast laten de experimenten zien dat er bij lekkages tot 100 dm³/h (vergelijkbaar met een losse knelkoppeling) in de meterkast er bij een ventilatievoud van 0,5 geen concentraties boven 100% LEL ontstaan in de hal (de ruimte waarin de meterkast zich bevindt), ook niet als die niet geventileerd wordt.

9.4 Lekkages buiten de meterkast

Uit het onderzoek blijkt dat er bij een geringe ventilatie een sterke gelaagdheid ontstaat (vooral bij waterstof). Een “normale” ventilatie werkt niet alleen bij het verlagen van de gemiddelde concentratie, maar is ook effectief bij het mengen van het gas met lucht. Daardoor zullen er minder zones/ dode hoeken ontstaan met een hoge concentratie. Het inblazen van lucht is effectief voor menging van gas en lucht. Daar staat tegenover dat het afzuigen van lucht hoog in de ruimte ervoor zorgt dat de hoogste concentratie wordt afgevoerd.

Aanbevolen wordt, waar mogelijk, te kiezen voor een systeem van mechanische ventilatie in plaats van natuurlijke ventilatie omdat dit niet afhankelijk is van o.a. weersomstandigheden.

9.5 Verschillen in ventilatievoud/ventilatiedebit

De achteraf bepaalde, op concentratieverandering gebaseerde ventilatiedebieten geven soms onverwachte uitkomsten en wijken geregeld af van de ingestelde ventilatiedebieten. Hiervoor zijn wel enkele mogelijke oorzaken gevonden, echter een eenduidige verklaring is op basis van de resultaten niet te geven. Feit is wel dat de gevonden ventilatie alleen maar hoger (en dus gunstiger) is dan de ingestelde ventilatie.

9.6 Gasstopper als mitigerende maatregel?

Op basis van dit onderzoek is geen aanbeveling te doen over het al of niet toepassen van een gasstopper. De maximale lekgrootte in dit onderzoek is namelijk 1 m³/h. Een gasstopper dient bij een veel hoger gasdebit in te grijpen (ordegrootte voor 18 m³/h waterstof) omdat anders de gasstopper de gastoevoer al afsluit bij normaal gasverbruik van een cv-toestel.

10 Aanbevelingen voor verder experimenteel onderzoek

10.1 Andersoortige meterkasten

In dit project zijn experimenten gedaan met één meterkast. Er zijn echter ook vele andersoortige ruimten waarin gasmeters hangen, al of niet gevuld met objecten die niet in een meterkast thuishoren. Het is te overwegen om enkele experimenten uit te voeren om te zien hoe de gasconcentratie zich ontwikkelt in een dergelijke ruimte, en of zich hier een hogere concentratie kan vormen.

10.2 Andere ruimten dan een meterkast

In dit project zijn alleen experimenten gedaan waarbij gas vrijkomt in een meterkast. In de praktijk kan gas ook in een andere kleine ruimte vrijkomen. Het is aan te bevelen nader onderzoek te doen naar het vrijkomen van waterstof in andere kleine ruimtes zoals een kruipruimte, stijgstak of aanrechtkast.

10.3 Nader onderzoek naar onverklaarbare effecten

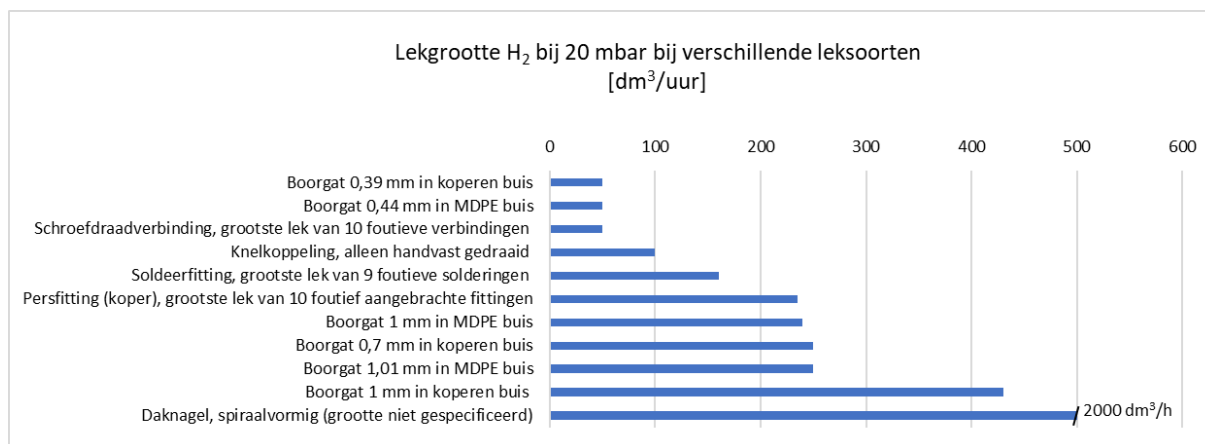
De resultaten lieten een aantal onverklaarbare effecten zien, zoals een lagere ventilatie nadat er een ventilatierooster was toegevoegd, en een veel hogere gemeten ventilatie (meer dan factor 4) bij een ingesteld ventilatievoud van 0,5 en 1 per uur.

Het is te overwegen om dit verschijnsel nader te onderzoeken door middel van experimenten en/of CFD-berekeningen.

Bijlagen


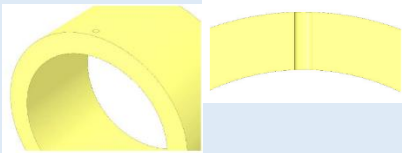

I Praktijkvoorbeelden van lekken

Om een indruk te krijgen van lekgrootten bij verschillende soorten lekken die zich binnenshuis kunnen voordoen is een overzicht samengesteld van experimenteel bepaalde lekgrootten bij 20 mbar. Hierbij is gebruik gemaakt van een rapport van Hy4Heat4 [2].

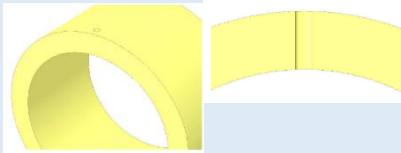


In Nederland ligt de gasdruk doorgaans tussen de 20 en 30 mbar. Daarom is in Tabel 11 een kolom toegevoegd voor de lek grootte bij 30 mbar.

Tabel 11: Nadere toelichting diverse lekgrootten

Soort lek	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 20 mbar leidingdruk	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 30 mbar leiding- druk ⁵	Afbeelding
Boorgat 0,39 mm Geboord gat in buis, koper DN 25, wanddikte 0,7 mm.	50	75	
Boorgat 0,44 mm: Geboord gat in buis, MDPE DN 32, wanddikte 3,3 mm	50	75	
Boorgat 0,7 mm: Geboord gat in buis, koper DN 25, wanddikte 0,7 mm.	250	375	

⁵ Waarden in deze kolom zijn omgerekend van waarde bij 20 mbar. In alle gevallen is er sprake van laminaire stroming, met uitzondering van het lek op de laatste regel (daknagel). Hier is de stroming turbulent.

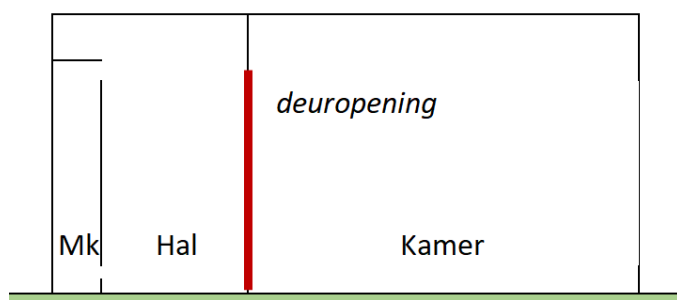
Soort lek	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 20 mbar leidingdruk	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 30 mbar leiding- druk ⁵	Afbeelding
Boorgat 1,01 mm: Geboord gat in buis, MDPE DN 32, wanddikte 3,3 mm	250	375	
Boorgat 1 mm: Geboord gat in buis, koper DN 25 (wandddikte 0,7 mm).	430	645	
Boorgat 1 mm: Geboord gat in buis, MDPE DN 32, wanddikte 3,3 mm	240	360	
Persfitting (koper) Getest met 10 foutief gemonteerde fittingen.	Max: 235 Min: ~ 0 Gem: 45	Max: 253 Min: ~ 0 Gem: 68	
Kneltkoppeling (15 mm): Knelfitting (messing), handvast gedraaid , montage zonder tang .	100	150	
Schroefdraadverbinding Getest met 9 foutief gemonteerde fitverbindingen	Max: 50 Min: 0 Gem: 16	Max: 75 Min: 0 Gem: 24	
Soldeerfitting Getest met 9 foutief gemonteerde fitverbindingen	Max: 160 Min: ~ 0 Gem: 38	Max: 240 Min: ~ 0 Gem: 54	

Soort lek	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 20 mbar leidingdruk	Lekdebiet H ₂ (dm ³ /h) bij 30 mbar leiding- druk ⁵	Afbeelding
Grote daknagel (maat niet gespecificeerd) Spiraalvormig	2000	4500	

II Bepaling gemiddelde ventilatievoud

II.1 Algemeen

In deze paragraaf wordt de methode waarmee het gemiddelde ventilatievoud is bepaald uiteengezet aan de hand van configuratie 3. Alle ventilatiesleuven naar buiten zijn gesloten, de ventilatieroosters van de meterkast (mk) naar de hal zijn open. De deur tussen hal en kamer is gesloten. Zie Figuur 42.

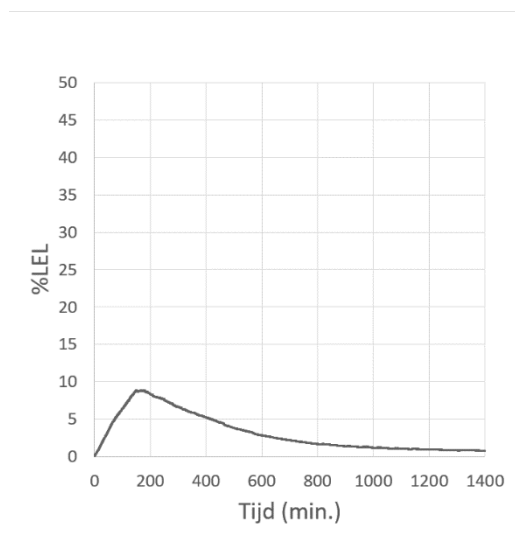


Figuur 42: Configuratie 3 (zijaanzicht)

II.2 Ventilatievoud

Algemeen

Om het ventilatievoud te bepalen zijn de metingen vergeleken met de theoretische gegevens. Hiertoe is een concentratieprofiel gemaakt van de gewogen⁶ gemiddelde concentratie in de hal + meterkast. Zie Figuur 43.



Figuur 43: Gemeten gemiddelde concentratieprofiel van waterstof

Het gemiddelde profiel is hetzelfde als het profiel bij homogene menging.

⁶ Toelichting term “gewogen”: het aantal sensoren per m³ is niet gelijk in de hal en de kamer. Met het gewogen gemiddelde wordt hiermee rekening gehouden.

Dalend deel van de grafiek

Aan de hand van het dalende deel van het profiel kan het ventilatievoud worden benaderd met de vereenvoudigde aanname dat waterstof en lucht op elk moment homogeen gemengd zijn. Vanaf het moment van het stopzetten van de gastoevoer naar de container zal de gasconcentratie afnemen volgens:

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

Waarin:

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

Cg_f = eindconcentratie [%]

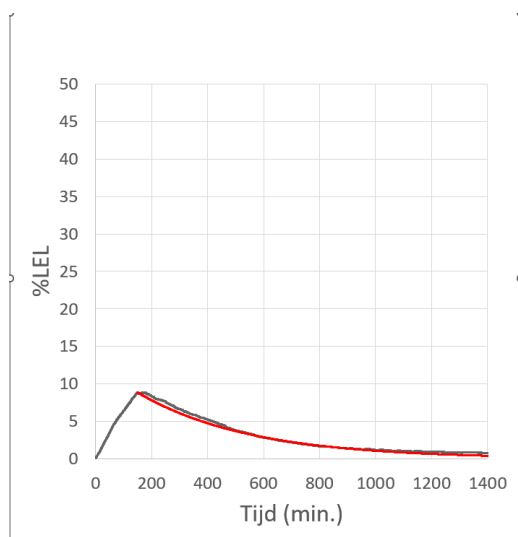
t = tijd [uur]

t_s = tijdstip van stoppen gastoevoer [uur]

R = ventilatievoud [1/h], dit is het aantal keren per uur dat de lucht in (een deel van) de container ververscht wordt

De gastoevoer in dit experiment stopt na 150 minuten. Wordt dat moment gekozen als $t=0$ voor formule (1) dan kan in dezelfde figuur de theoretische kromme voor homogene menging worden weergegeven, omgerekend naar % LEL.

De best passende theoretische kromme (Figuur 44, rood) is gevonden door te variëren met het ventilatievoud.



Figuur 44: Gemiddelde concentratieprofiel in meterkast + hal (sensoren 1 t/m 27) waarbij de meterkastdeur gesloten is (waterstofuitstroom van 50 dm³/h). Rood: theoretisch gefitte grafiek; ventilatievoud 0,15

Bij dit experiment blijkt het ventilatievoud $R = 0,15$ te bedragen.

Stijgend deel van de grafiek: eindconcentratie bij gastoevoer

Nu het ventilatievoud R bij dit experiment bekend is, kan de eindconcentratie (stationaire concentratie) worden berekend bij homogene menging. Deze wordt gegeven door de verhouding tussen gastoevoer Q_g en de som van lucht- en gastoevoer ($RV + Q_g$):

$$Cg(\infty) = 100 \frac{Q_g}{RV + Q_g} + C_o \quad (2)$$

Waarin:

$C_g(\infty)$ = eindconcentratie of stationaire concentratie [%]

C_o = achtergrondconcentratie [%]

Q_g = gastoevoer [m³/h]

t = tijd [uur]

R = ventilatievoud [1/h]

V = volume van de ruimte [m³]

$C_g(\infty)$ uitgedrukt in % LEL:

$C_g(\infty) / \text{LELH}_2$ = eindconcentratie of stationaire concentratie [% LEL]

$$C_g(\infty) = 100 \frac{50 \cdot 10^{-3}}{0,14 \cdot 36 + 50 \cdot 10^{-3}} + C_o \quad (3)$$

Concentratieverloop vanaf starten gastoevoer:

Vanaf het starten van de gastoevoer stijgt de concentratie totdat de eindconcentratie is bereikt. De concentratie op tijdstip t wordt gegeven door:

$$C_g(t) = 100 \frac{Q_g}{RV + Q_g} \left(1 - e^{-\frac{RV + Q_g}{V} t} \right) + C_o \quad (4)$$

Waarin:

$C_g(t)$ = concentratie op tijdstip t [%]

Q_g = gastoevoer [m³/h]

t = tijd [uur]

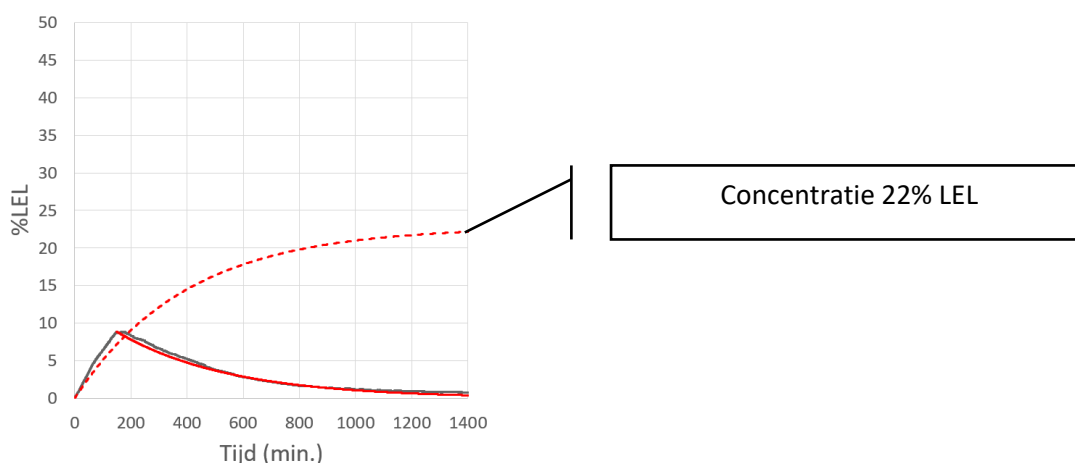
R = ventilatievoud [1/h]

V = volume van de ruimte [m³]

In formule (3) is de term $Q_g/(RV + Q_g)$ te onderscheiden, waarmee eindconcentratie wordt berekend.

De term $\left(1 - e^{-\frac{Q_g + VR}{V} t} \right)$ beschrijft de weg ernaartoe als functie van de tijd. De waarde nadert naar 1 als de tijd nadert naar ∞ .

Met deze formule en het hiervoor bepaalde ventilatievoud $R = 0,15$ is kan nu ook de theoretische kromme tijdens *gastoevoer* (Figuur 45 , blauw) worden toegevoegd.



Figuur 45: Gemiddelde concentratieprofiel (waterstofuitstroom van 50 dm³/h). Tijdschaal 1400 minuten (ca 23 uren). Rood: theoretisch gefitte grafiek; ventilatievoud 0,15

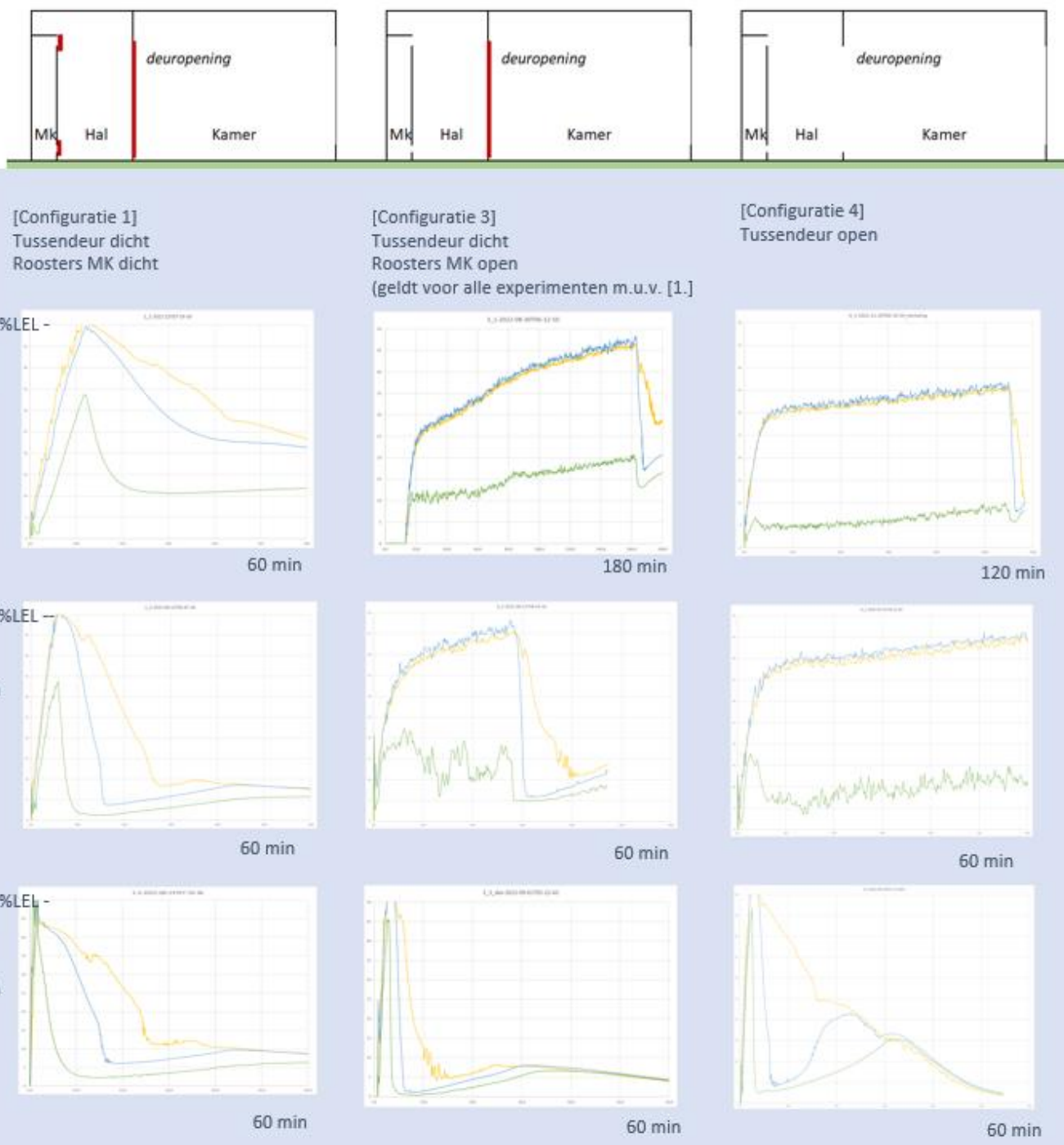
Bij het selecteren van het ventilatievoud is ervan uitgegaan dat de waarde tijdens gastoevoer hetzelfde is als na het beëindigen van de gastoevoer. Dat betekent dat er soms concessies gedaan zijn aan de ideale lijn. Bijvoorbeeld in bovenstaande figuur: Ideaal zou zijn om de stijgende grafiek nog wat steiler te maken, maar dan blijkt het dalende deel nog veel meer af te wijken van de meetgrafiek.

Het ventilatievoud wordt dus zodanig gekozen dat het stijgende deel en het dalende deel het beste passen.

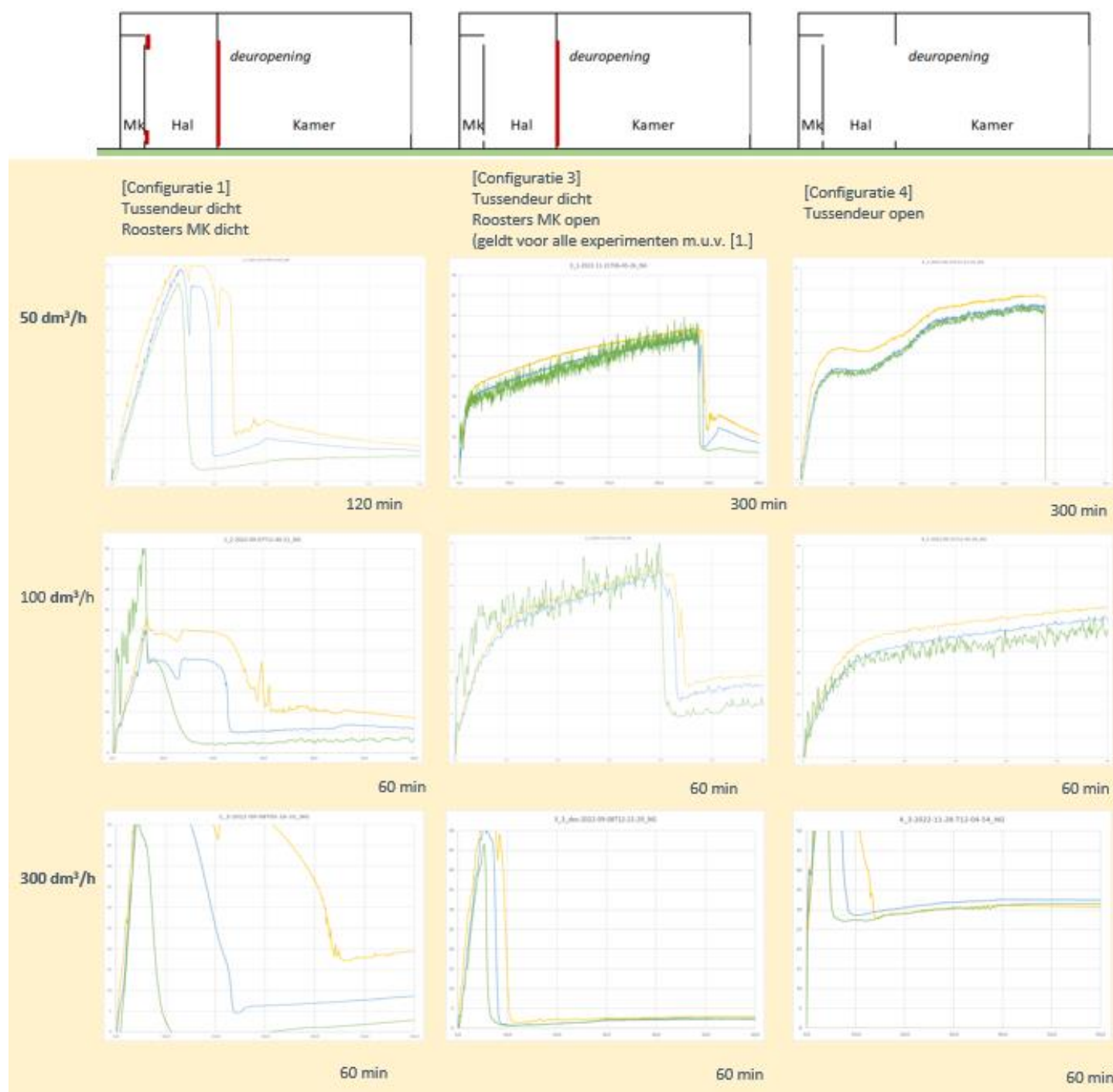
III Metingen in de meterkast, schematisch gerangschikt

Grafieken in groot formaat staan in Bijlage V.

III.1 Waterstof configuratie 1, 3 en 4



III.2 Aardgas configuratie 1, 3 en 4

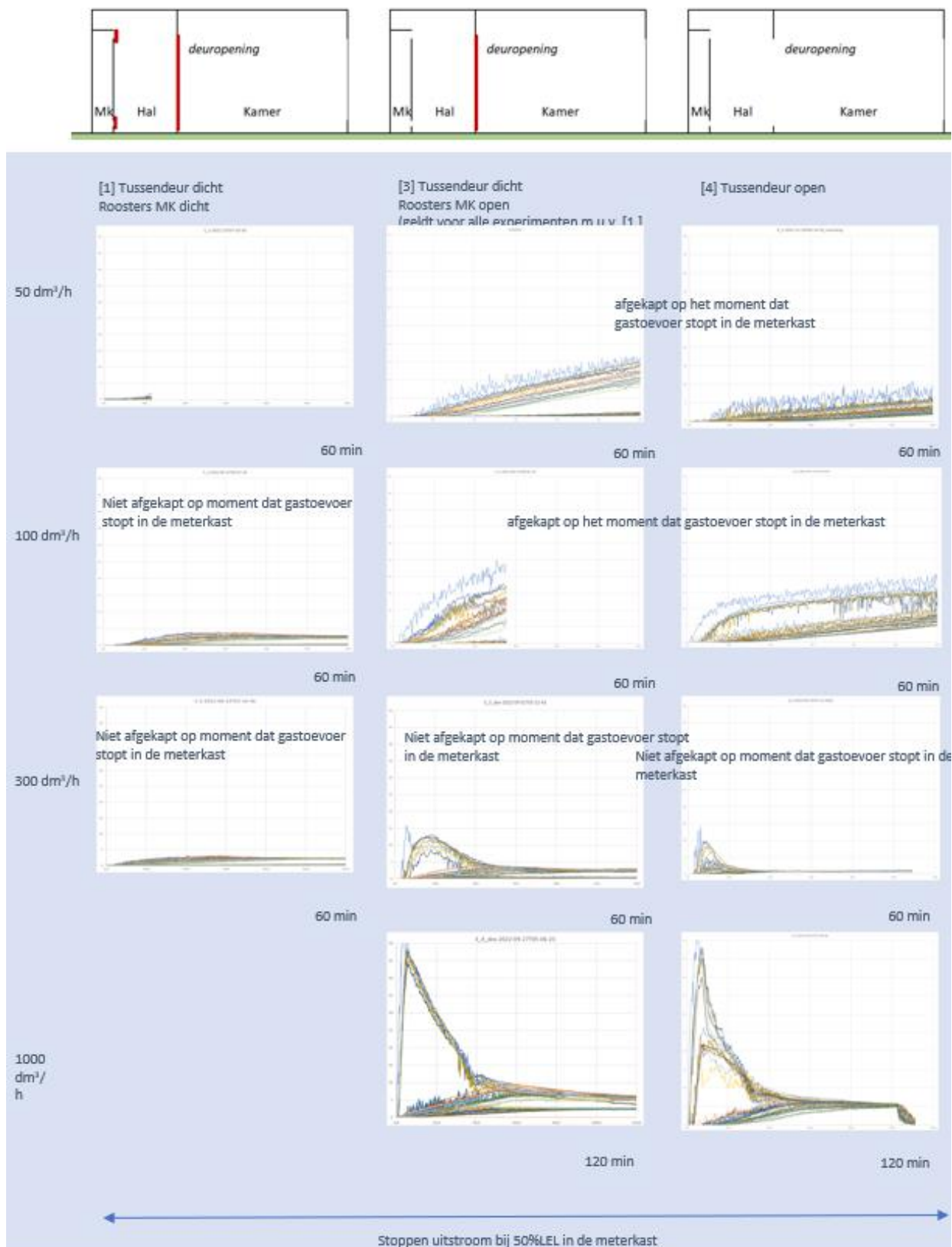


IV Metingen buiten de meterkast, schematisch gerangschikt

Grafieken in groot formaat staan in Bijlage V.

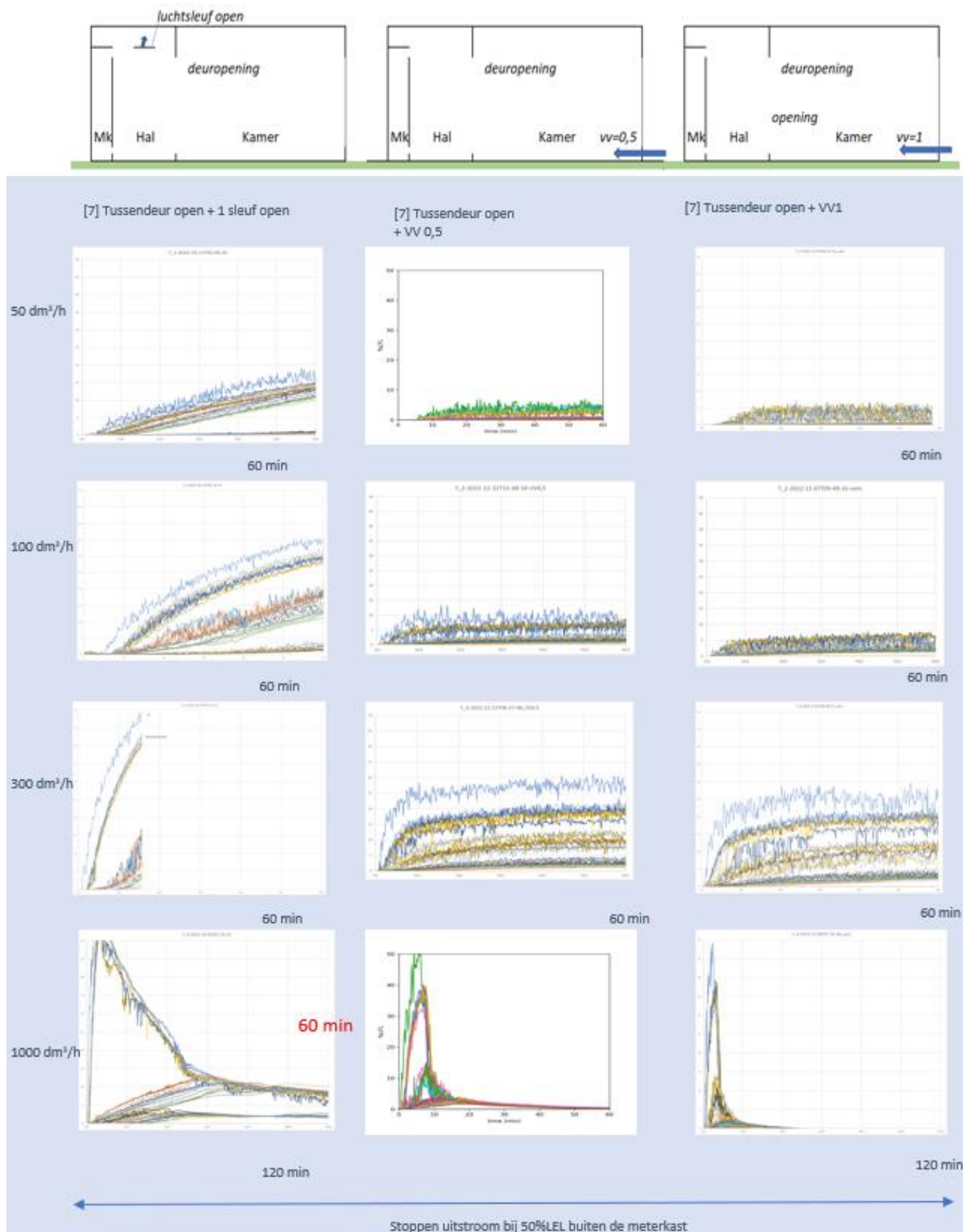
IV.1 Waterstof configuratie 1, 3 en 4

Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



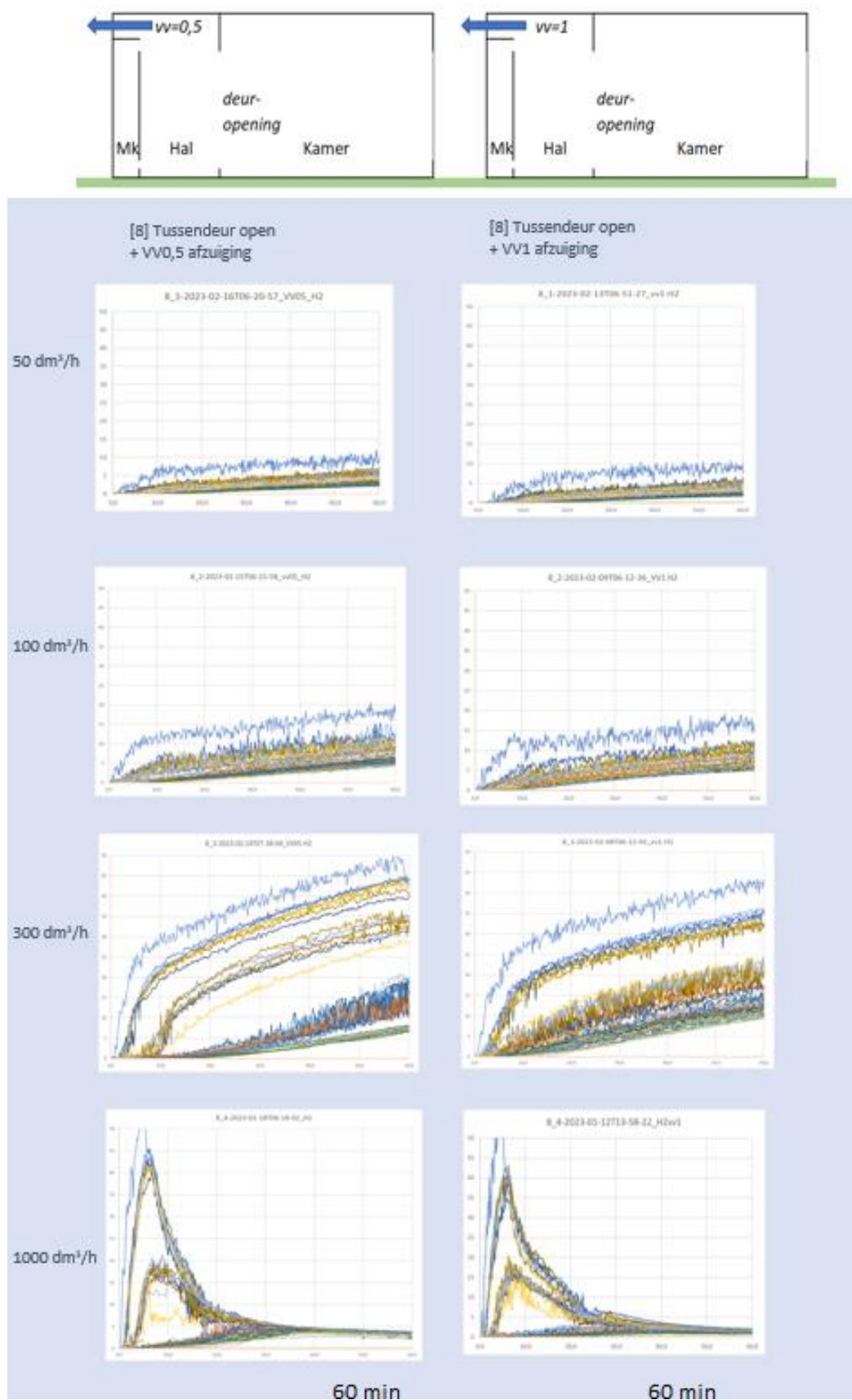
IV.2 Waterstof configuratie 7, 7/0.5 en 7/1.0

Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



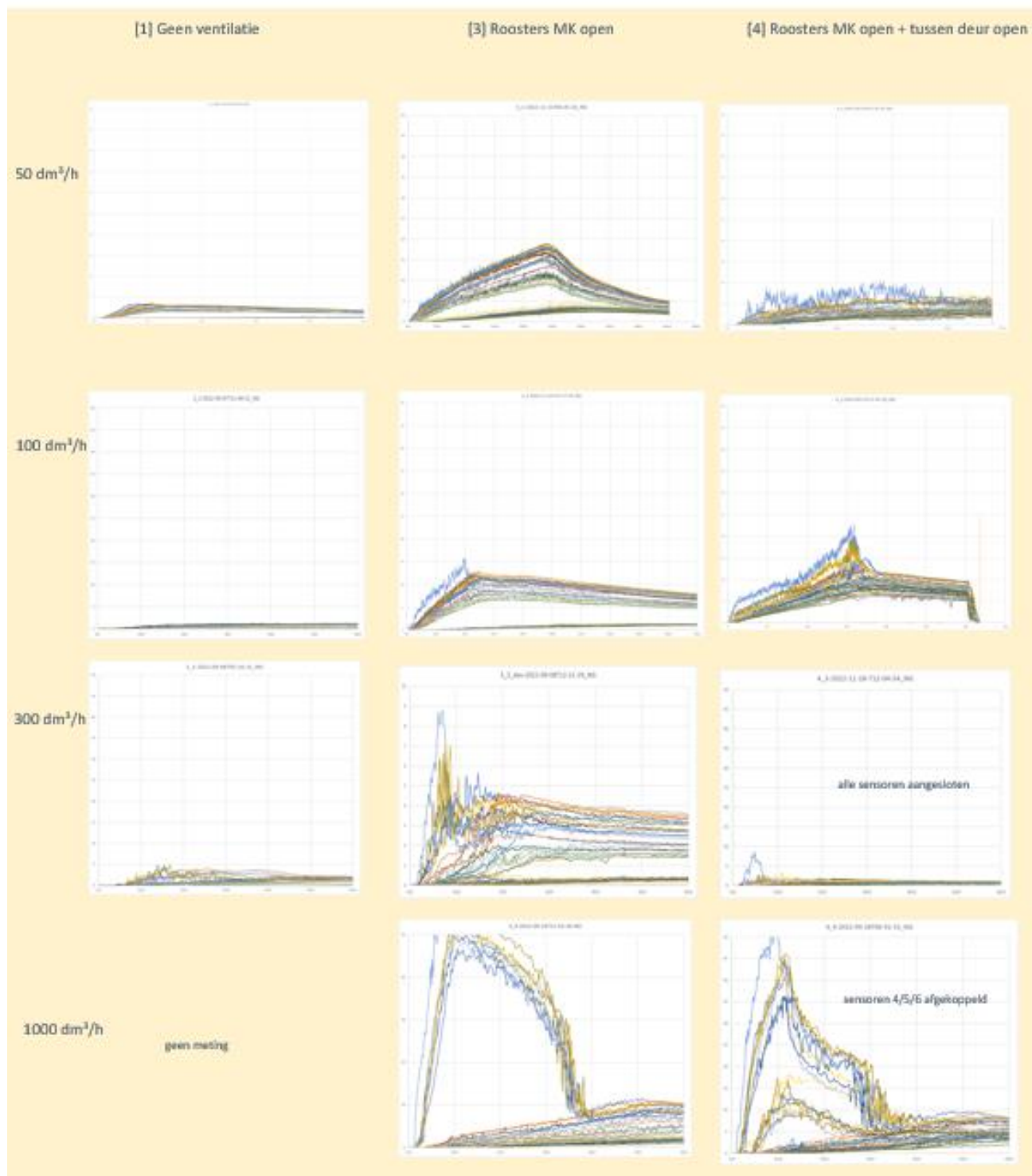
IV.3 Waterstof configuratie 8/0.5 en 8/1.0

Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



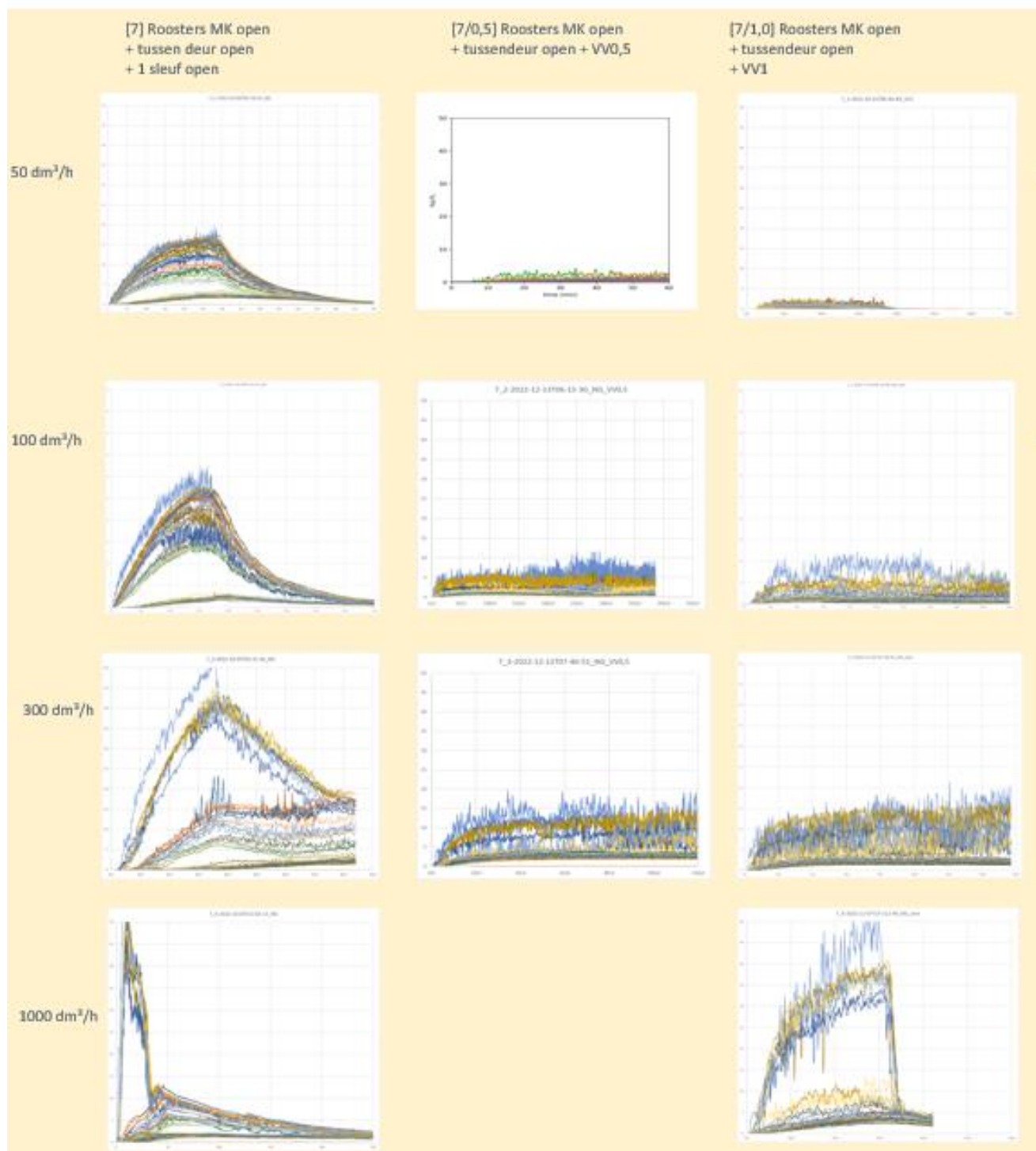
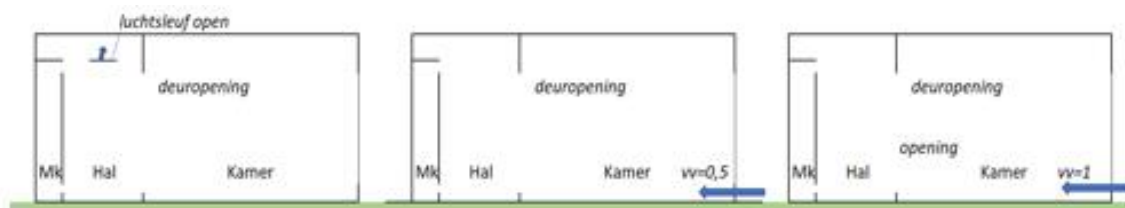
IV.4 Aardgas configuratie 1, 3 en 4

Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



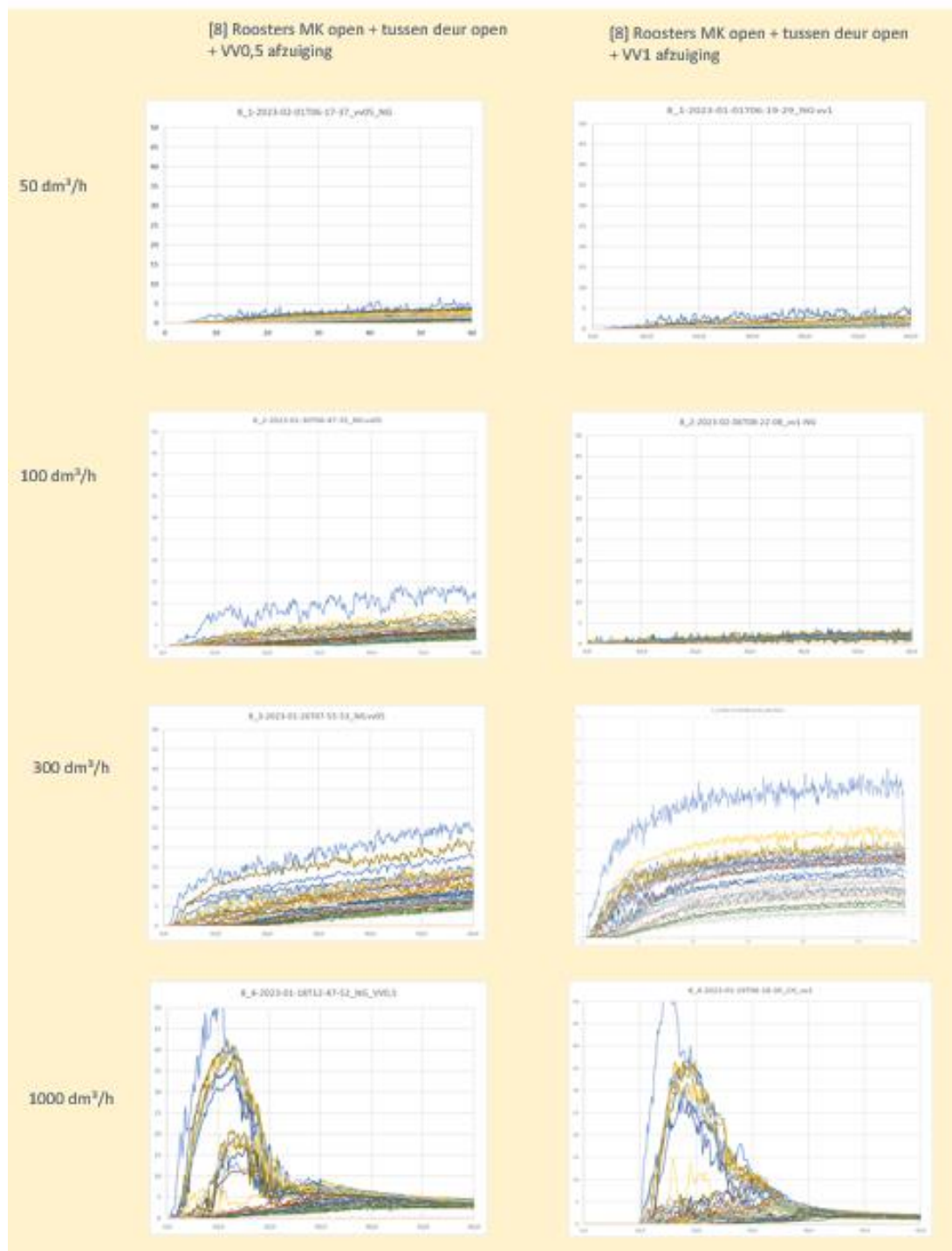
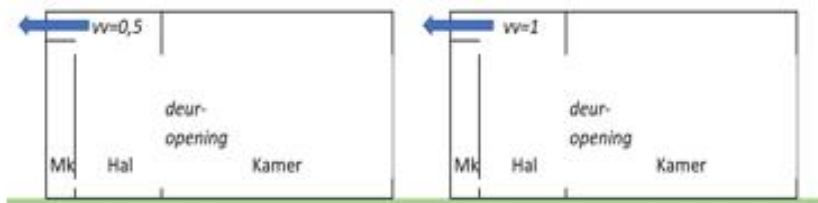
IV.5 Aardgas configuratie 7, 7/0.5 en 7/1.0

Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



IV.6 Aardgas configuratie 8/0.5 en 8/1.0

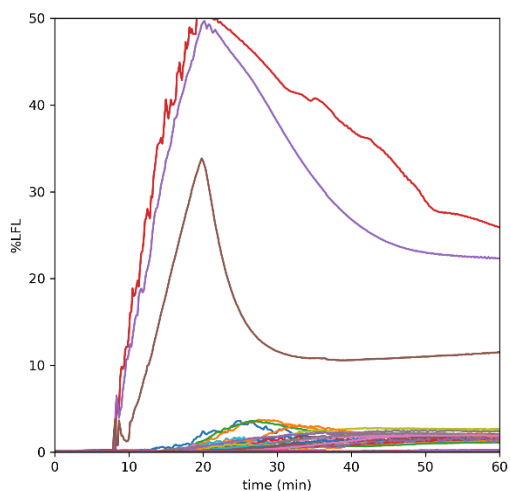
Uitstroom gestopt bij 50% LEL in de meterkast



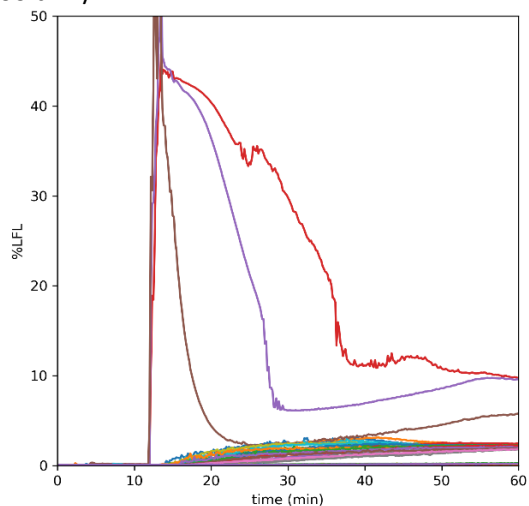
V Alle meetgrafieken

Waterstof
Configuratie 1
Metingen 1-1 t/m 1-3

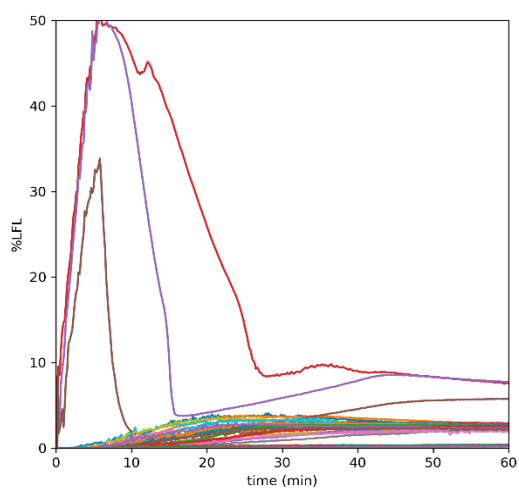
Meting 1-1
50 dm³/h



Meting 1-3
300 dm³/h

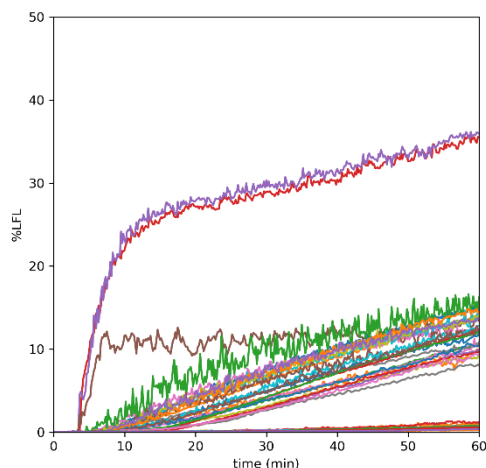


Meting 1-2
100 dm³/h

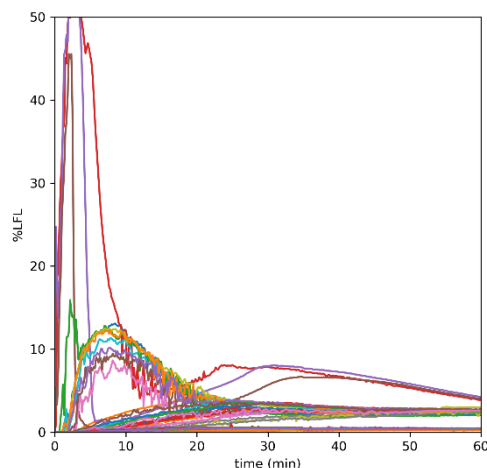


Waterstof
Configuratie 3
Metingen 3-1 t/m 3-3

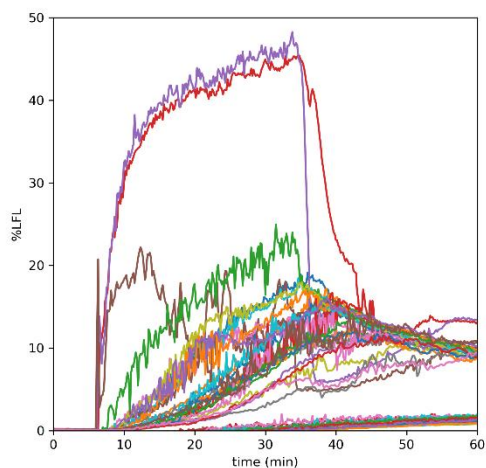
Meting 3-1
50 dm³/h



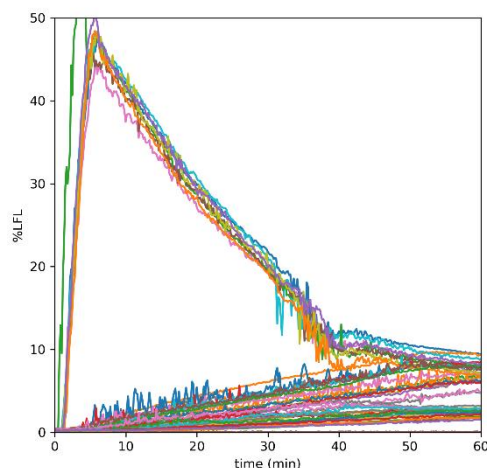
Meting 3-3
300 dm³/h



Meting 3-2
100 dm³/h

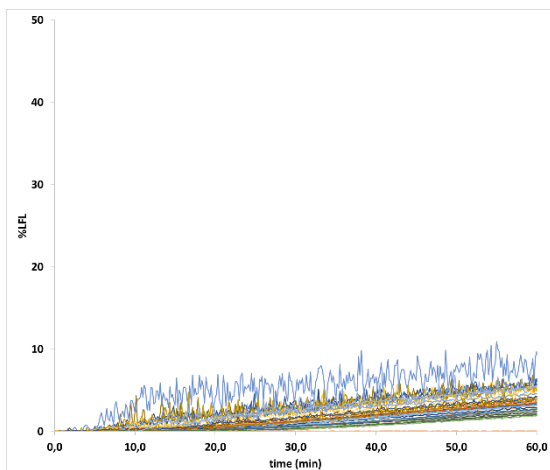


Meting 3-4
1000 dm³/h

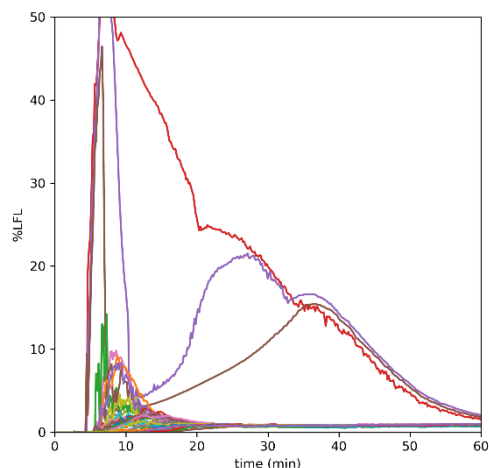


Waterstof
Configuratie 4
Metingen 4-1 t/m 4-3

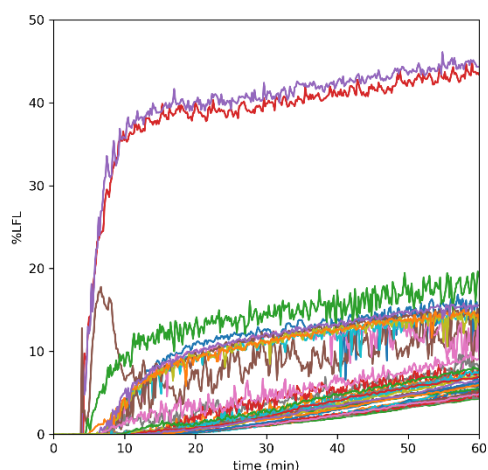
Meting 4-1
50 dm³/h



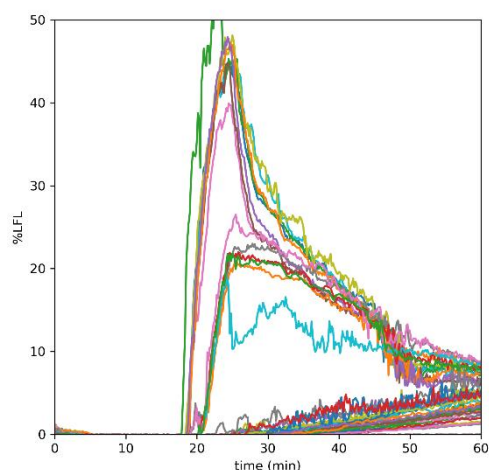
Meting 4-3
300 dm³/h



Meting 4-2
100 dm³/h

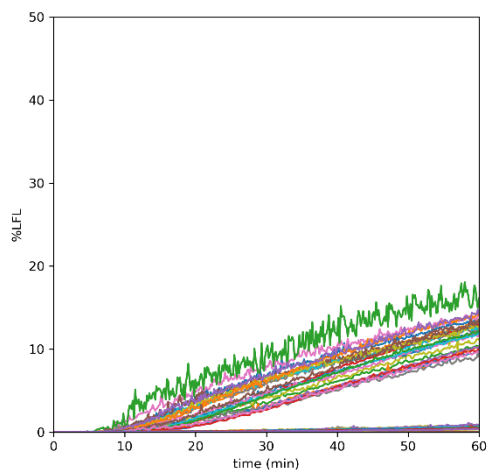


Meting 4-4
1000 dm³/h

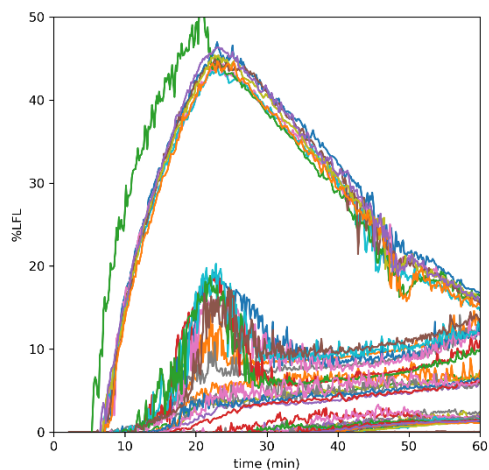


Waterstof
Configuratie 7
Metingen 7-1 t/m 7-4

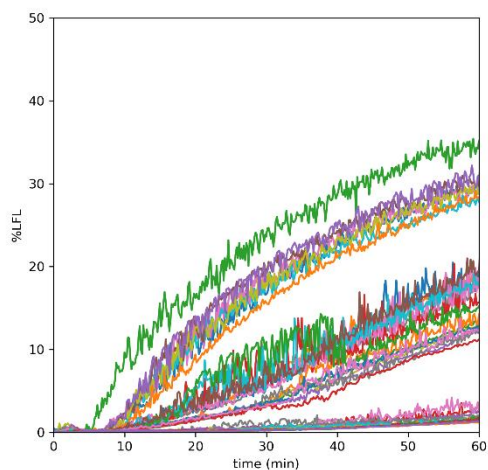
Meting 7-1
50 dm³/h



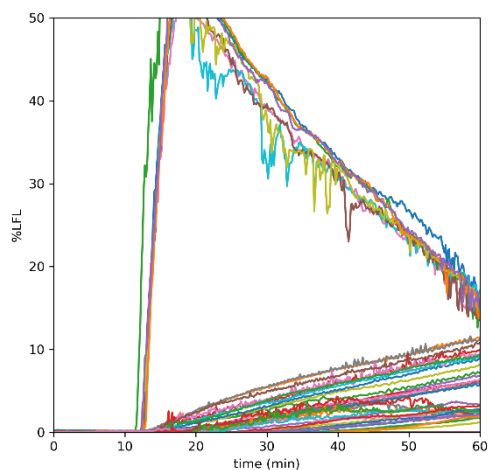
Meting 7-3
300 dm³/h



Meting 7-2
100 dm³/h

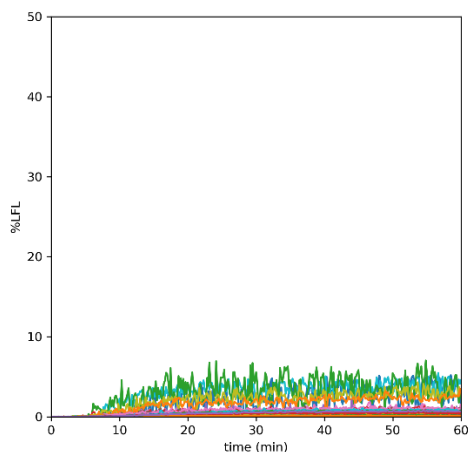


Meting 7-4
1000 dm³/h

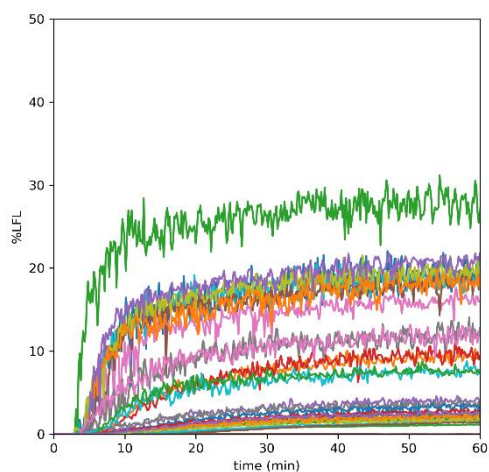


Waterstof
Configuratie 7/0.5
Metingen 7-1 t/m 7-4 ventilatievoud 0,5 inblazen

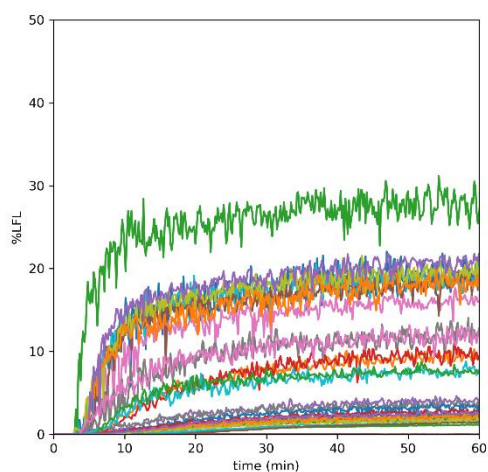
Meting 7-1
50 dm³/h



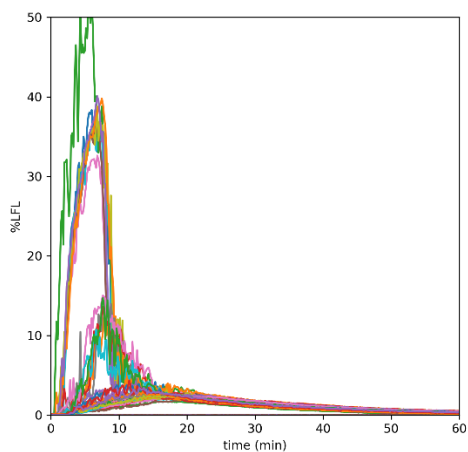
Meting 7-3
300 dm³/h



Meting 7-2
100 dm³/h

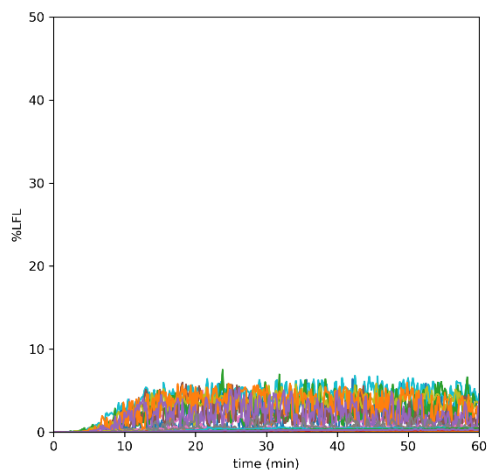


Meting 7-4
1000 dm³/h

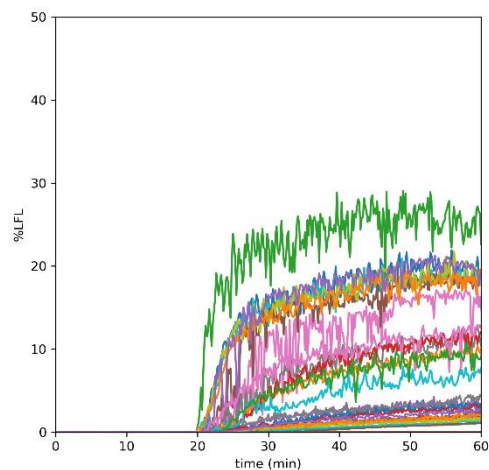


Waterstof
Configuratie 7/1
Metingen 7-1 t/m 7-4 ventilatievoud 1 inblazen

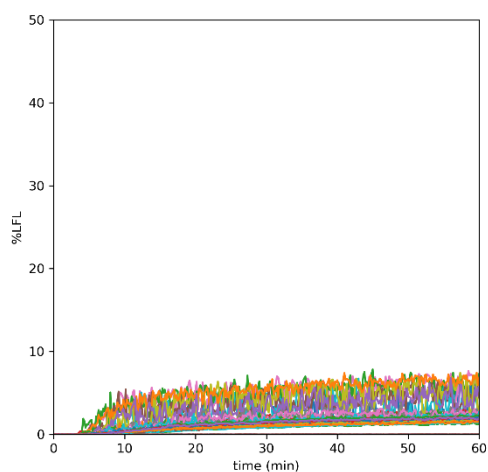
Meting 7-1
50 dm³/h



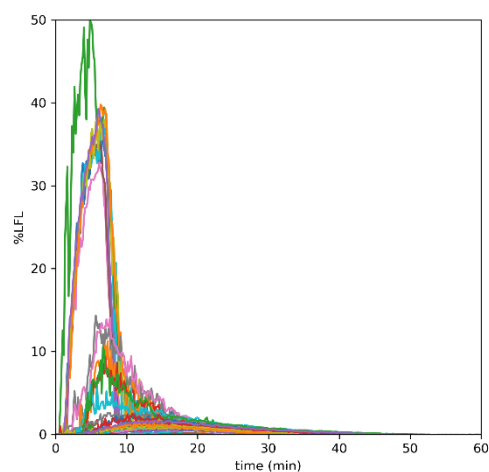
Meting 7-3
300 dm³/h



Meting 7-2
100 dm³/h



Meting 7-4
1000 dm³/h



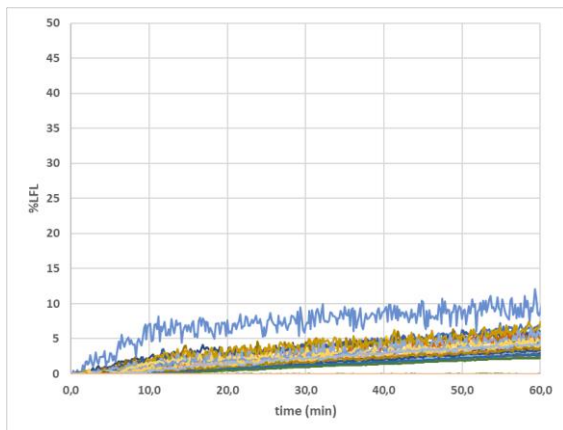
Waterstof

Configuratie 8/0.5

Metingen 8-1 t/m 8-4 ventilatievoud 0,5 afzuigen

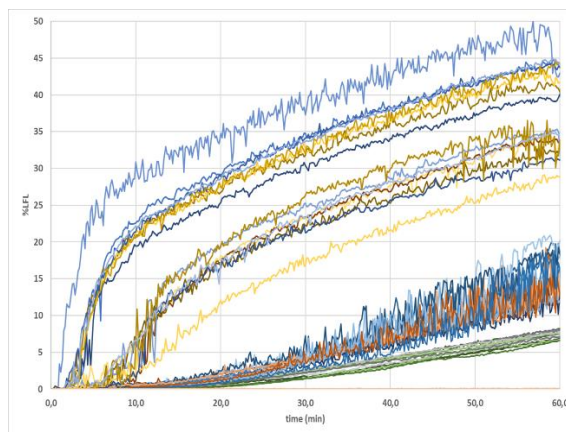
Meting 8-1

50 dm³/h



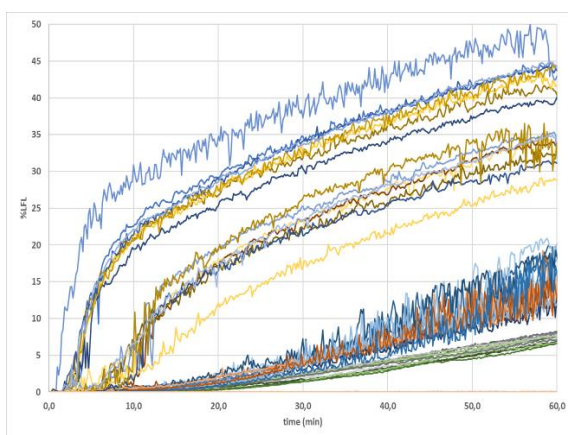
Meting 8-3

300 dm³/h



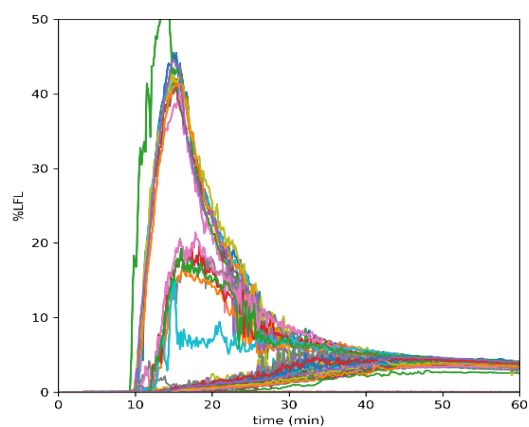
Meting 8-2

100 dm³/h



Meting 8-4

1000 dm³/h



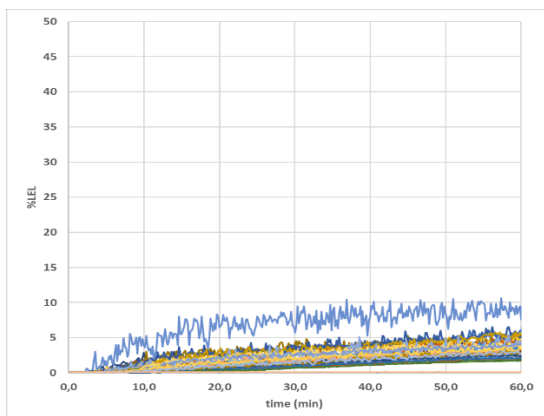
Waterstof -

Configuratie 8/1.0

Metingen 8-1 t/m 8-4 ventilatievoud 1 afzuigen

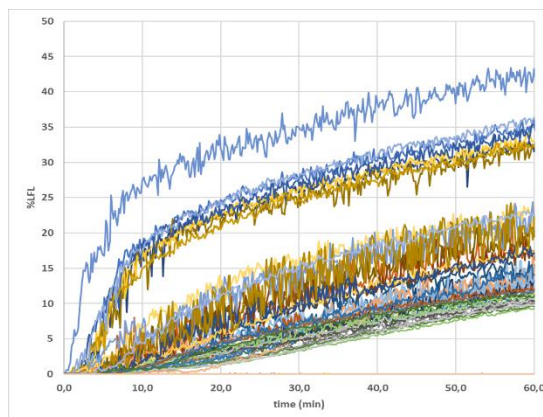
Meting 8-1

50 dm³/h



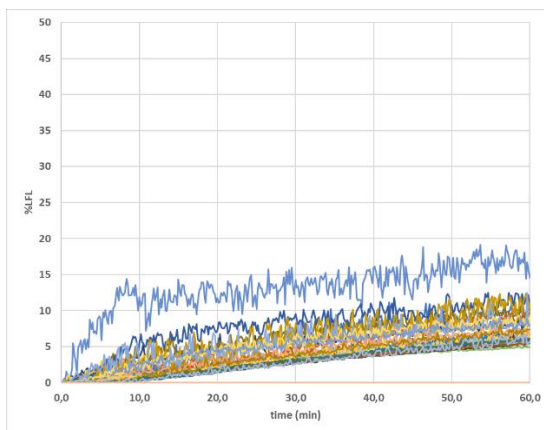
Meting 8-3

300 dm³/h



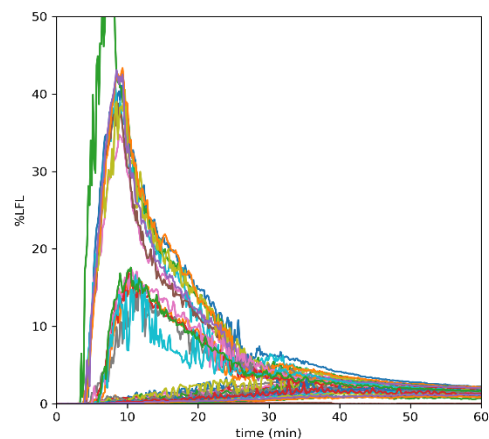
Meting 8-2

100 dm³/h



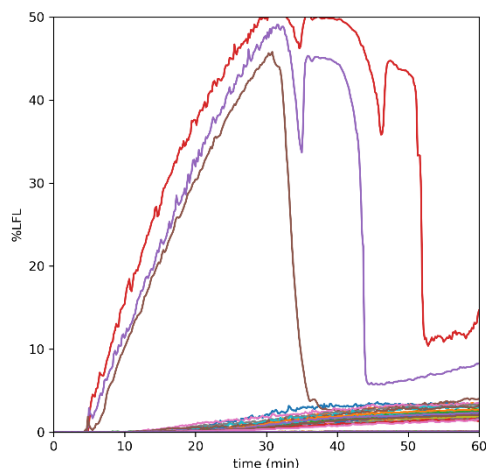
Meting 8-4

1000 dm³/h

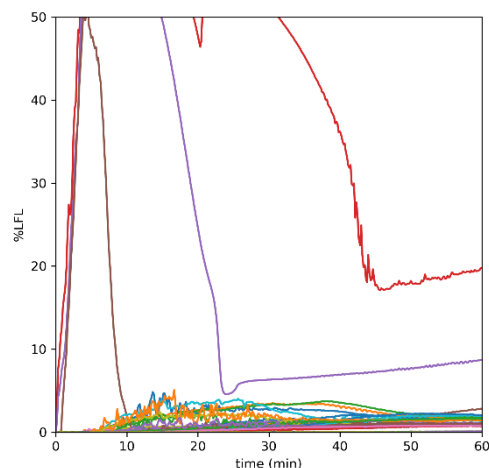


Aardgas
Configuratie 1
Metingen 1-1 t/m 1-3

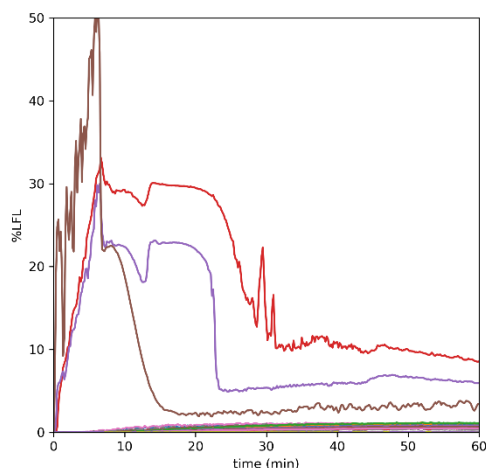
Meting 1-1
50 dm³/h



Meting 1-3
300 dm³/h

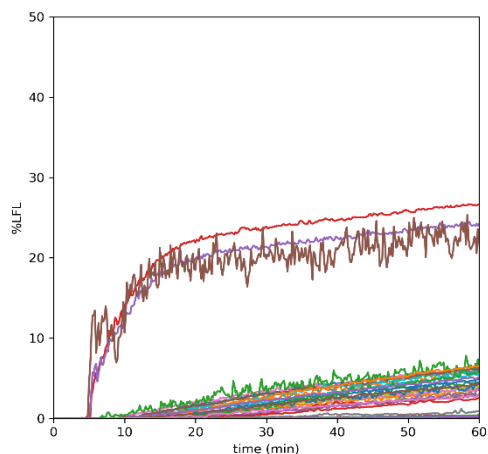


Meting 1-2
100 dm³/h

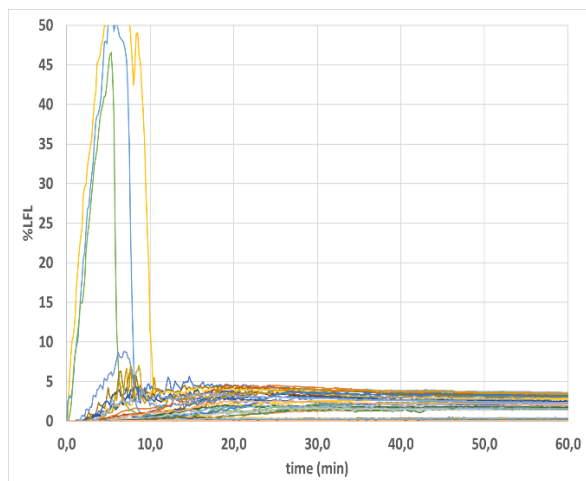


Aardgas
Configuratie 3
Metingen 3-1 t/m 3-3

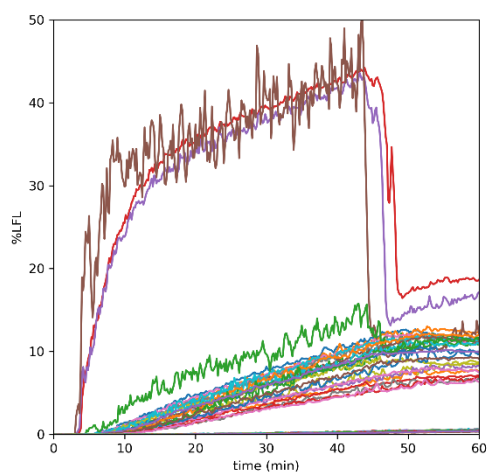
Meting 3-1
50 dm³/h



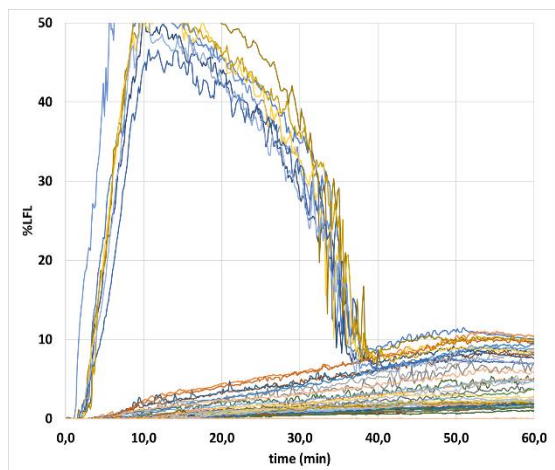
Meting 3-3
300 dm³/h



Meting 3-2
100 dm³/h

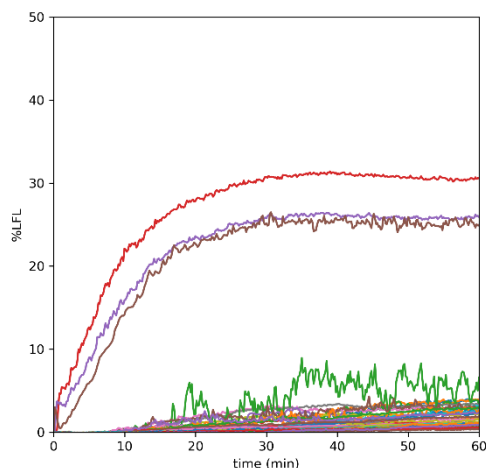


Meting 3-4
1000 dm³/h

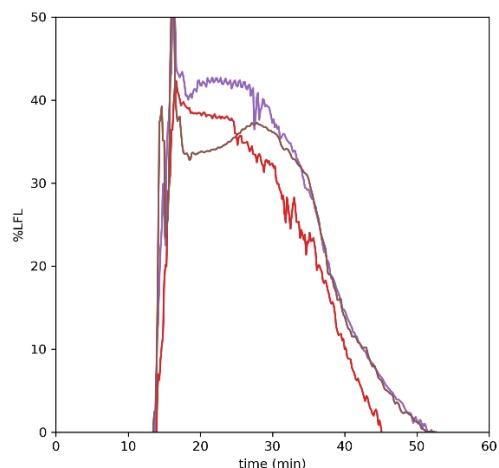


Aardgas
Configuratie 4
Metingen 4-1 t/m 4-3

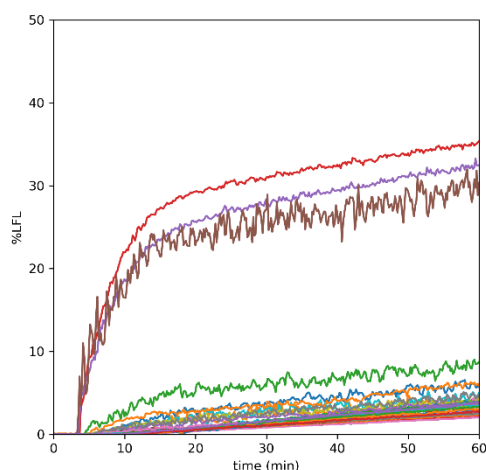
Meting 4-1
50 dm³/h



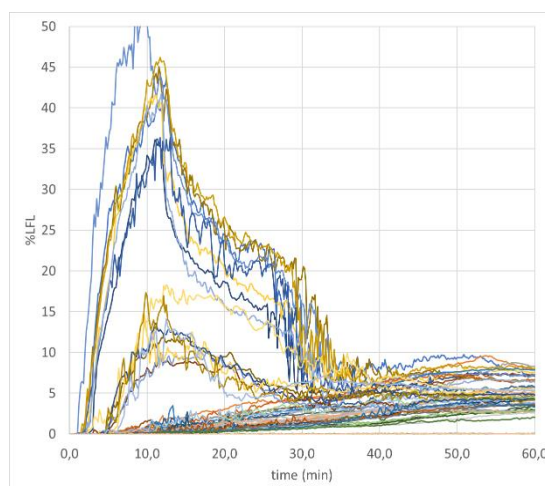
Meting 4-3
300 dm³/h



Meting 4-2
100 dm³/h

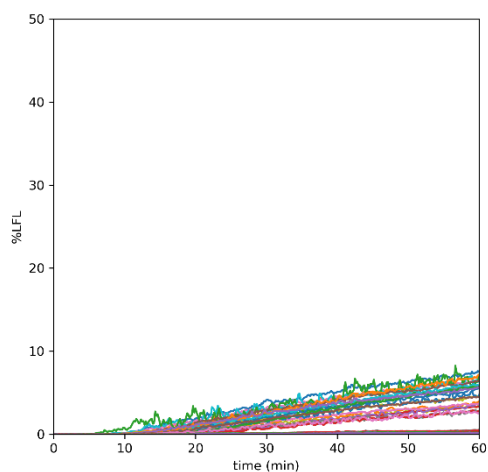


Meting 4-4
1000 dm³/h

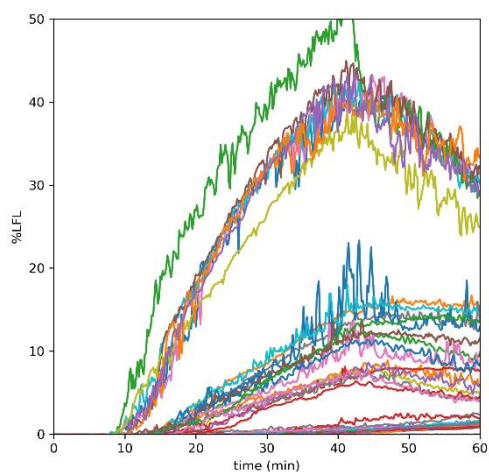


Aardgas
Configuratie 7
Metingen 7-1 t/m 7-4

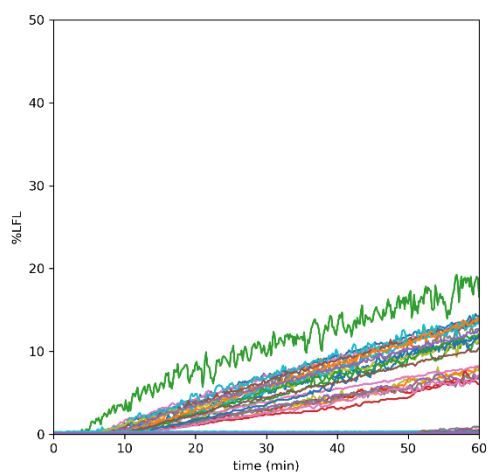
Meting 7-1
50 dm³/h



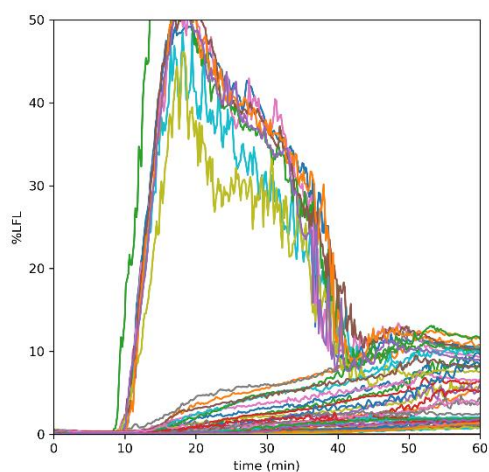
Meting 7-3
300 dm³/h



Meting 7-2
100 dm³/h

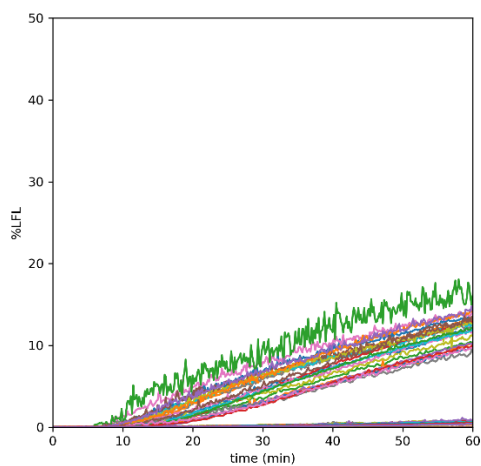


Meting 7-4
1000 dm³/h

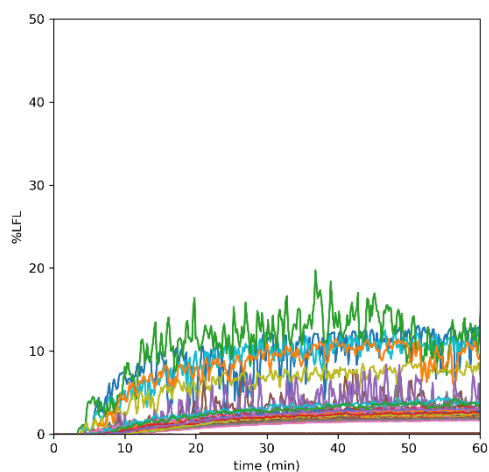


Aardgas
Configuratie 7/0.5
Metingen 7-1 t/m 7-4 ventilatievoud 0,5 inblazen

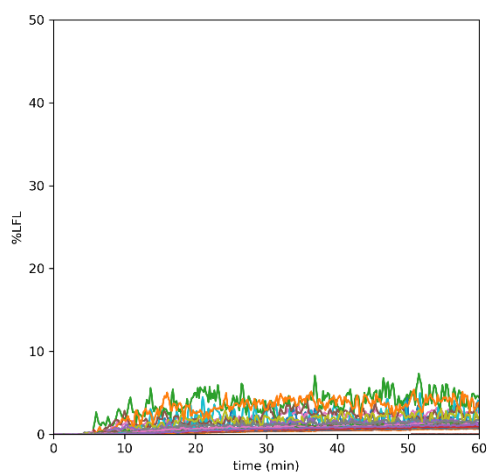
Meting 7-1
50 dm³/h



Meting 7-3
300 dm³/h

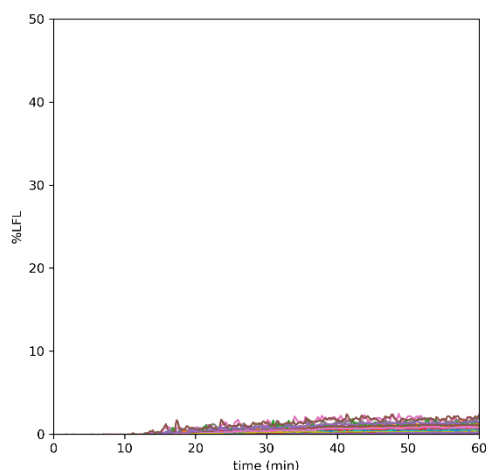


Meting 7-2
100 dm³/h

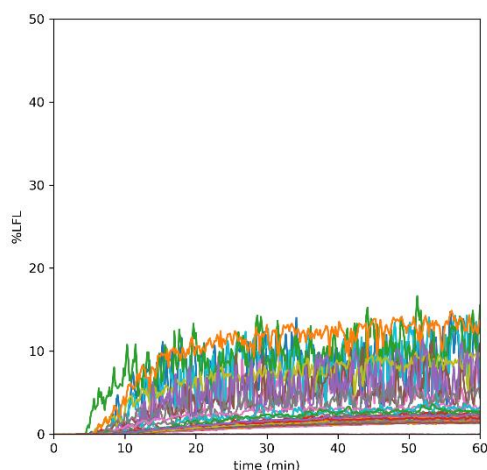


Aardgas
Configuratie 7/1
Metingen 7-1 t/m 7-4 ventilatievoud 1 inblazen

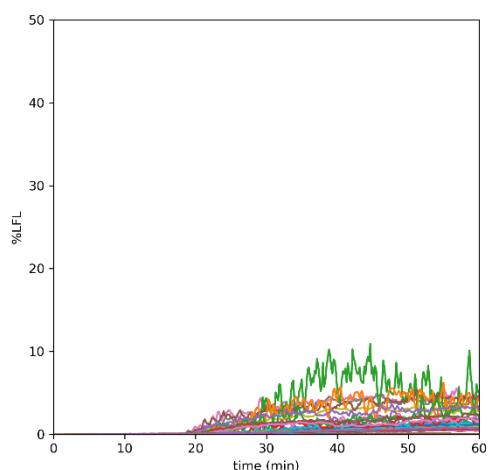
Meting 7-1
50 dm³/h



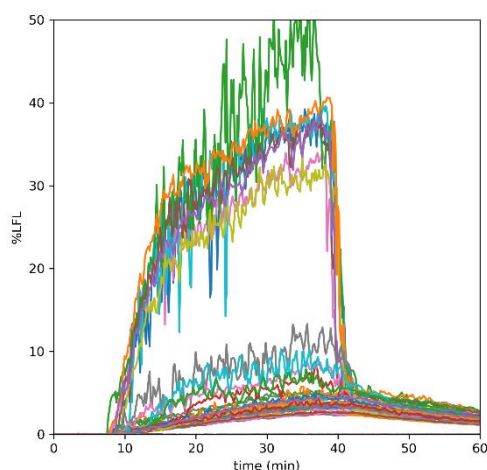
Meting 7-3
300 dm³/h



Meting 7-2
100 dm³/h

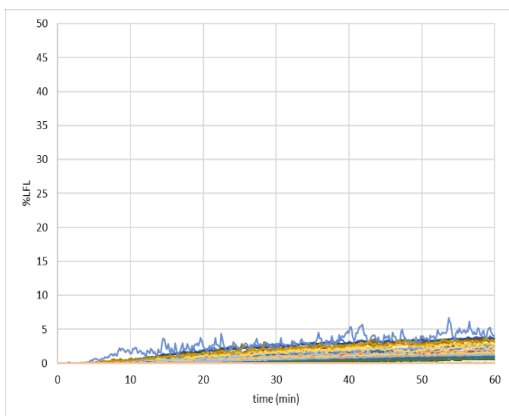


Meting 7-4
1000 dm³/h

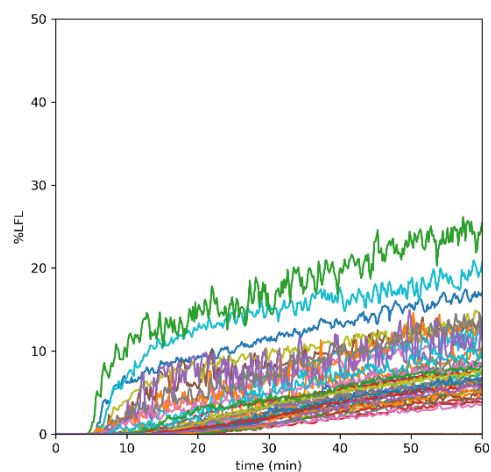


Aardgas
Configuratie 8/0.5
Metingen 8-1 t/m 8-4 ventilatievoud 0,5 afzuigen

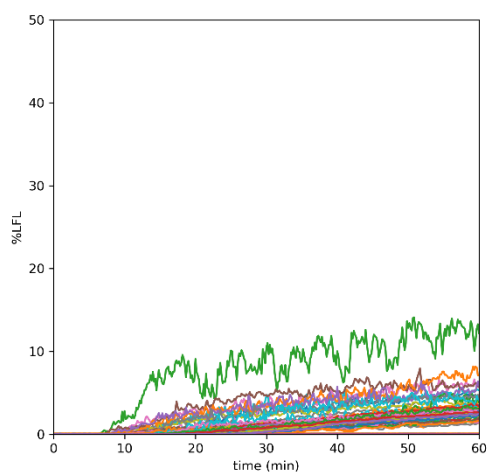
Meting 8-1
50 dm³/h



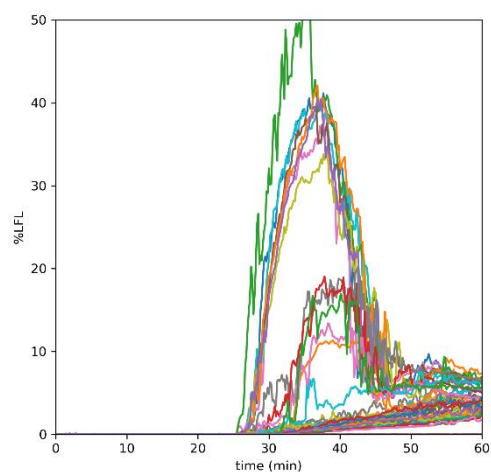
Meting 8-3
300 dm³/h



Meting 8-2
100 dm³/h

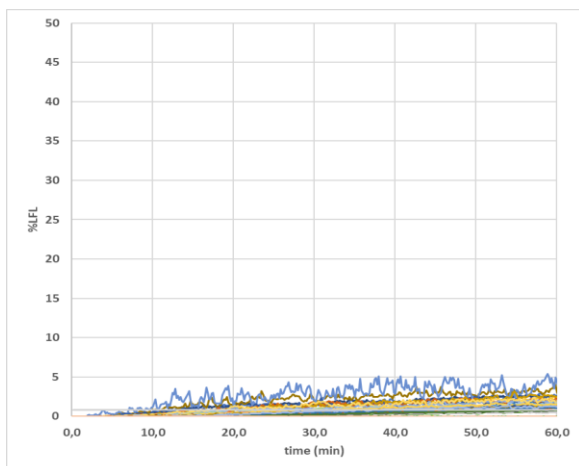


Meting 8-4
1000 dm³/h

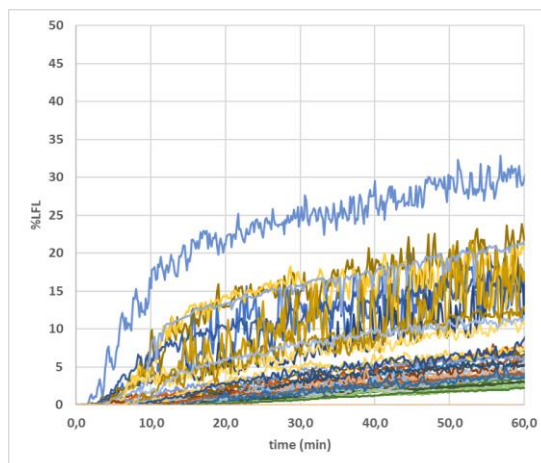


Aardgas
Configuratie 8/1
Metingen 8-1 t/m 8-4 ventilatievoud 1 afzuigen

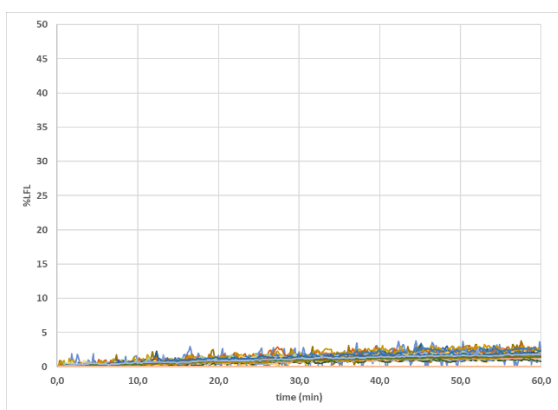
Meting 8-1
50 dm³/h



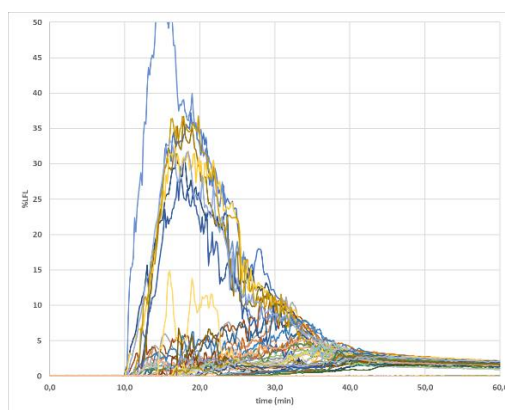
Meting 8-3
300 dm³/h



Meting 8-2
100 dm³/h



Meting 8-4
1000 dm³/h



VI Ventilatievoud en gemiddelde eindconcentratie (berekend)

configuratie	gassoort	gastoevoer dm ³ /h	ventilatievoud bepaald door inter- en extrapolatie	Gemiddelde eindconcentratie %LEL
3	waterstof	50	0,14	25
3	waterstof	100	0,40	17
3	waterstof	300	0,15	132
3	aardgas	50	0,20	12
3	aardgas	100	0,15	31
3	aardgas	300	0,15	91
3	aardgas	1000	0,15	269
4	waterstof	50	0,09	38
4	waterstof	100	0,25	27
4	waterstof	300	0,40	51
4	aardgas	50	0,40	6
4	aardgas	100	0,15	31
4	aardgas	300	0,08	163
4	aardgas	1000	0,10	375
7	waterstof	100	0,2	34
7	waterstof	300	0,2	100
7	aardgas	100	0,5	10
7	aardgas	300	0,2	69
7/0,5	waterstof	300	3	7
7/0,5	aardgas	300	4	4
7/1,0	waterstof	300	3	7
7/1,0	aardgas	300	4,8	3
8/0,5	waterstof	1000	0,6	111
8/0,5	aardgas	1000	0,5	91
8/1,0	waterstof	1000	1,7	40
8/1,0	aardgas	1000	1	47

VII Meterkast gebruikt voor de proefopstelling

Voor dit project is een houten meterkast gebruikt met de afmetingen, zoals aangegeven in NEN 2768+A1. De maten van de meterkast zijn zoals aangegeven in paragraaf 5.1.1 “Inwendige afmetingen” (laagbouw met gasaansluiting. De meterkast is aan drie zijden dicht, met aan de voorkant een deur met ventilatieopeningen. In de deur zijn twee ventilatieroosters geplaatst zoals aangegeven in paragraaf 4.2.2 “Minimale ventilatievoorziening”. In onderstaande foto is deze meterkast te zien.



Figuur 46: Meterkast voordat deze werd ingebouwd in de container.

Referenties

- [1] DNV GL, „Rapport proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast,” 2020.
- [2] Hy4Heat, Work Package 7; Safety Assessment: Experimental Testing – Domestic Pipework Leakage..
- [3] DNV, „Investigation into the cross-sensitivity of domestic carbon monoxide alarms to hydrogen,” in *ICHS*, 2021.
- [4] DNV, „Verkennd metingen naar gebruik CO melders voor waterstof detectie - Hydrogreenn,” 2019.
- [5] HyDelta 1.0. A. van de Noort (DNV), „WP1a– Veiligheid en waterstof; D1a_2 –Opzet QRA, effect van ventilatie bij kleine lekkages en aanbevelingen voor maatregelen,” HyDelta, 2022.
- [6] DNV, „Gedrag van waterstof bij lekkages in het distributienet,” 2020.
- [7] KIWA, DNV, „D1a_1_HyDelta_Uitkomsten_onderzoeken_UK,” 2022.