

Proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast

Alliander N.V.

Rapportnummer: OGNL.10130282-071

Datum: 20 februari 2020



Projectnaam:	Proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast	DNV GL
Klant:	Alliander N.V.	Energieweg 17
Contactpersoon:	Pascal te Morsche	9743 AN Groningen
Datum:	20 februari 2020	Tel: +31 (0)6 1528 9995
Afdeling:	Flow & Gas Labs	KvK09006404
Rapportnummer:	OGNL.10130282-071	

Auteur(s):	Geverifieerd:	Voor akkoord:
		
Bert Bierling Senior Specialist Gas Testing & Analysis	Harm Vlap Senior Specialist	Rene Bahlmann Head of Section Flow & Gas Labs

Copyright © 2020, DNV GL Netherlands B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van DNV GL Netherlands B.V. is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren (elektronische kopieën inbegrepen) van het document of een gedeelte daarvan.

Het is verboden om dit document op enige manier te wijzigen, het opsplitsen in delen daarbij inbegrepen. In geval van afwijkingen tussen een elektronische versie (bijv. een pdf-bestand) en de originele door DNV GL verstrekte papieren versie, prevaleert laatstgenoemde.

DNV GL Netherlands B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, toekomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

Distributie binnen DNV GL:

- ☐ Unrestricted distribution (internal and external)
- ☐ Unrestricted distribution within DNV GL Group
- ☐ Unrestricted distribution within DNV GL contracting party
- ☒ No distribution (confidential)

Rev. Nr.	Datum	Reden	Auteur(s)	Geverifieerd	Voor akkoord
	20-02-2020	Eindrapport met extra metingen	B. Bierling	H. Vlap	R. Bahlmann

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	3
1 INLEIDING.....	5
2 AANPAK EN MEETOPSTELLING	6
3 MEETRESULTATEN	11
3.1 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof bij verschillende lekdebieten en de maximaal bereikte gasconcentraties met ventilatieroosters open.	12
3.2 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof bij verschillende lekdebieten en de maximaal bereikte gasconcentraties met afgeplakte ventilatieroosters.	15
3.3 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof, met plafondplaat, en de maximaal bereikte gasconcentraties met open ventilatieroosters.	17
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	18
BIJLAGE A: CONTROLE VAN DE CH ₄ -SENSOREN MET DRIE KALIBRATIEGASSEN MET WATERSTOF IN DE LUCHT	21
BIJLAGE B: ANALYSECERTIFICAAT 50 LITER CILINDER AARDGAS.....	23
BIJLAGE C: GRAFIEKEN 100% AARDGAS, LEKDEBIETEN 1, 3 (24-UURS) ,5, 10, 15, 20 EN 25 LITER PER UUR, OPEN VENTILATIEROOSTERS.....	24
BIJLAGE D: GRAFIEKEN 100% WATERSTOF, LEKDEBIETEN 1, 3 (24-UURS), 5, 10, 15, 20 EN 25 LITER PER UUR, OPEN VENTILATIEROOSTERS.....	30
BIJLAGE E: GRAFIEKEN 100% AARDGAS, LEKDEBIETEN 1, 5 EN 10 LITER PER UUR, VENTILATIEROOSTERS AFGEPLAKT.....	36
BIJLAGE G: GRAFIEKEN 100% AARDGAS EN 100% WATERSTOF, LEKDEBIET 10 LITER PER UUR, MET PLAFONDPLAAT	40
REFERENTIES.....	41

SAMENVATTING

De afgelopen 45 jaren is uitsluitend aardgas aan de huishoudelijke markt geleverd. In de laatste jaren is daar ook groengas bijgekomen. De hoofdcomponenten van aardgas en groengas zijn dezelfde en dit was geen noodzaak tot verder onderzoek naar eventuele gaslekages in meterkasten. In de nabije toekomst zal mogelijk ook waterstof aan het aardgas worden toegevoegd of aardgas zelfs volledig worden vervangen door (100%) waterstof.

Waterstof is slechts op ppm-niveau aanwezig in sommige aardgassen. Waterstof is een erg klein molecuul met een zeer lage dichtheid: de dichtheid van aardgas is ongeveer $0.833 \text{ kg/m}^3(\text{n})$, die van waterstof is $0.09 \text{ kg/m}^3(\text{n})$. Voor de inpassing van waterstof in het gasnetwerk is het van belang te weten hoe het gas zich bij een eventuele lekkage in de meterkast verspreid en hoe hoog de gasconcentraties kunnen oplopen bij verschillende lekdebieten.

De range van uitstroomhoeveelheden is gebaseerd op de NEN7244-7 (Beproevingen) voor aardgas waarbij lekken van 1 tot 5 l/h nog net toegestaan zijn voor bepaalde netdelen.

De uitstroomhoeveelheden van 10, 20 en 25 l/h representeren niet toelaatbare lekgroottes, maar zijn uitgevoerd om een worst case situatie na te bootsen.

Conclusies:

Proeven met open ventilatieroosters:

- De meeste proeven, met ventilatieroosters open, zijn enkel uitgevoerd. Alleen de proeven met aardgas, lekdebiet 15 en 20 l/uur en de proeven met waterstof 15 l/uur zijn in duplo uitgevoerd.
- Door de enkelvoudige metingen krijgen we een indicatie van de gasconcentraties in de meterkast bij verschillende lekdebieten. Deze meetreeksen vormen slechts een indicatie van de concentraties aardgas en waterstof in de meterkast. De gemeten gasconcentraties kunnen niet statistisch onderbouwd worden, hiervoor moeten meer duplo of triplo metingen plaatsvinden.
- De metingen die in duplo zijn uitgevoerd laten een spreiding in de gemeten gasconcentraties zien van circa 15% relatief. Gezien de nauwkeurigheid van de sensoren is dit meer dan acceptabel.
- Bij alle proeven meten de CH_4 -sensoren op 180 en 220 cm de hoogste gasconcentratie
- Bij alle proeven meet de onderste CH_4 -sensor (50 cm) nauwelijks of geen gasconcentraties
- De gasconcentratie van waterstof is bij eenzelfde lekdebiet groter als de gemeten gasconcentratie van aardgas. De factor is circa 1.02. De gemeten gasconcentratie zijn vergelijkbaar (exclusief de meting van 3 l/h waterstof meting).
- De proeven met aardgas en waterstof, met open ventilatieroosters, laten een trend zien die verwacht mag worden. Bij oplopende lekdebieten loopt de gasconcentratie in de kast evenredig op. De gasconcentratie vlakt uiteindelijk af tot circa 2%, zowel voor aardgas als waterstof
- Omdat waterstof veel lichter is dan aardgas was op voorhand te verwachten dat waterstof sneller op zou stijgen, waardoor deze sneller zou verdwijnen door het bovenste ventilatierooster. Uit de gedane proeven is echter gebleken dat de waterstofconcentratie vergelijkbaar is met de aardgasconcentratie, bij dezelfde lekdebieten. Hier is op dit moment nog geen verklaring voor te vinden. Een mogelijke oplossing is het zichtbaar maken van het gas door middel van witte rook.

Proeven met afgeplakte roosters:

- De proeven met aardgas en waterstof, met afgeplakte roosters, laten een duidelijke trend zien.
- De CH₄-sensoren op 120, 180 en 220 cm vanaf de bodem van de meterkast laten een toename zien van de gasconcentratie met een oplopend lekdebiet.
- Concentratie waterstof en methaan liggen in dezelfde ordergrootte met minder variatie (bijna rechte lijnen) en laten geen sinus bewegingen in de meetresultaten zien.
- De proeven met afgeplakte roosters laten een hogere gasconcentratie zien maar de meetwaarde blijft voor beide gassoorten onder de 4%.
- Ventilatioorosters hebben een duidelijk effect op de gemeten gasconcentraties in de meterkast

Aanbevelingen:

Voor sommige proeven voor zowel aardgas als waterstof is er een soort sinus beweging te zien in de gemeten gasconcentraties. Dit verschijnsel kan niet worden verklaard uit veranderingen aan de meetopstelling. De meterkast bevindt zich binnenshuis in een ruimte die niet gevoelig is voor de buitentemperatuur. Temperatuurvariatie van de ruimte waarin de meterkast is opgesteld is $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. In de ruimte is afzuiging aanwezig maar die werkt continue op laag vermogen. In de ruimte waar de meterkast is opgesteld vinden geen andere werkzaamheden plaats.

Een verklaring zou kunnen zijn dat er eerst een gasophoping in de kast plaatsvindt waardoor er een extra ventilatie ontstaat (schoorsteeneffect) en de gasconcentratie zakt. Indien de gasconcentratie afneemt neemt ook de extra ventilatie af en er vormt zich, na een bepaalde periode, weer een stabiel evenwicht. Als er vervolgens langer gas in de meterkast wordt toegevoerd zien we de gasconcentratie weer stijgen. Na een bepaalde periode neemt de extra ventilatie dan weer toe en herhaalt dit proces zich. Dit zou de sinus beweging van de gasconcentratie in de meterkast kunnen verklaren. Bij een schoorsteen is de trek minder bij koude lucht(rookgassen) dan bij warme lucht(rookgassen). Warm gas is lichter en stijgt sneller. Dit is vergelijkbaar met het verschil in dichtheid tussen waterstof en aardgas.

Om deze theorie te onderbouwen zouden er extra proeven moeten worden uitgevoerd met sensoren aan de buitenkant van de kast, vlakbij de bovenste ventilatiooroster. Deze sensor zou tijdens de extra ventilatie een verhoogde gasconcentratie moeten aangeven. Deze test is niet uitgevoerd maar zou in een eventueel vervolgonderzoek kunnen worden meegenomen.

Een tweede theorie is dat er toch een soort werveling van de gassen in de meterkast plaatsvindt die deze sinus bewegingen veroorzaakt.

Bovenstaande zijn slechts theorieën en deze zouden in een vervolgonderzoek moeten worden bevestigd, waarbij het gas zichtbaar is gemaakt door middel van witte rook.

Voorstel voor vervolgonderzoek:

- Onderzoeken of het mogelijk is om witte rook aan de gasstroom toe te voegen
- Plexiglas deur met drie ventilatioorosters (met en zonder plafondplaat)
- Rook toevoegen om werveling van gassen te kunnen waarnemen
- Zwarte achterkant en zijkant om witte rook goed te kunnen waarnemen
- Videocamera om gasstromen (wervelingen of extra ventilatie) te kunnen vastleggen op beeld om deze zichtbaar te maken.

1 INLEIDING

De afgelopen 45 jaren is uitsluitend aardgas aan de huishoudelijke markt geleverd. In de laatste jaren is daar ook groengas bijgekomen. De hoofdcomponenten van aardgas en groengas zijn dezelfde en derhalve was er geen noodzaak tot verder onderzoek naar eventuele gaslekkages in meterkasten. In de nabije toekomst zal mogelijk ook waterstof aan het aardgas worden toegevoegd of aardgas zelfs volledig worden vervangen door (100%) waterstof. Hierdoor is die behoefte er nu wel.

Waterstof is slechts op ppm-niveau aanwezig in sommige aardgassen. Waterstof is een erg klein molecuul met een zeer lage dichtheid: de dichtheid van aardgas is ongeveer $0.833 \text{ kg/m}^3(\text{n})$, die van waterstof is $0.09 \text{ kg/m}^3(\text{n})$. Voor de inpassing van waterstof in het gasnetwerk is het van belang te weten hoe het gas zich bij een eventuele lekkage in de meterkast verspreid en hoe hoog de gasconcentraties kunnen oplopen bij verschillende lekdebieten.

Voor dit project is een houten meterkast gebouwd met de afmetingen, zoals aangegeven in NEN 2768+A1¹. 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 figuur 1 is een foto van de gehele proefopstelling met gesloten meterkast weergegeven.



Figuur 1: Foto proefopstelling met gesloten meterkast

¹ NEN 2768+A1, Meterruimten en bijbehorende bouwkundige voorzieningen in woningen (december 2018)

2 AANPAK EN MEETOPSTELLING

Voorafgaand aan de uitvoering van de experimenten is de proefopzet met Alliander afgestemd. Hierbij is gekozen voor:

- Twee gassoorten:
 - 100% aardgas
 - 100% waterstof
- Uitstroomhoeveelheden (lekdebieten, in l/h) op een zevental niveaus:
 - 0.1*
 - 0.5*
 - 1
 - 5
 - 10
 - 15
 - 20
 - 25

De range van uitstroomhoeveelheden is gebaseerd op de NEN7244-7 (Beproevingen) voor aardgas waarbij lekken van 1 tot 5 l/h nog net toegestaan zijn voor bepaalde netdelen.

De uitstroomhoeveelheden van 10, 20 en 25 l/h representeren niet toelaatbare lekgroottes, maar zijn uitgevoerd om een worst-case situatie na te bootsen.

Meterkast

De houten meterkast is gemaakt van 18 mm multiplex. In de meterkast zijn vier CH₄ (methaan) sensoren en vier waterstofsensoren op verschillende hoogtes in de meterkast bevestigd; 50 cm, 120 cm, 180 cm en 220 cm (zie figuur 2). Tevens is een (niet werkende) gasmeter in de meterkast ingebouwd. Als alternatief voor de elektra installatie zijn kartonnen dozen in de kast bevestigd. Op de inkomende aansluiting is een 6 mm Teflon slang (inwendige diameter 4 mm) vastgemaakt waarmee het lek bij de gasmeter is gesimuleerd. De aansluitingen door de houten meterkast (kabels enz.) zijn afgedicht. De kast is voorzien van twee ventilatieroosters (0.02 m²), die op 20 cm vanaf de bovenkant en 20 cm hoogte vanaf de onderkant zijn gemaakt in de deur van de kast. In overleg met Alliander is besloten ook een aantal proeven uit te voeren met afgeplakte roosters, omdat er in de praktijk ook nog veel meterkasten zijn zonder ventilatieopeningen. De meterkast is te voorzien van een extra plafondplaat, die op 41 cm hoogte vanaf de bovenkant in de kast kan worden geplaatst. De meterkast is binnen opgesteld om eventuele verstoringen van wind etc. tegen te gaan.

Voor de afmetingen van de meterkast is de NEN-norm gebruikt. De afmetingen zijn als volgt:

Inwendige hoogte	2400 mm
Inwendige breedte	770 mm
Inwendige diepte	350 mm

De lege meterkast heeft een inhoud van 647 liter.

* Deze metingen zijn achteraf niet uitgevoerd omdat er bij een lekdebiet van 1 l/h al nauwelijks gas wordt gemeten. De gasconcentratie ligt dan onder het detectieniveau van de gebruikte CH₄-sensoren.



Figuur 2A: Meterkast, voorzien van een niet-werkende gasmeter, kartonnen dozen als alternatief voor de elektriciteitsmeter en waterstof- en CH₄-sensoren.



Figuur 2B: Geopende meterkast met plafondplaat

Gebruikte apparatuur/gassen:

Sensoren:

Om het uitstroomprofiel niet te beïnvloeden is gebruik gemaakt van diffusiesensoren, die normaliter worden ingezet voor ruimtebewaking. De gebruikte sensoren en de besturing- en data-acquisitie (DAQ) kast zijn van het merk Buveco. De DAQ zorgt voor de voeding en de uitlezing van de meetwaarden. Aan de DAQ is een USB-stick gekoppeld, waarop de meetwaarden worden gelogd. De logfrequentie van de meetwaarden is één keer per seconde. De gelogde meetdata zijn met het programma Easyconverter te converteren naar een in Excel databestand. Het meetprincipe van beide sensoren berust op een katalytische verbranding.

De beide type sensoren zijn voorafgaand aan de testen door Buveco Gasdetection B.V in Bleiswijk gekalibreerd. De nauwkeurigheid van de sensoren is circa 10% relatief (opgave Buveco).

Van de CH₄-sensoren is bekend dat deze ook reageren op waterstof. Volgens opgave van de leverancier geeft 1000 ppm waterstof een meetwaarde van 2.38 mol% op de CH₄-sensoren. De CH₄-sensoren zijn door DNV GL gecontroleerd met kalibratiegassen (waterstof in lucht).

Uit deze controle, die is opgenomen in bijlage A, is gebleken dat de CH₄-sensoren bij 1000 ppm waterstof een gemiddelde waarde van 2.8 mol% LEL aangeven. Bij de verwerking van de meetresultaten is gerekend met deze laatste waarde.

- CH₄-sensoren : Bucom ST650EX, meetbereik 0-100% LEL, 100% LEL is 4.4 vol% CH₄.
- Waterstof sensoren : Butox ST450EC, meetbereik 0-1000 ppm H₂, meetwaarde is 0-100.
- Besturing/uitleeskast : BU-Touch 8 kanaals gasdetectiecentrale.

Mass flow controllers:

De gasuitstroom is ingesteld met behulp van mass flowcontrollers.

- Mass flow meter 1 : Tagnummer C9056, GTS-003F, S.N. M4206383C,
Meetbereik : 0 - 500 ml/min. aardgas 20°C, 1 bar
: 0 - 654 ml/min. waterstof 20°C, 1 bar.
- Mass flow meter 2 : Tagnummer C0245, GTS-002F, S.N. 98202379B,
Meetbereik : 0 - 200 ml/min. aardgas 20°C, 1 bar
: 0 - 264 ml/min. waterstof 20°C, 1 bar.
- Regelklep : Tagnummer C9004, GTS-004V, S.N. M1204965A, diameter 0.14 mm.

Gassen:

- Aardgas: voor aardgas is een on-geodoriseerd aardgas, Slochteren-kwaliteit gebruikt. Het analysecertificaat van de gassamenstelling is weergegeven in Bijlage B.
- Waterstof: synthetisch waterstof, kwaliteit 5.0 (zuiverheid > 99,999%)

Plaats uitstroomopening gassen:

De plaats van de uitstroomopening van de gassen is als volgt:

57 cm vanaf de onderkant van de meterkast

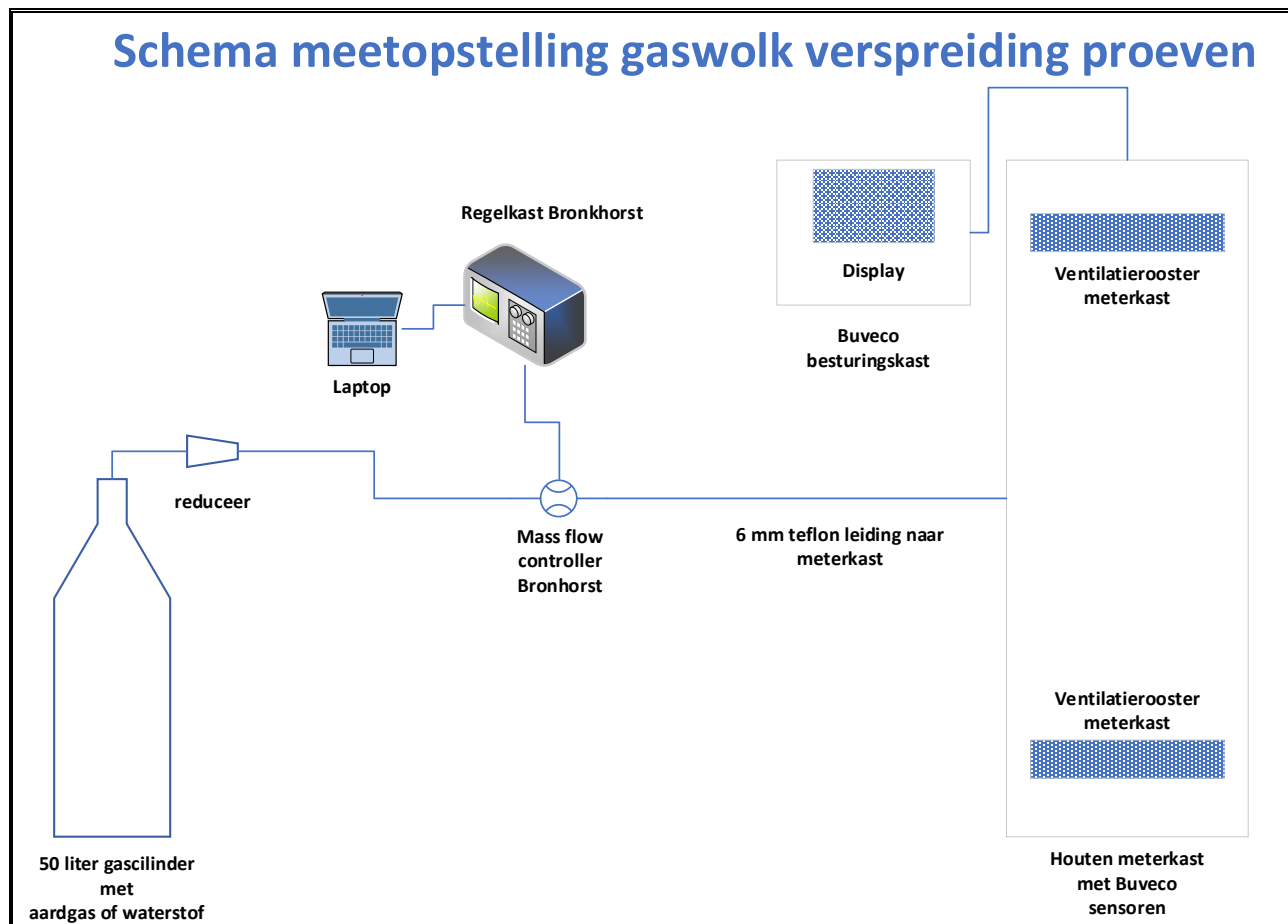
31 cm vanaf de linkerkant van de meterkast

13 cm vanaf de achterkant van de meterkast

De uitstroom van het gas is bij alle gebruikte lekken turbulent

Meetopstelling:

De gehele meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Schematische weergave meetopstelling

Meetprocedure:

De experimenten zijn uitgevoerd conform een standaardprocedure, die navolgend puntsgewijs zijn verwoord.

- Voorafgaand aan de metingen zijn de sensoren gespoeld met lucht, zodat er geen aardgas- of waterstofconcentratie wordt gemeten. De deur van de meterkast is hiervoor geopend.
- De deur van de meterkast wordt gesloten en de deurnaden worden rondom afgeplakt met tape. Dit wordt gedaan om het kieren (kromtrekken door luchtvochtigheid) van de houten deur te voorkomen.
- De cilinder met gas wordt opengedraaid en het gewenste lekdebiët wordt in de software ingesteld.
- De meting wordt gestart en de starttijd wordt genoteerd
- De meting wordt zolang uitgevoerd totdat er een stabiele situatie is ontstaan. Dit wordt geconstateerd door de meetwaarden uit te lezen.
- Aan het einde van de meting wordt de gasflow naar de meterkast gestaakt en de eindtijd genoteerd.
- De meterkast wordt geopend, zodat de sensoren (opnieuw) met lucht kunnen worden gespoeld. De volgende proef kan worden gestart als de uitlezing van de sensoren weer op nul staan.



Zoals voorgaand gememoreerd, moeten de sensoren eerst gespoeld worden met voldoende lucht om weer op de nul waarde uit te komen. Omdat er geen actieve flow door de sensoren stroomt, maar de sensoren door diffusie moeten spoelen, kan dit kan in sommige gevallen wel enkele dagen duren. Vandaar dat in de grafieken het langzaam teruglopen van de CH₄-sensoren is waar te nemen.

Berekeningen:

Voor het berekenen van de aardgas-, methaan- en waterstofconcentraties zijn de navolgende formules gebruikt:

- LEL CH₄ naar vol% CH₄ : $((\%LEL/100)*4.4)$
- % LEL naar mol% H₂ : $((\%LEL/2.8)/10)$
- vol% CH₄ naar vol% aardgas : $((\%CH_4*100)/81.26)$

3 MEETRESULTATEN

De waterstofsensoren hebben een meetbereik van 0-1000 mol ppm. Tijdens de proeven bleek al snel dat de gemeten concentraties waterstof boven de 1000 mol ppm uitkwam waardoor deze sensoren niet konden worden gebruikt. Er is overleg met Buveco geweest of het meetbereik van deze sensoren zou kunnen worden aangepast. De enigste optie was om de sensoren anders te kalibreren. Het meetbereik zou dan 0-2000 mol ppm worden. Dit nieuwe meetbereik blijkt ook te laag en er is voor gekozen het bestaande meetbereik te handhaven en gebruik te gaan maken van de CH₄-sensoren. Deze CH₄-sensoren zijn ook gevoelig voor waterstof. Volgens Buveco zouden de CH₄-sensoren per 1000 ppm waterstof 2.38% LEL aangeven.

Als eerste zijn er proeven uitgevoerd met 100% aardgas en 100% waterstof.

Voor de duur van elke test is data uit het aangemaakte logbestand naar een Excel databestand geïmporteerd. Deze Excel bestanden zijn, per email, aan Alliander ter beschikking gesteld.

- ✚ Voor 100% aardgas zijn, na overleg met Alliander, de volgende lekdebiet proeven uitgevoerd; 1, 3 (24-uurs test), 5, 10, 15, 20 en 25 liter per uur.

Voor de grafieken van de 100% aardgasproeven, met verschillende lekdebieten, zie bijlage C.

- ✚ Voor 100% waterstof zijn, na overleg met Alliander, de volgende lekdebiet proeven uitgevoerd; 1, 3 (24-uurs test), 5, 10, 15, 20 en 25 liter per uur.

Voor de grafieken van de 100% waterstofproeven, met verschillende lekdebieten, zie bijlage D.

De houten deur kan afhankelijk van de vochtigheid krom trekken en er kan dan ongewenste ventilatie ontstaan. Daarom zijn de naden afgeplakt met tape.

In overleg met Alliander is besloten ook nog een aantal proeven uit te voeren met afgeplakte roosters, omdat er in de praktijk nog veel meterkasten zijn zonder ventilatieopeningen.

Voor 100% aardgas zijn de volgende lekdebiet proeven uitgevoerd;

1, 5 en 10 liter per uur.

- ✚ Voor 100% waterstof zijn de volgende lekdebiet proeven uitgevoerd; 1, 5 en 10 liter per uur.

Voor de grafieken van de proeven met afgeplakte roosters, met verschillende lekdebieten, zie bijlage E (aardgas) en bijlage F (waterstof).

Er zijn 2 metingen uitgevoerd om te toetsen wat het effect van een plafondplaat is:

- 1x met aardgas bij 10 liter uur
- 1x met waterstof bij 10 liter per uur

Voor de grafieken van deze proeven zie bijlage G.

Na de resultaten van bovenstaande proeven te hebben beoordeeld en om meer zekerheid/betrouwbaarheid over bovenstaande proeven te krijgen zijn, aan het einde van de eerste reeks proeven, nog een aantal aanvullende metingen uitgevoerd:

1. H₂:
 - a. 3 l/h (24 uur door laten lopen, roosters open zonder plafondplaat)
 - b. 15 l/h (roosters open zonder plafondplaat)
 - c. 20 l/h (roosters open zonder plafondplaat)
2. Aardgas:
 - a. 3 l/h (24 uur door laten lopen, roosters open zonder plafondplaat)
 - b. 10 l/h (roosters open zonder plafondplaat)
 - c. 20 l/h (roosters open zonder plafondplaat)

De aanvullende metingen zijn in de tabellen en grafieken aangegeven als:

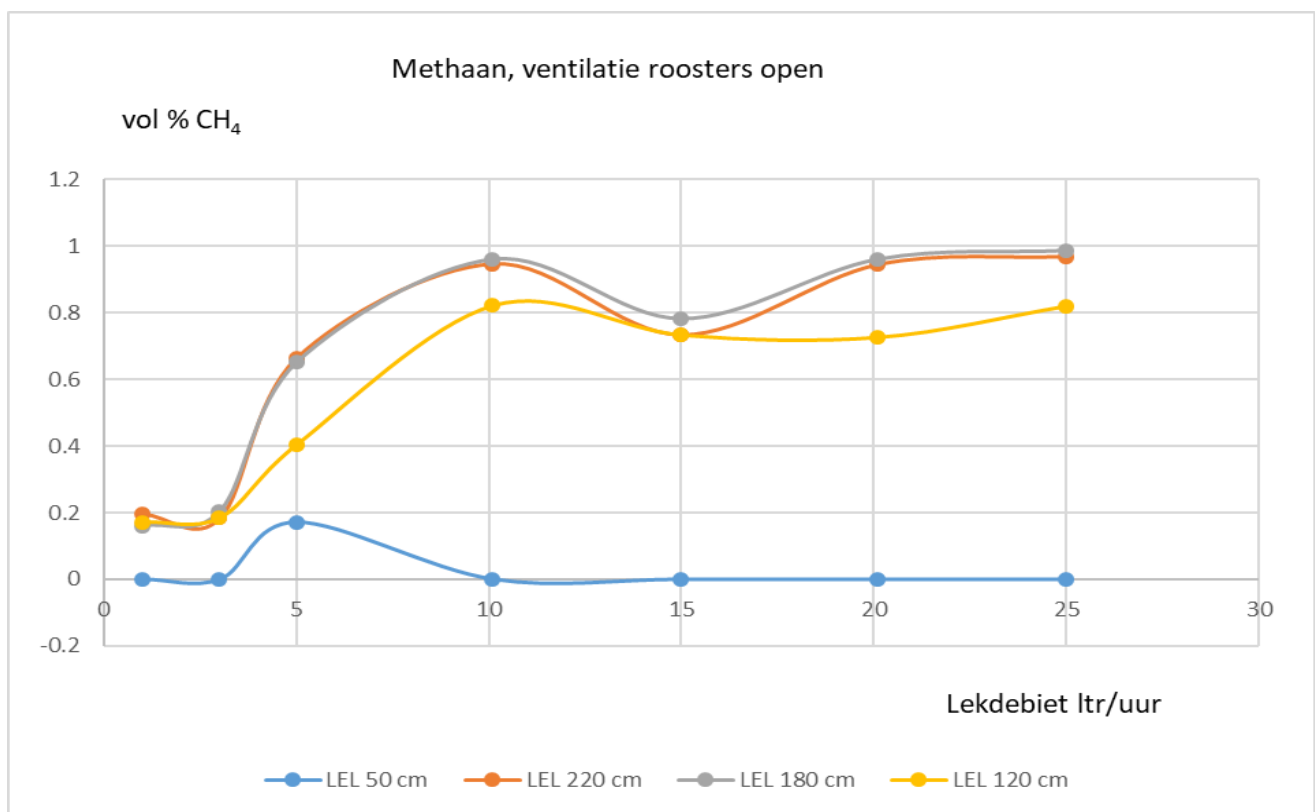
- 3 l/h (H₂ en aardgas) als 3
- 10 l/h (AG) als 10.1
- 15 l/h (H₂) als 15.1
- 20 l/h (H₂ en aardgas) als 20.1

3.1 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof bij verschillende lekdebieten en de maximaal bereikte gasconcentraties met ventilatieroosters open.

	Maximaal bereikte concentraties in vol % CH ₄			
Aardgas Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
1	0	0.172	0.159	0.196
3 (24-uur test)	0	0.185	0.204	0.184
5	0	0.405	0.652	0.665
10.1	0	0.823	0.961	0.947
15	0	0.734	0.782	0.774
20.1 3e meting	0	0.727	0.961	0.945
25	0	0.821	0.987	0.969

Tabel I: Testen met aardgas en de maximaal bereikte concentraties

Om bovenstaande gegevens inzichtelijker te maken zijn de waarden in onderstaande grafiek uitgezet.



Voor lekdebit 15 en 20 liters/uur zijn 2 metingen uitgevoerd. Beide metingen zijn in onderstaande tabel weergegeven.

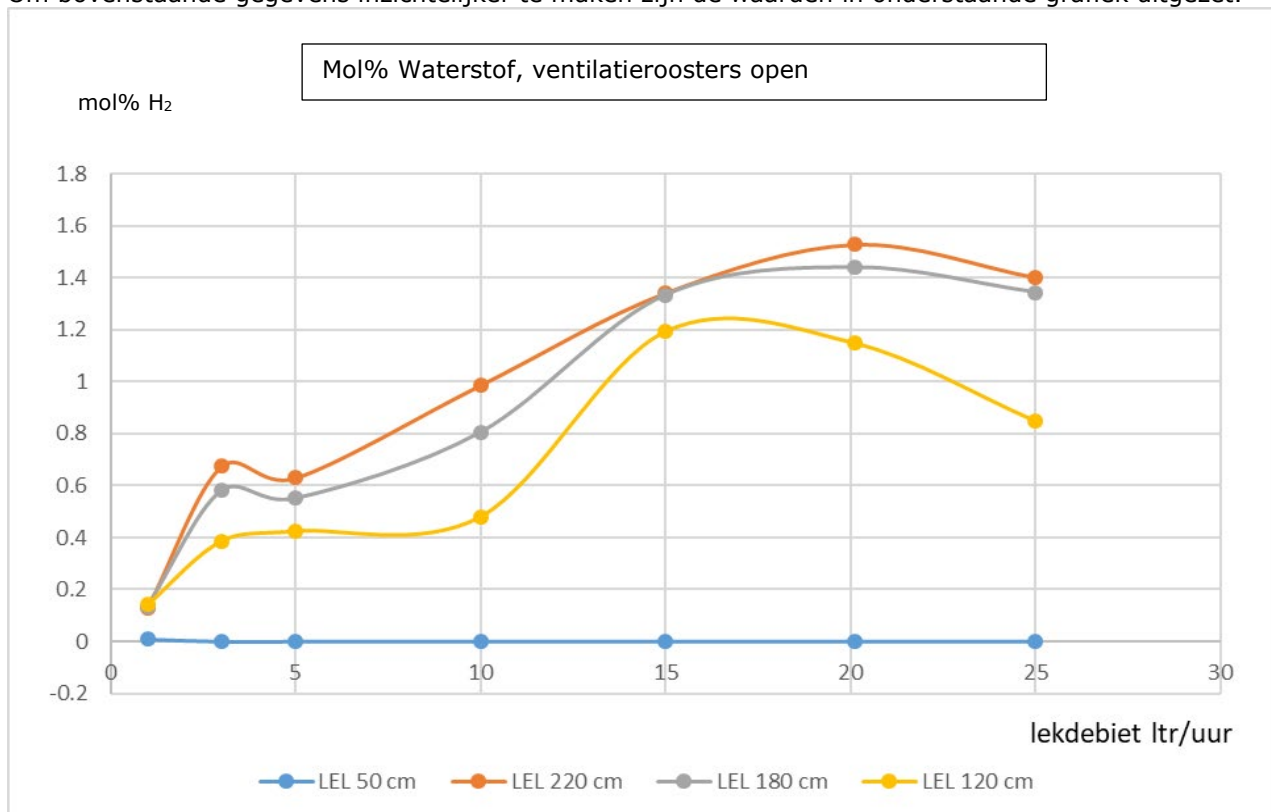
	Maximaal bereikte concentraties in vol % CH ₄			
Aardgas	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
Lekdebit in liters/uur				
15	0	0.734	0.782	0.774
15.1	0	0.628	0.721	0.724
20 2 ^e meting	0	0.744	0.872	0.856
20.1 3 ^e meting	0	0.727	0.961	0.945

De waarden in bovenstaande tabel geven een indruk over de herhaalbaarheid van de metingen.

	Maximaal bereikte concentraties in mol % H ₂ berekend uit de CH ₄ -sensoren			
Waterstof Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
1	0.008	0.142	0.135	0.127
3 (24-uur test)	0	0.387	0.580	0.674
5	0	0.426	0.551	0.630
10 2 ^e meting	0	0.481	0.805	0.987
15	0	1.403	1.540	1.580
20	0	1.148	1.440	1.530
25	0	0.848	1.344	1.403

Tabel II: Testen met waterstof en de maximaal bereikte concentraties

Om bovenstaande gegevens inzichtelijker te maken zijn de waarden in onderstaande grafiek uitgezet.



De proef bij 3 liters/uur laten hogere meetwaarden zien dan de proef bij 5 liters/uur. Dit was niet verwacht. Deze meetwaarden passen niet goed tussen de andere metingen. De test met 5 liter per uur is echter eenmalig uitgevoerd. Om meer zekerheid over dit meetpunt te krijgen zouden er meer metingen moeten worden uitgevoerd.

Voor lekdebiet 15 liters/uur zijn 2 metingen uitgevoerd. Beide metingen zijn in onderstaande tabel weergegeven.

	Maximaal bereikte concentraties in mol % H ₂ berekend uit de CH ₄ -sensoren			
Waterstof Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
15	0	1.403	1.540	1.580
15.1	0	1.411	1.316	1.025

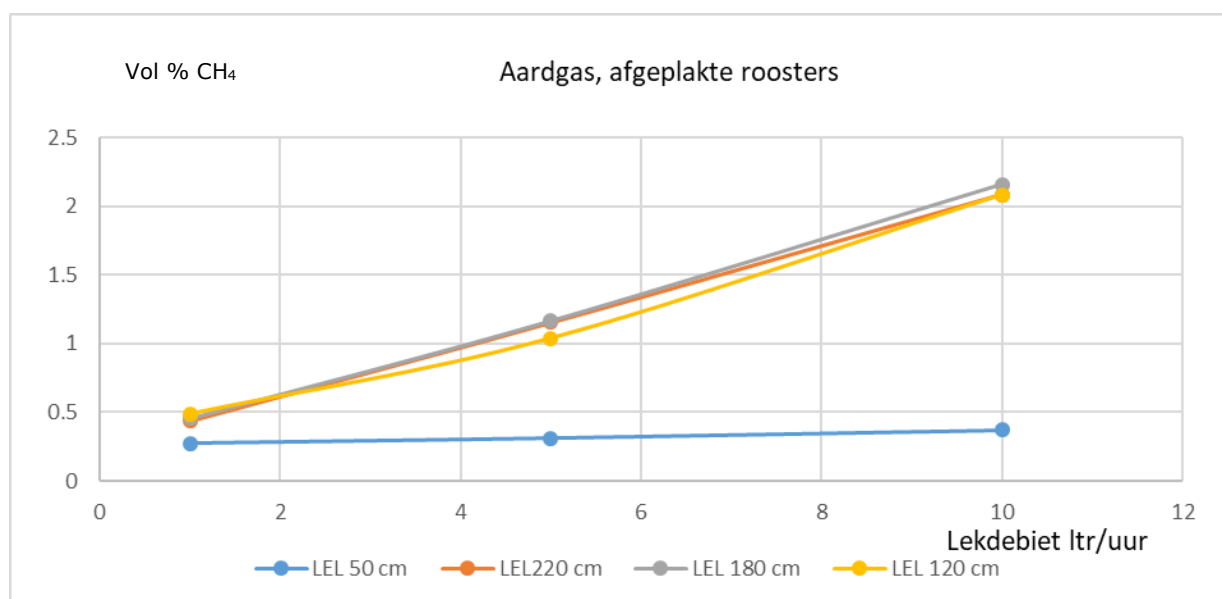
De waarden in bovenstaande tabel geven een indruk over de herhaalbaarheid van de metingen.

3.2 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof bij verschillende lekdebieten en de maximaal bereikte gasconcentraties met afgeplakte ventilatieroosters.

	Maximaal bereikte concentraties in vol % CH ₄			
Aardgas Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
1 2e meting	0.274	0.489	0.455	0.438
5	0.313	1.039	1.166	1.153
10	0.372	2.082	2.159	2.083

Tabel III: Testen met aardgas en de maximaal bereikte concentraties

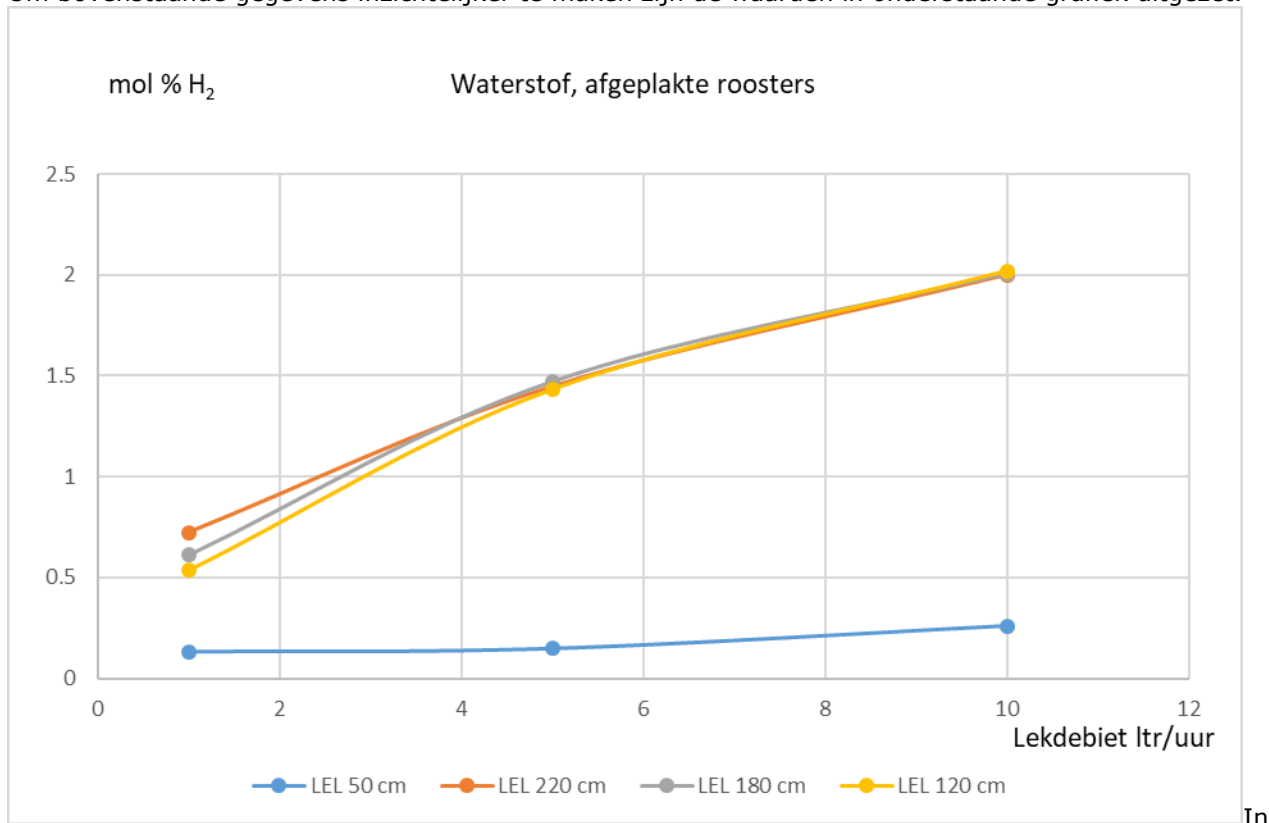
Om bovenstaande gegevens inzichtelijker te maken zijn de waarden in onderstaande grafiek uitgezet.



	Maximaal bereikte concentraties in mol % H ₂ berekend uit de LEL-sensoren			
Waterstof Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
1	0.133	0.536	0.611	0.723
5	0.149	1.433	1.471	1.447
10	0.260	2.020	2.007	2.001

Tabel IV: Testen met waterstof en de maximaal bereikte concentraties

Om bovenstaande gegevens inzichtelijker te maken zijn de waarden in onderstaande grafiek uitgezet.



Bovenstaande grafieken en tabellen, met afgeplakte roosters voor beide gassoorten, is te zien dat bij oplopend lekdebiet de gasconcentraties stijgen. De gasconcentraties van methaan en waterstof zijn in dezelfde ordegrootte. Dit ligt in de lijn der verwachting.

De aardgasconcentratie ligt ten opzichte van de waterstofconcentratie, bij het grootste lekdebiet van 10 liter/uur, circa 10% hoger.

Bij kleinere lekdebieten ligt de waterstofconcentratie lager dan de aardgasconcentratie.

3.3 Tabellen van de testen met aardgas en waterstof, met plafondplaat, en de maximaal bereikte gasconcentraties met open ventilatieroosters.

	Maximaal bereikte concentraties in vol % CH ₄			
Aardgas Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
10	0	2.228	2.261	1.356

	Maximaal bereikte concentraties in mol % H ₂ berekend uit de CH ₄ -sensoren			
Waterstof Lekdebiet in liters/uur	LEL 50 cm	LEL 120 cm	LEL 180 cm	LEL 220 cm
10	0.115	1.906	1.789	1.387

Voor de grafieken van bovenstaande proeven zie bijlage G.

Opmerking: De plafondplaat zit onder het bovenste ventilatierooster. Zie ook figuur 2B. De metingen met de plafondplaat zijn indicatief en simuleren de situatie dat het bovenste rooster is afgedicht.

De bovenste CH₄-sensor (LEL 220) zit boven de plafondplaat. Uit bovenstaande tabellen blijkt dat deze CH₄-sensor voor zowel waterstof als aardgas een lagere concentratie aangeeft dan de sensor die net onder de plafondplaat zit (LEL 180). Dit is in de lijn der verwachtingen omdat het gas nog kan ontsnappen uit het bovenste ventilatierooster.

De aardgasconcentratie is bij deze eenmalige proeven hoger dan de waterstofconcentratie.

4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies:

Proeven met open ventilatieroosters:

- De metingen die in duplo zijn uitgevoerd laten een spreiding in de gemeten gasconcentraties zien van circa 15% relatief. Gezien de nauwkeurigheid van de sensoren is dit meer dan acceptabel.
- Bij alle proeven meten de CH₄-sensoren op 180 en 220 cm de hoogste gasconcentratie
- Bij alle proeven meet de onderste CH₄-sensor (50 cm) nauwelijks of geen gasconcentraties
- De gasconcentratie van waterstof is bij eenzelfde lekdebiet groter als de gemeten gasconcentratie van aardgas. De factor is circa 1.02. De gemeten gasconcentratie zijn vergelijkbaar (exclusief de meting van 3 l/h waterstof meting).
- De proeven met aardgas en waterstof, met open ventilatieroosters, laten een trend zien die verwacht mag worden. Bij oplopende lekdebieten loopt de gasconcentratie in de kast evenredig op. De gasconcentratie vlakkt af tot circa 2%, zowel voor aardgas als waterstof
- Omdat waterstof veel lichter is dan aardgas was op voorhand te verwachten dat waterstof sneller op zou stijgen, waardoor deze sneller zou verdwijnen door het bovenste ventilatie rooster. Uit de gedane proeven is echter gebleken dat de waterstof concentratie vergelijkbaar is met de aardgas concentratie, bij dezelfde lekdebieten. Hier is op dit moment nog geen verklaring voor te vinden. Een mogelijke oplossing is het zichtbaar maken van het gas door middel van witte rook.

Proeven met afgeplakte roosters:

- De proeven met aardgas en waterstof, met afgeplakte roosters, laten een duidelijke trend zien.
- De CH₄-sensoren op 120, 180 en 220 cm vanaf de bodem van de meterkast laten een toename zien van de gasconcentratie met een oplopend lekdebiet.
- Concentratie waterstof en methaan liggen in dezelfde ordergrootte met minder variatie (bijna rechte lijnen) en laten geen sinus bewegingen in de meetresultaten zien.
- De proeven met afgeplakte roosters laten een hogere gasconcentratie zien maar de meetwaarde blijft voor beide gassoorten onder de 4%.
- Ventilatioosters hebben een duidelijk effect op de gemeten gasconcentraties in de meterkast

Aanbevelingen:

Voor sommige proeven voor zowel aardgas als waterstof is er een soort sinus beweging te zien in de gemeten gasconcentraties. Dit verschijnsel kan niet worden verklaard uit veranderingen aan de meetopstelling. De meterkast bevindt zich binnenshuis in een ruimte die niet gevoelig is voor de buitentemperatuur. Temperatuur variatie van de ruimte waarin de meterkast is opgesteld is $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. In de ruimte is afzuiging aanwezig maar die werkt continue op laag vermogen. Op de meterkast is geen directe instraling van zonlicht. In de ruimte waar de meterkast is opgesteld vinden geen andere werkzaamheden plaats.

Een verklaring zou kunnen zijn dat er eerst een gasophoping in de kast plaatsvindt waardoor er een extra ventilatie ontstaat (schoorsteen effect) en de gasconcentratie zakt. Indien de gasconcentratie afneemt neemt ook de extra ventilatie af en er vormt zich, na een bepaalde periode, weer een stabiel evenwicht. Als er vervolgens langer gas in de meterkast wordt toegevoerd zien we de gasconcentratie weer stijgen. Na een bepaalde periode neemt de extra ventilatie dan weer toe en herhaalt dit proces zich. Dit zou de sinus beweging van de gasconcentratie in de meterkast kunnen verklaren. Bij een schoorsteen is de trek minder bij koude lucht(rookgassen) dan bij warme lucht(rookgassen). Warm gas is lichter en stijgt sneller. Dit is vergelijkbaar met het verschil in dichtheid tussen waterstof en aardgas.



Om deze theorie te onderbouwen zouden er extra proeven moeten worden uitgevoerd met sensoren aan de buitenkant van de kast, vlakbij de bovenste ventilatierooster. Deze sensor zou tijdens de extra ventilatie een verhoogde gasconcentratie moeten aangeven.

Een tweede theorie is dat er toch een soort werveling van de gassen in de meterkast plaatsvindt die deze sinus bewegingen veroorzaakt.

Bovenstaande zijn slechts theorieën en deze zouden in een vervolgonderzoek moeten worden bevestigd, waarbij het gas zichtbaar is gemaakt door middel van witte rook.

Discussie:

- De meeste proeven, met ventilatieroosters open, zijn enkel uitgevoerd. Alleen de proeven met aardgas, lekdebiet 15 en 20 l/uur en de proeven met waterstof 15 l/uur zijn in duplo uitgevoerd.
- Door de eenvoudige metingen krijgen we een indicatie van de gasconcentraties in de meterkast bij verschillende lekdebieten. Deze meetreeksen vormen slechts een indicatie van de concentraties aardgas en waterstof in de meterkast. De gemeten gasconcentraties kunnen niet statistisch onderbouwd worden, hiervoor moeten meer duplo of triplo metingen plaatsvinden.

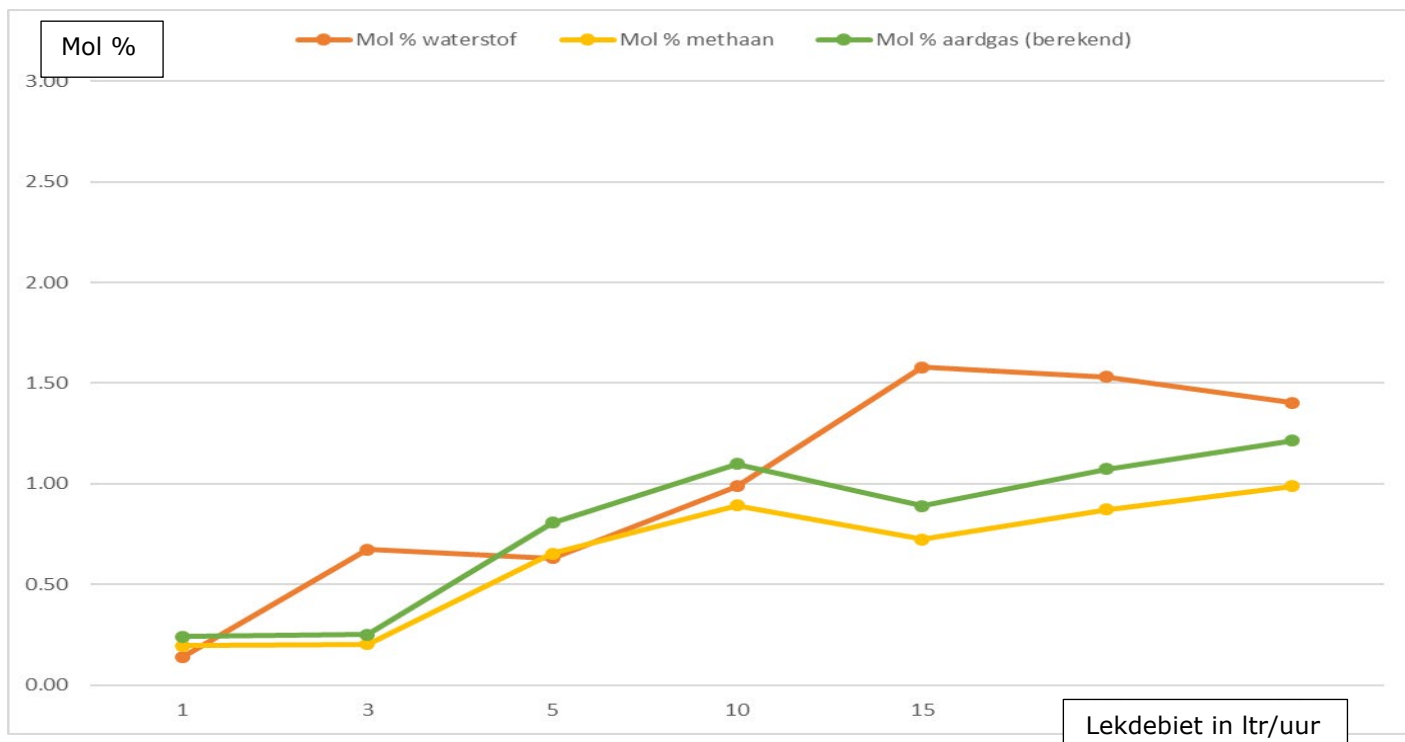
Voorstel voor vervolgonderzoek:

- Onderzoeken of het mogelijk is om witte rook aan de gasstroom toe te voegen
- Plexiglas deur met drie ventilatieroosters (met en zonder plafondplaat)
- Rook toevoegen om werveling van gassen te kunnen waarnemen
- Zwarte achterkant en zijkant om witte rook goed te kunnen waarnemen
- Videocamera om gasstromen (wervelingen of extra ventilatie) te kunnen vastleggen op beeld om deze zichtbaar te maken.

Verzamelgrafieken lekdebieten en gassen.

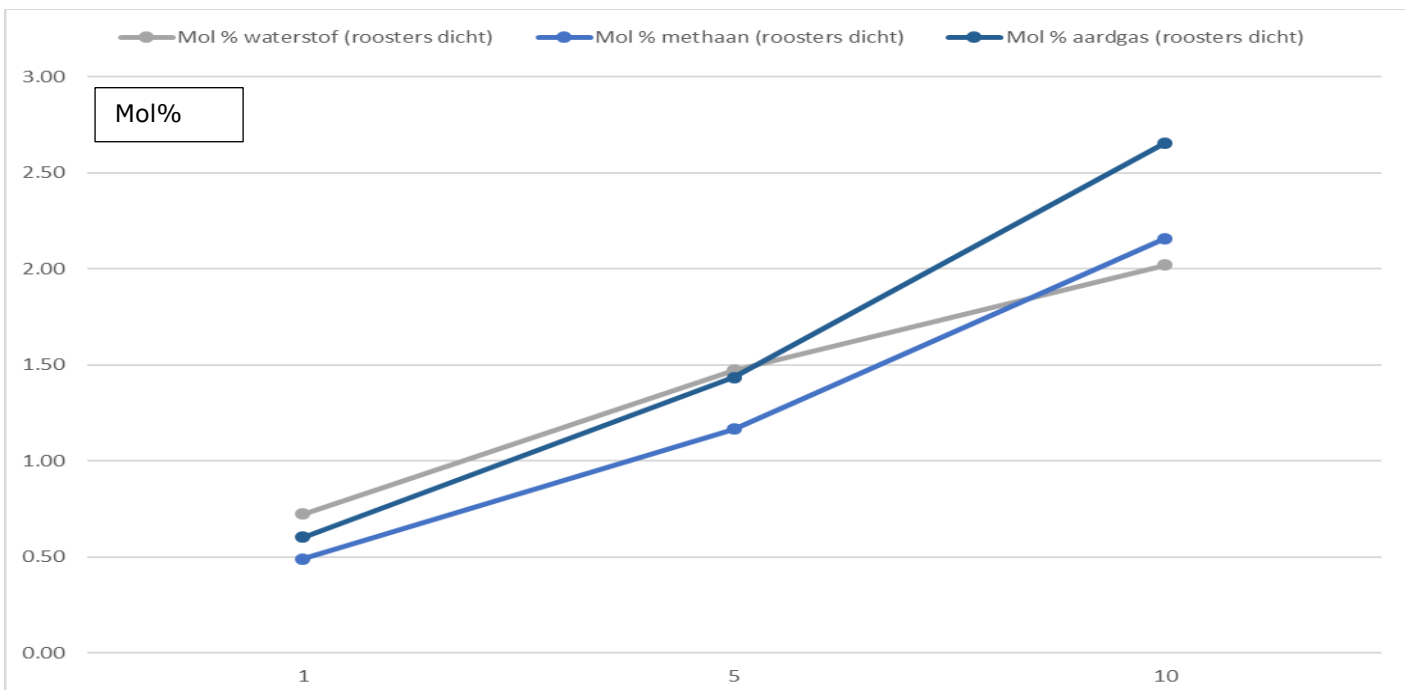
Onderstaande grafiek is een samengestelde grafiek waarbij vanuit de methaanconcentratie de aardgasconcentratie is berekend. Ter vergelijking is de waterstofconcentratie ook bij deze grafiek ingezet.

De ventilatieroosters zijn open.



Onderstaande grafiek is een samengestelde grafiek waarbij vanuit de methaanconcentratie de aardgasconcentratie is berekend. Ter vergelijking is de waterstofconcentratie ook bij deze grafiek ingezet.

De ventilatieroosters zijn dicht.



BIJLAGE A: CONTROLE VAN DE CH₄-SENSOREN MET DRIE KALIBRATIEGASSEN MET WATERSTOF IN DE LUCHT

De bovenste CH₄-sensor (LEL 220) is eerst gecontroleerd. Vervolgens zijn de CH₄-sensoren LEL 180, LEL 120 en LEL 50 gecontroleerd. Per sensor is het kalibratiegas circa 5 minuten over de sensor geleid met een flow van 30 lt/uur.

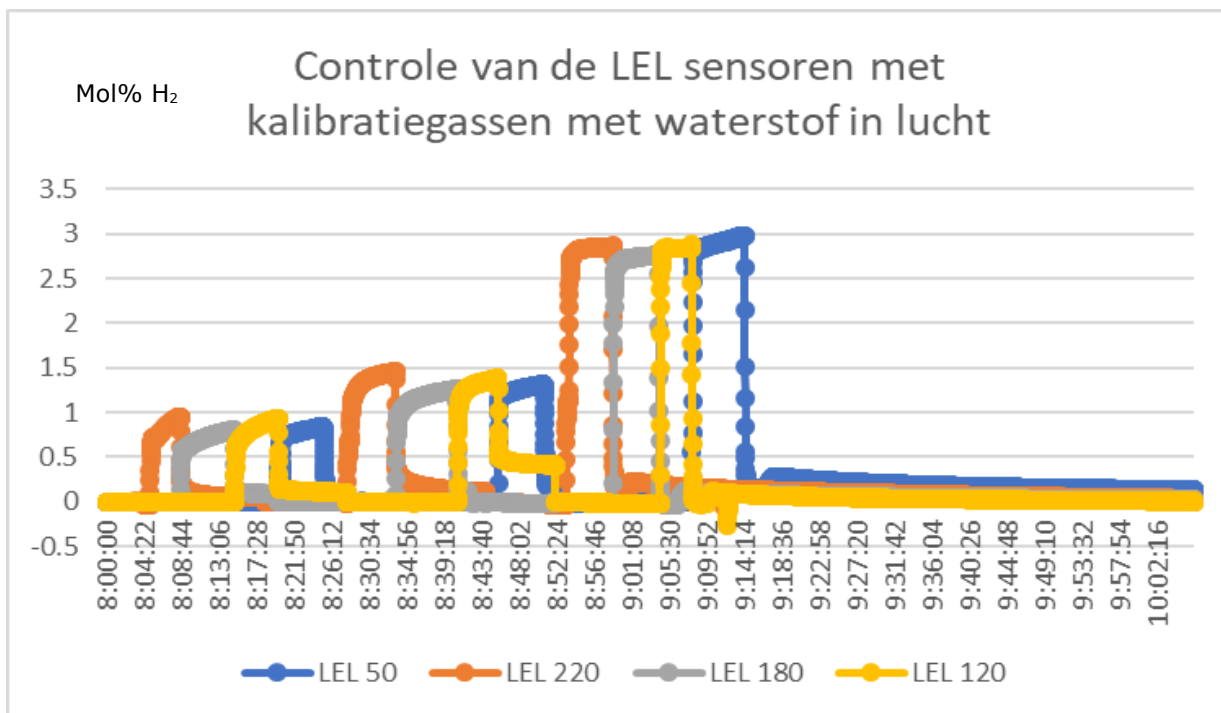
	Gas 1	Gas 2	Gas 3
Concentratie H ₂	0.743 mol%	1.095 mol%	2.57 mol%
	Meetwaarde CH₄-sensor		
LEL 50	20.09	31.26	70.84
LEL 120	22.18	32.94	68.64
LEL 180	19.18	30.14	65.62
LEL 220	22.21	34.59	67.85

Berekening van de factorgevoeligheid LEL-sensoren voor waterstof:

Factor = Gemeten LEL-waarde / (Conc. H₂ in kal. Gas/10)

De gemiddelde factor voor alle sensoren komt uit op 2.80.

Dit houdt in dat per 1000 mol ppm waterstof de CH₄-sensoren 2.80 mol% LEL aangeven. Met deze factor zijn alle meetwaarden voor de berekening van de waterstofconcentratie gecorrigeerd.



Foto's van de LEL-sensoren met kalibratie adapteropzet.

BIJLAGE B: ANALYSECERTIFICAAT 50 LITER CILINDER AARDGAS

Gascomposition and physical properties

Samplenummer :	MOE-1309-119	Date :	20.06.2019
Samplelocation :	NOORD-NEDERLAND (G)	Cylinder number :	1648221
Samplecode :	A-695-NM-1111-UR	Sampledate from :	26.09.2013 until
Customer :	DNV GL	Analyst :	R.Ziesel
Sampletype :	Moedergas	Date of analysis :	26.09.2013
		Device :	GC1

Analysis according to ISO 6974

Component	Concentration (mol%)
Helium	0.047
Hydrogen	0.000
Oxygen	0.000
Nitrogen	14.189
Carbondioxide	1.048
Methane	81.260
Ethane	2.831
n-Propane	0.388
2-Methylpropane	0.064
n-Butane	0.073
2,2-Dimethylpropane	0.008
2-Methylbutane	0.018
n-Pentane	0.017
Cyclopentane	0.000
2,2-Dimethylbutane	0.006
2,3-Dimethylbutane + 2-Methylpentane	0.005
3-Methylpentane	0.002
n-Hexane	0.006
Cyclohexane	0.005
Benzene	0.015
Heptanes	0.007
Methylcyclohexane	0.003
Toluene	0.003
Octanes	0.004
Total sum	100.000

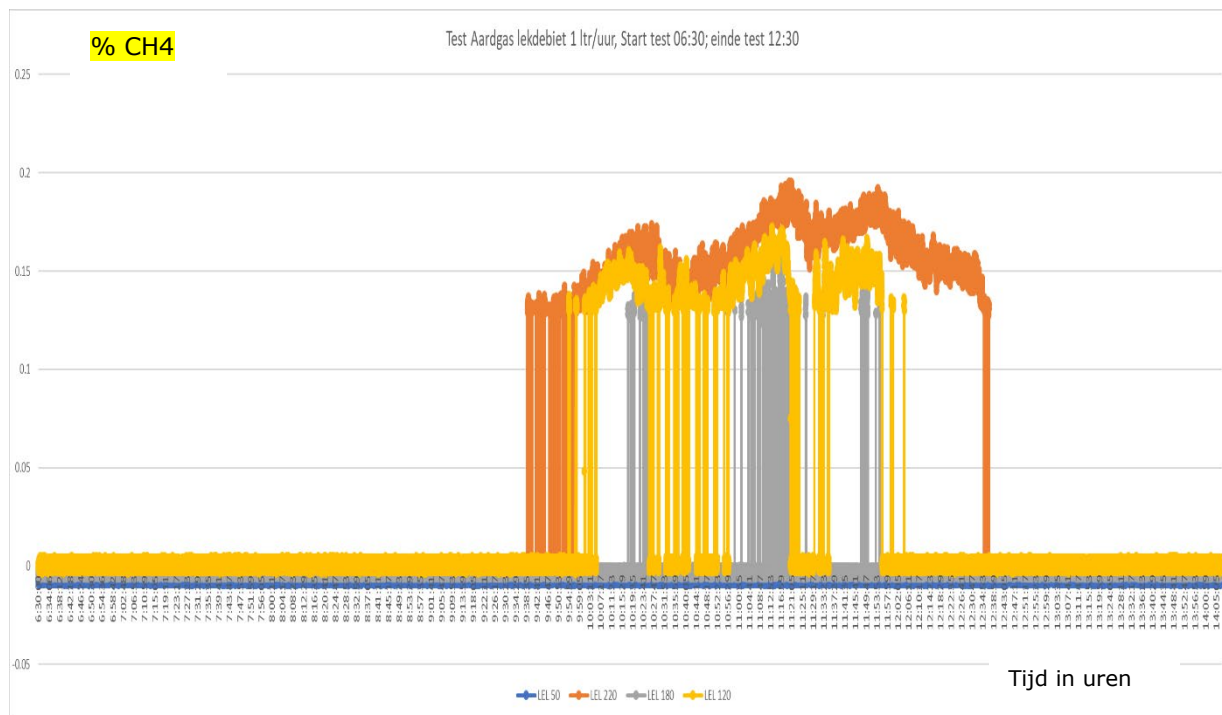
Physical properties according to ISO 6976 (1995), table 3

Calorific value, superior	35.07	MJ/m ³
Calorific value, inferior	31.65	MJ/m ³
Hi/Hs	0.9024	
Wobbe index	43.66	MJ/m ³
Relative density	0.6453	
Density	0.8343	kg/m ³

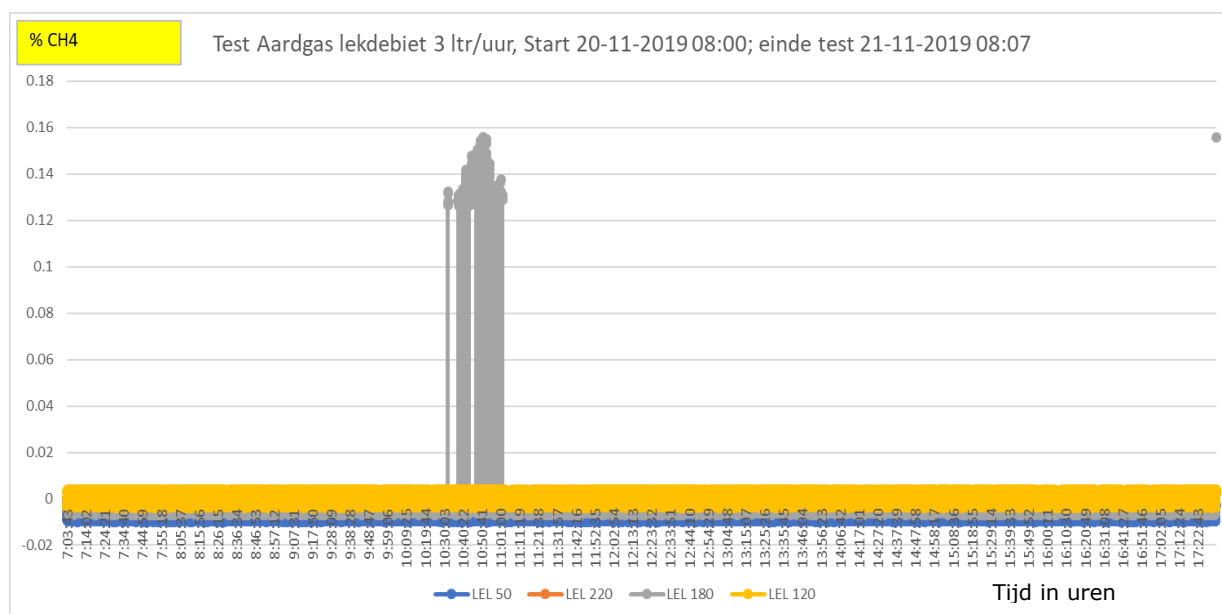
Remark Bepalen grenswaarden.

BIJLAGE C: GRAFIEKEN 100% AARDGAS, LEKDEBIETEN 1, 3 (24-UURS) ,5, 10, 15, 20 EN 25 LITER PER UUR, OPEN VENTILATIEROOSTERS

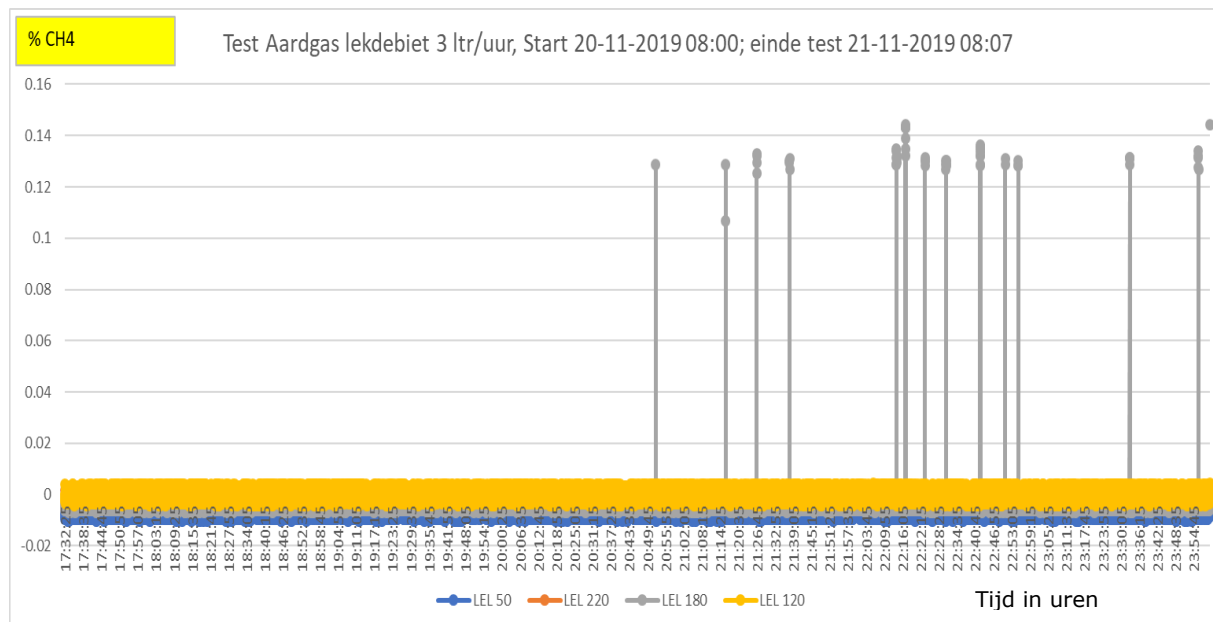
Test 1 ltr/uur



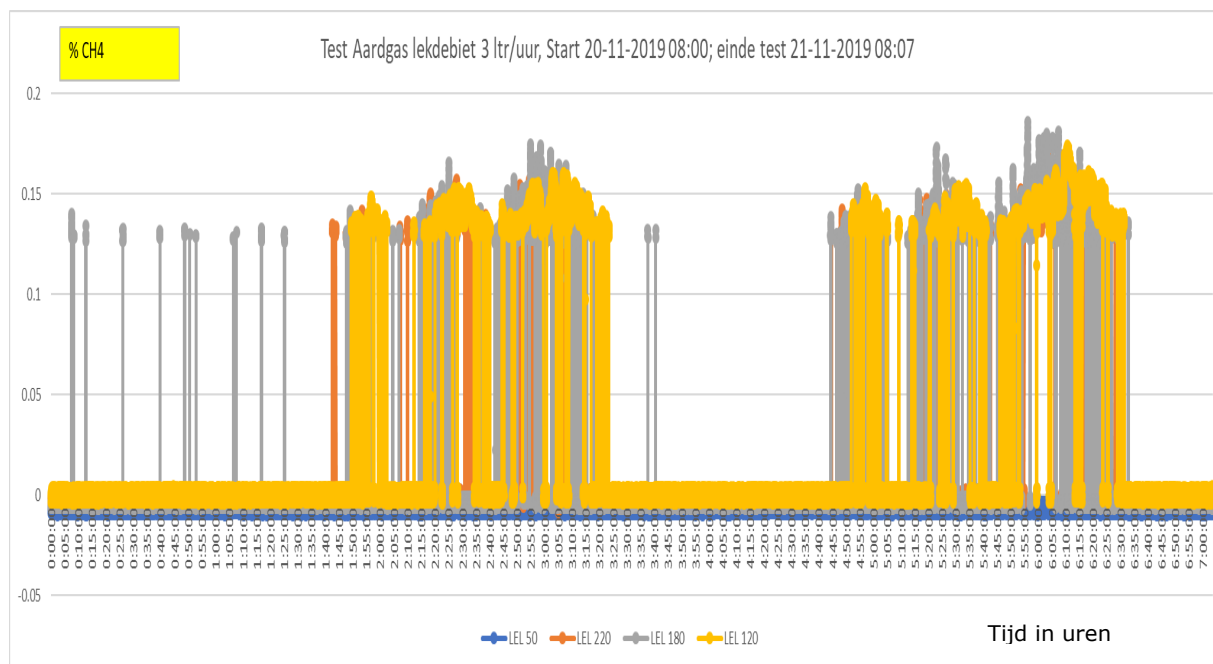
Test 3 ltr/uur, periode 1



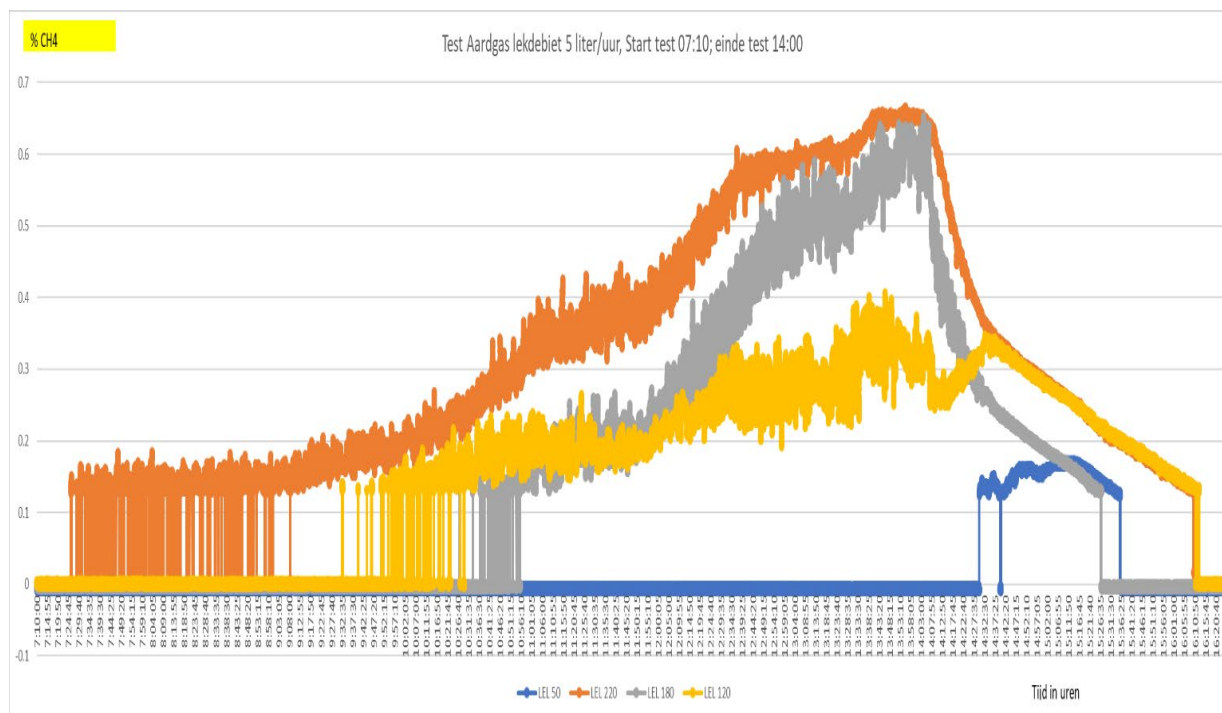
Test 3 ltr/uur, periode 2



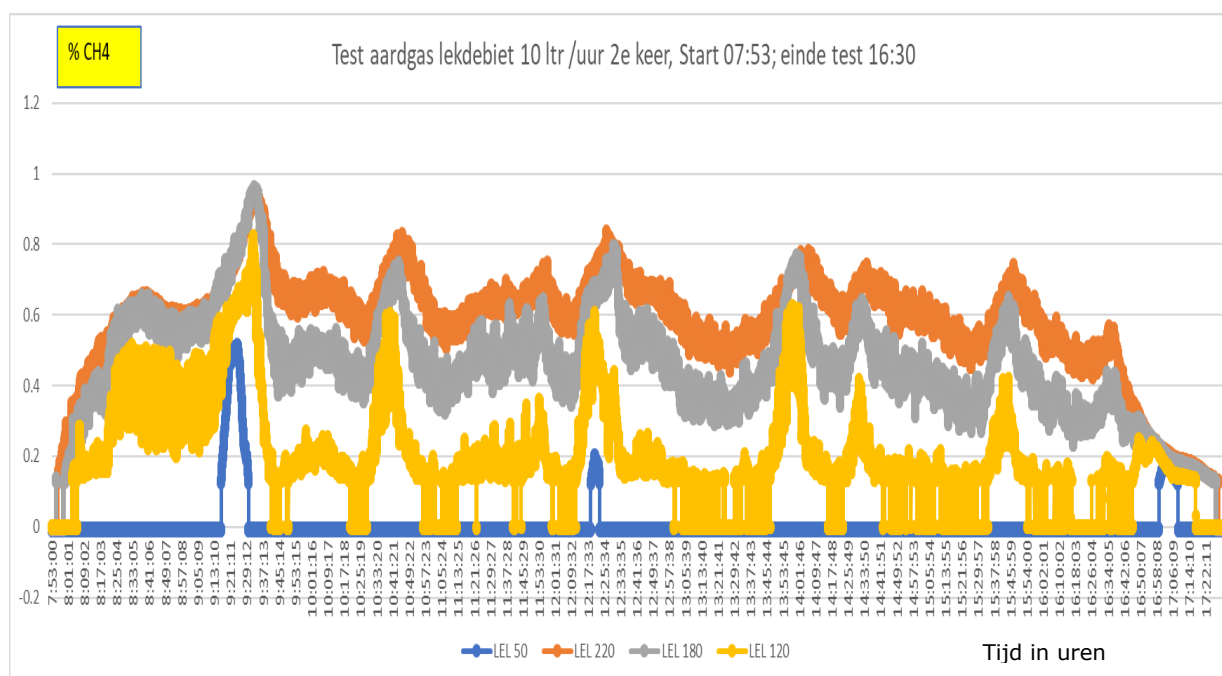
Test 3 ltr/uur, periode 3



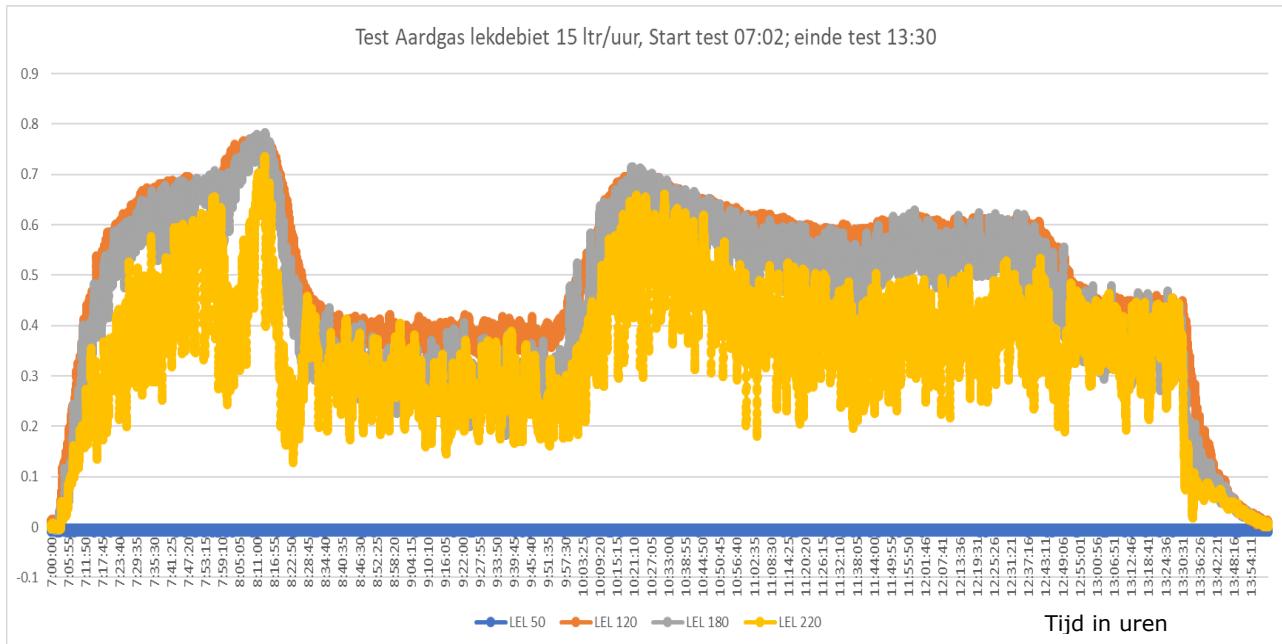
Test 5 ltr/uur



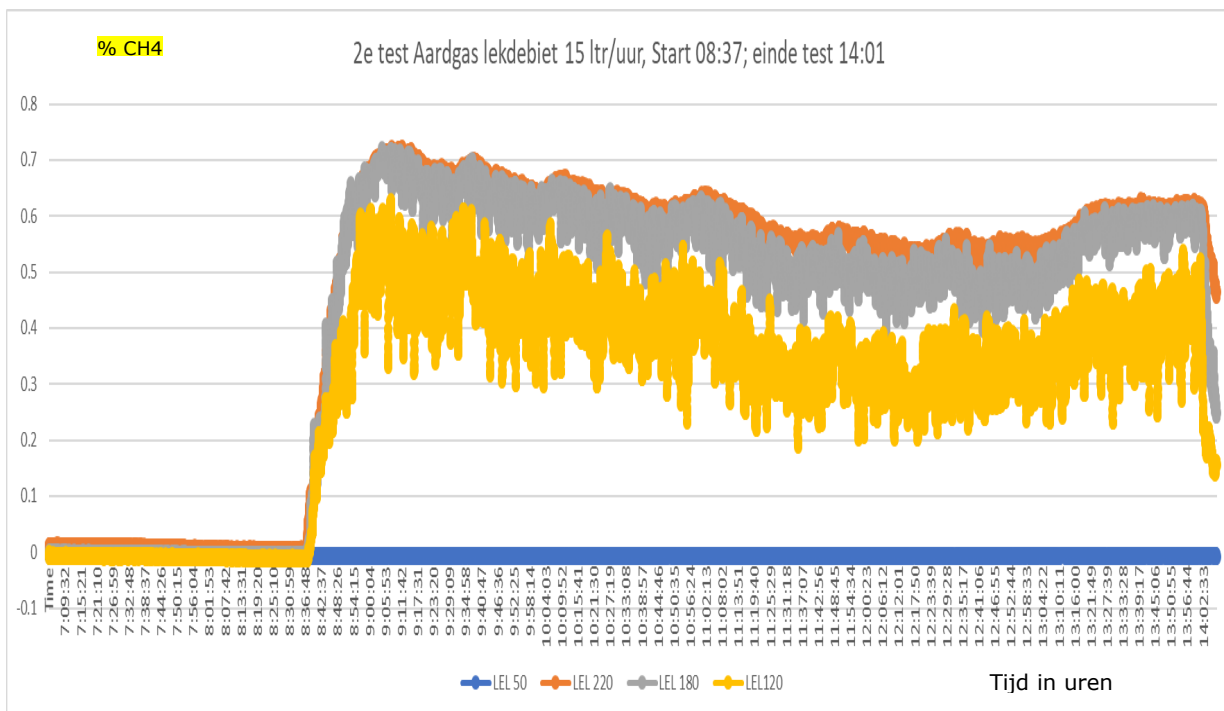
Test 10 ltr/uur. Test 1



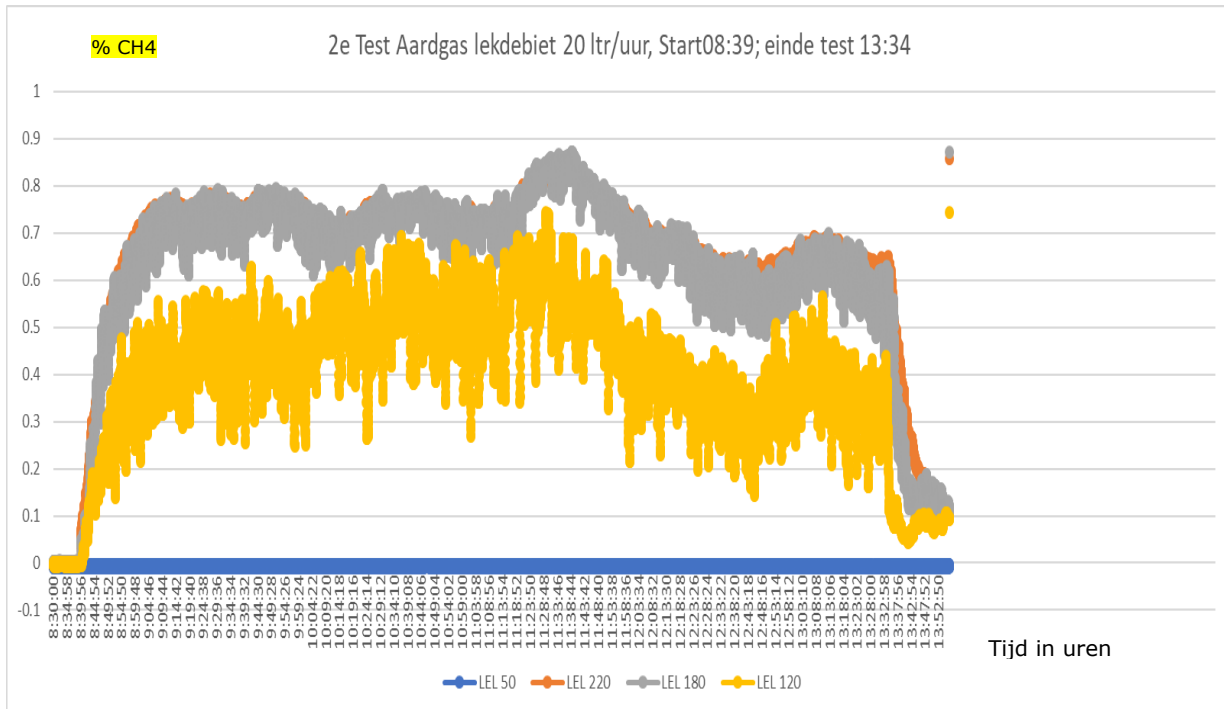
Test 15 ltr/uur



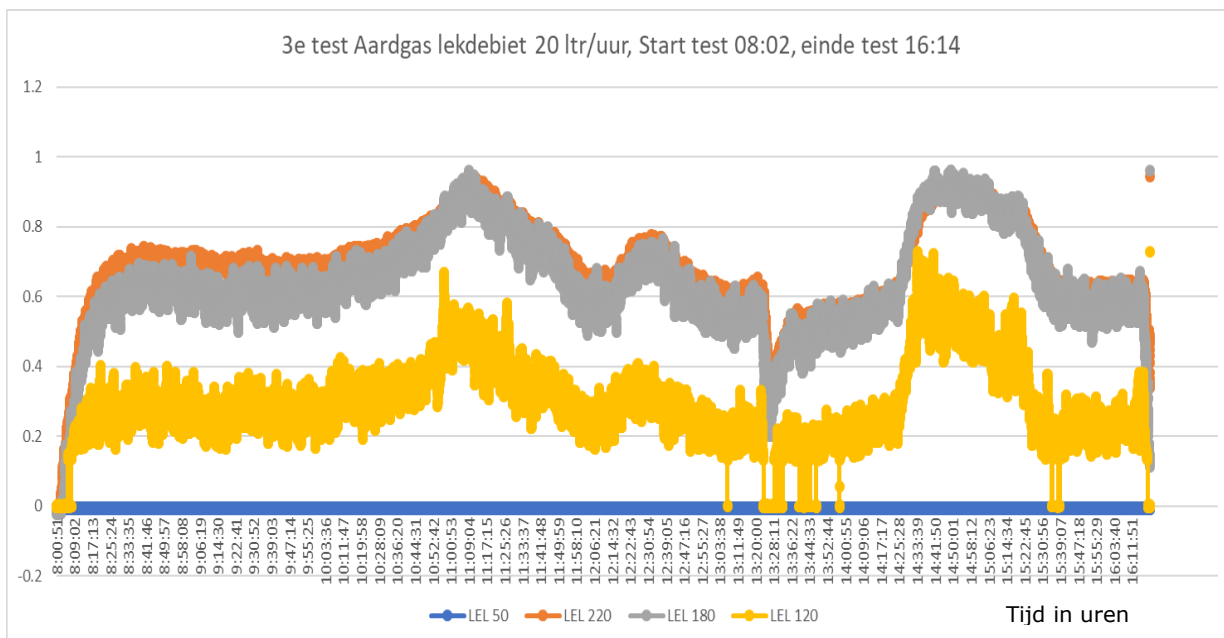
Test 15 ltr/uur. Test 1



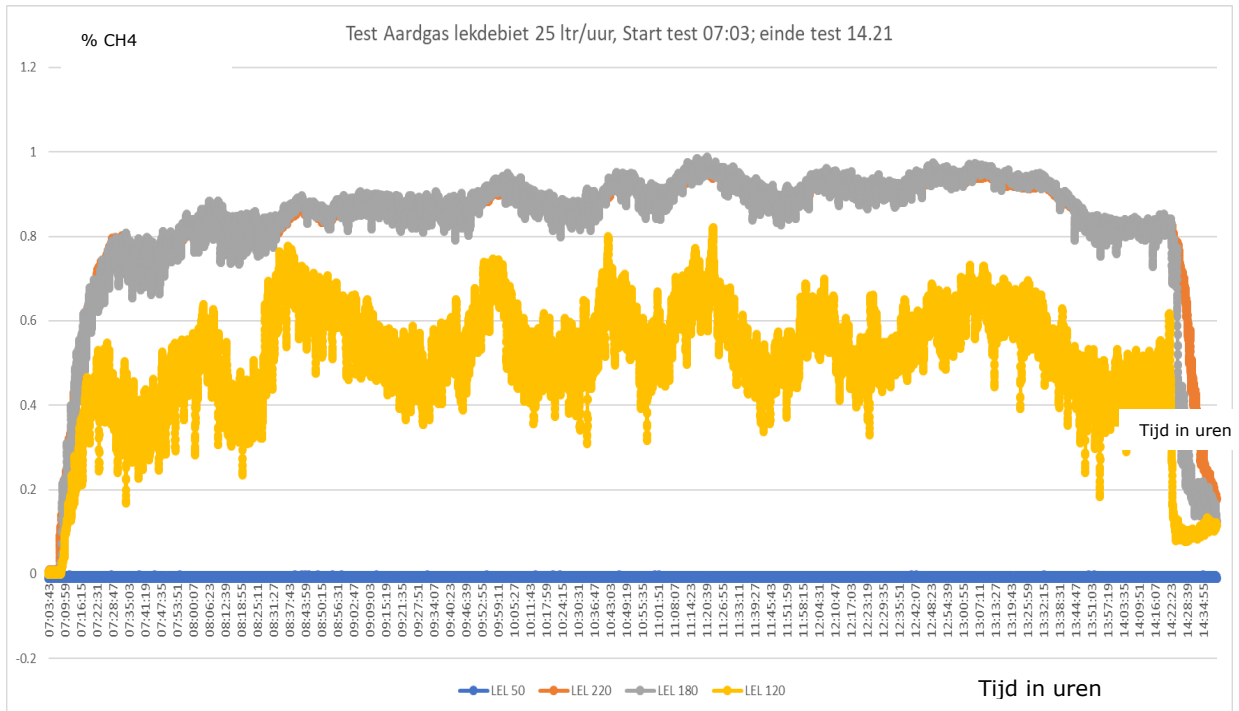
Test 20 ltr/uur



Test 20 ltr/uur. Test1

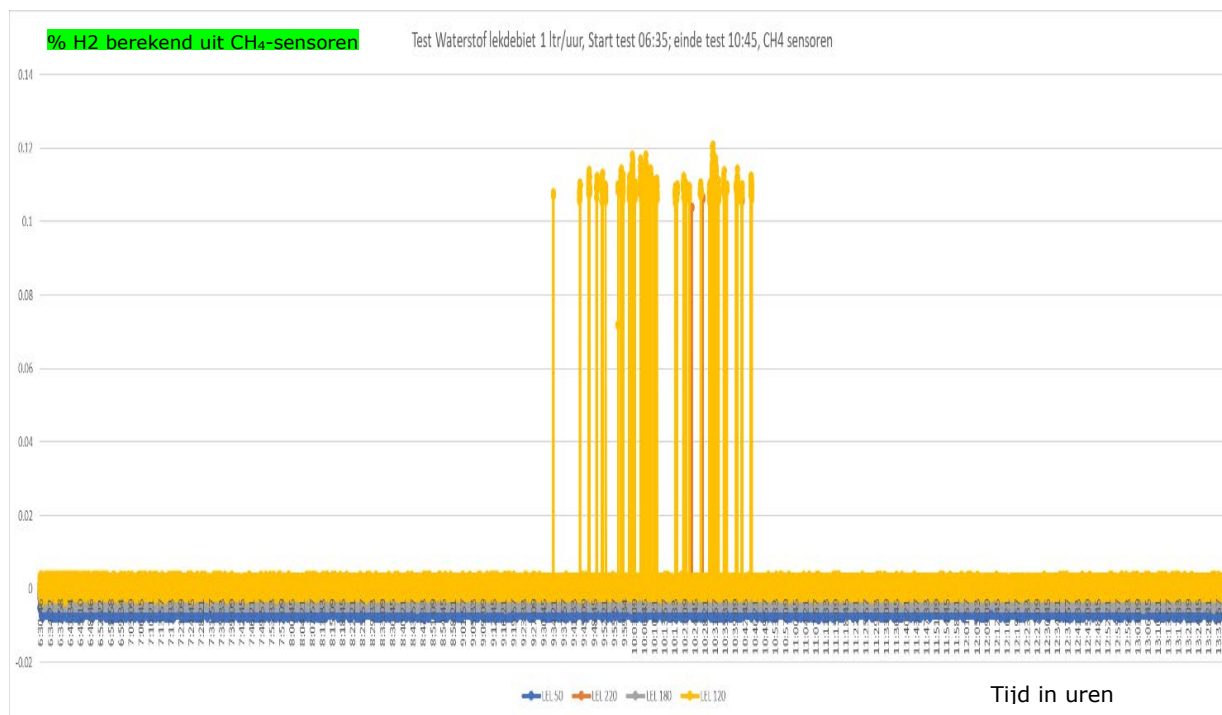


Test 25 ltr/uur

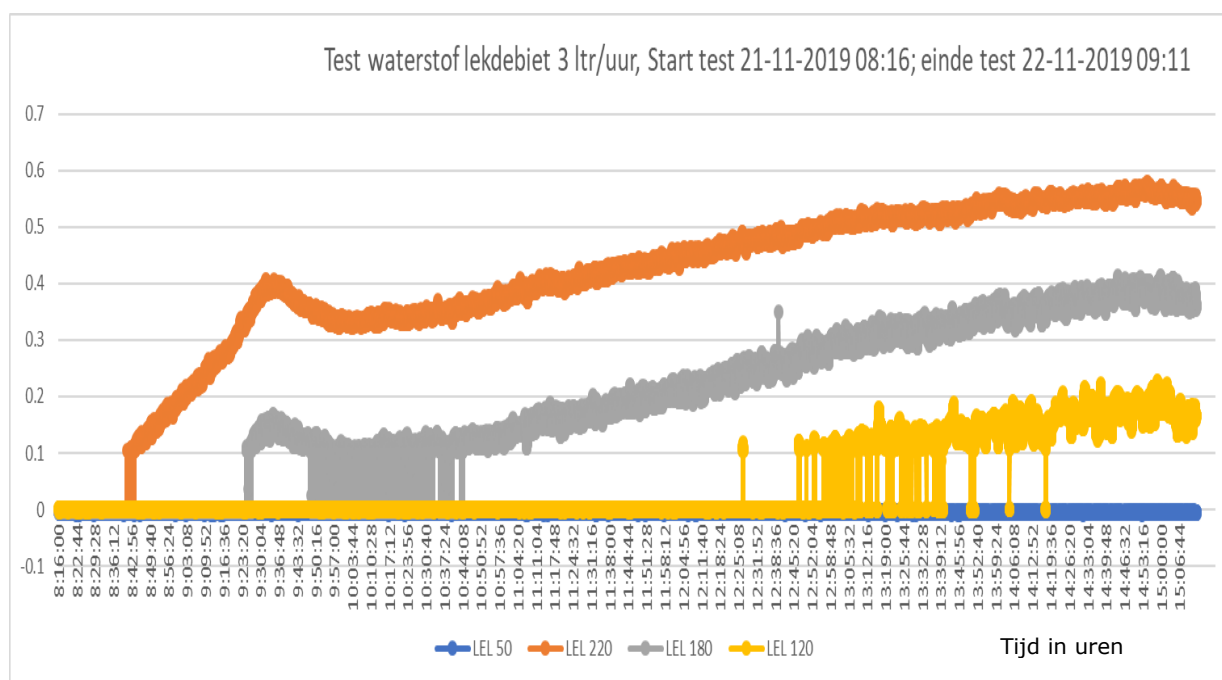


BIJLAGE D: GRAFIEKEN 100% WATERSTOF, LEKDEBIETEN 1, 3 (24-UURS), 5, 10, 15, 20 EN 25 LITER PER UUR, OPEN VENTILATIEROOSTERS

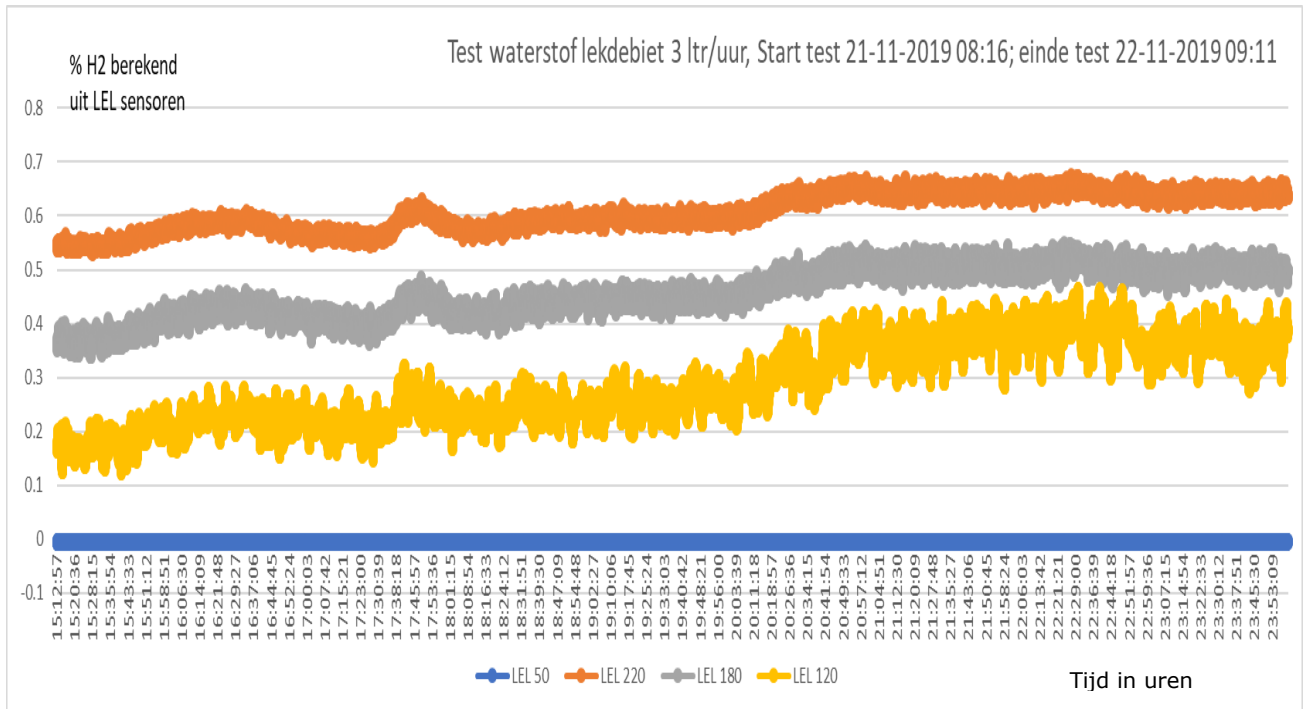
Test 1 ltr/uur



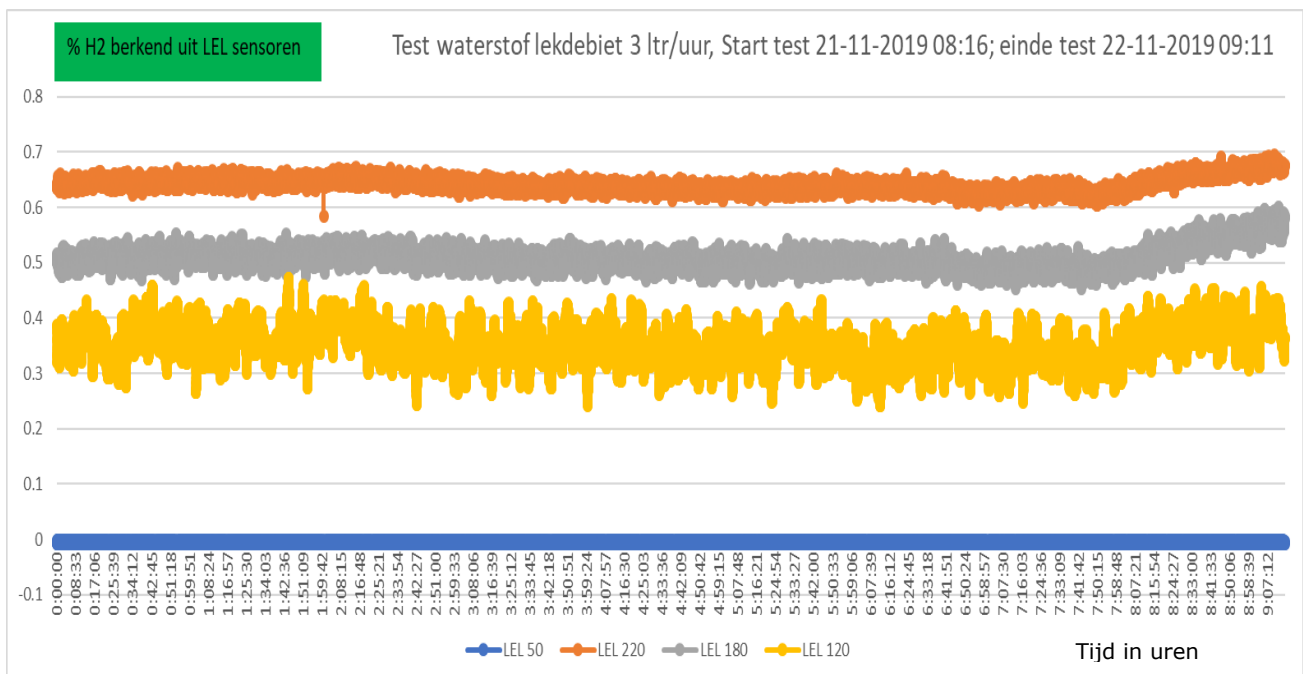
Test 3 ltr/uur, periode 1



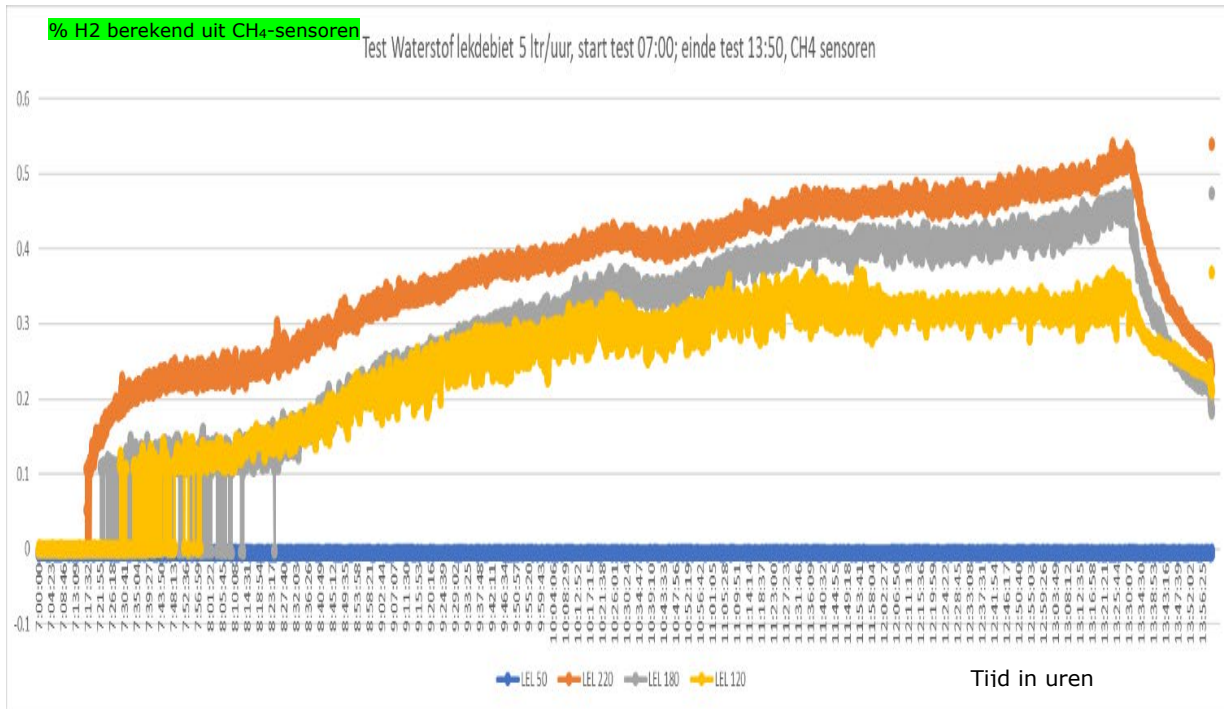
Test 3 ltr/uur, periode 2



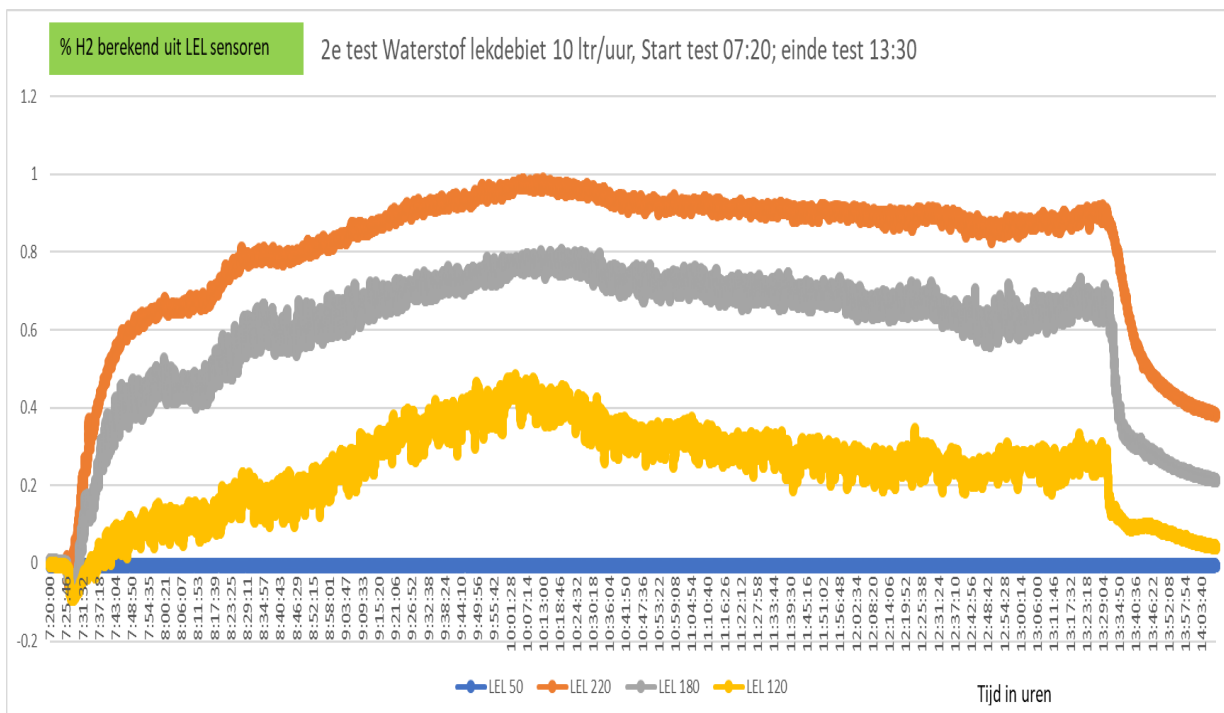
Test 3 ltr/uur, periode 3



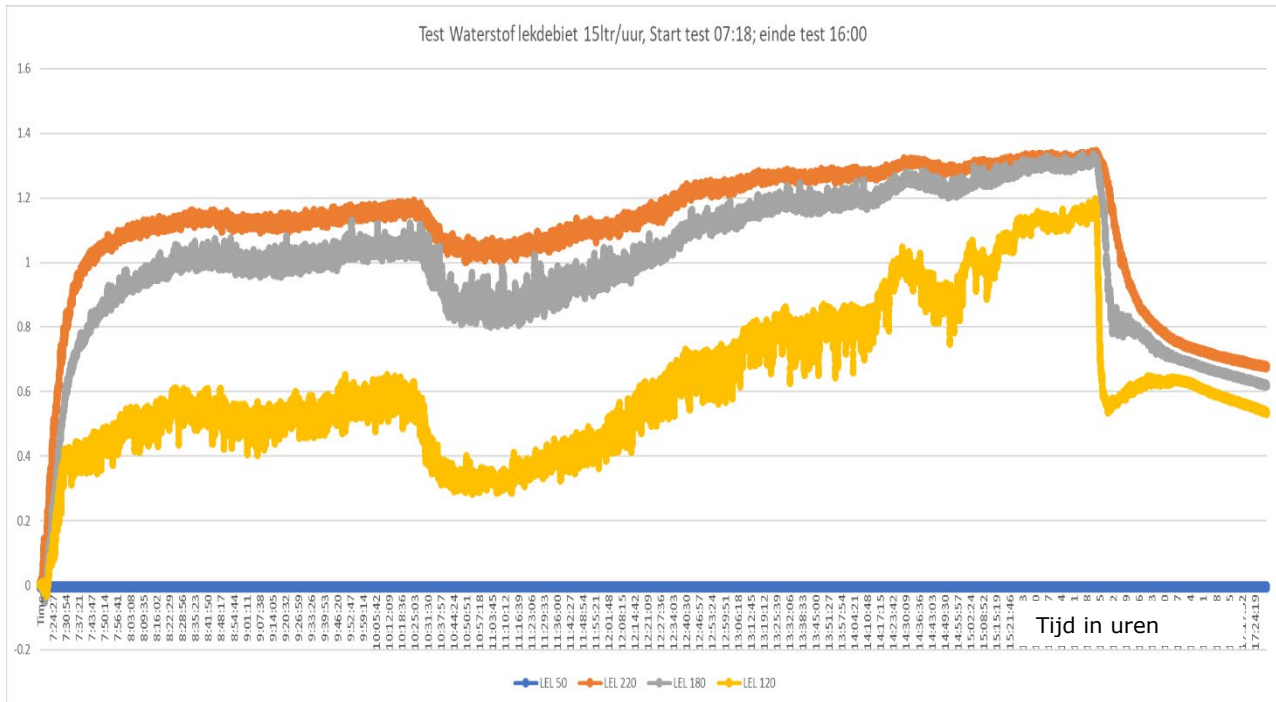
Test 5 ltr/uur



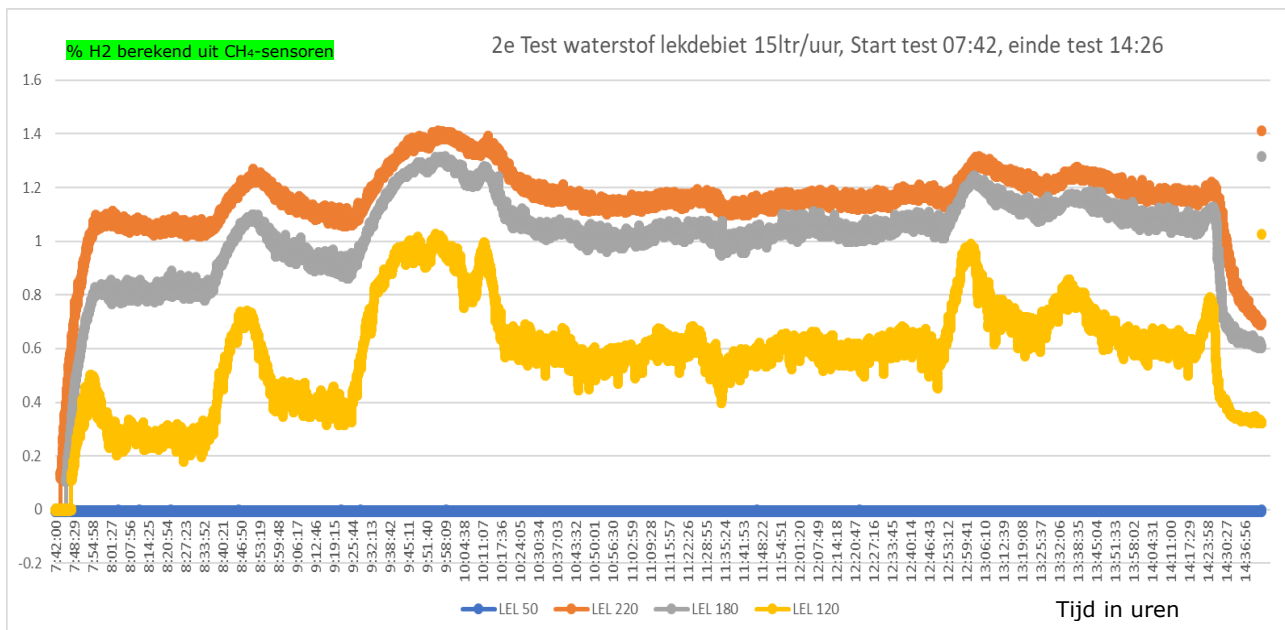
Test 10 ltr/uur



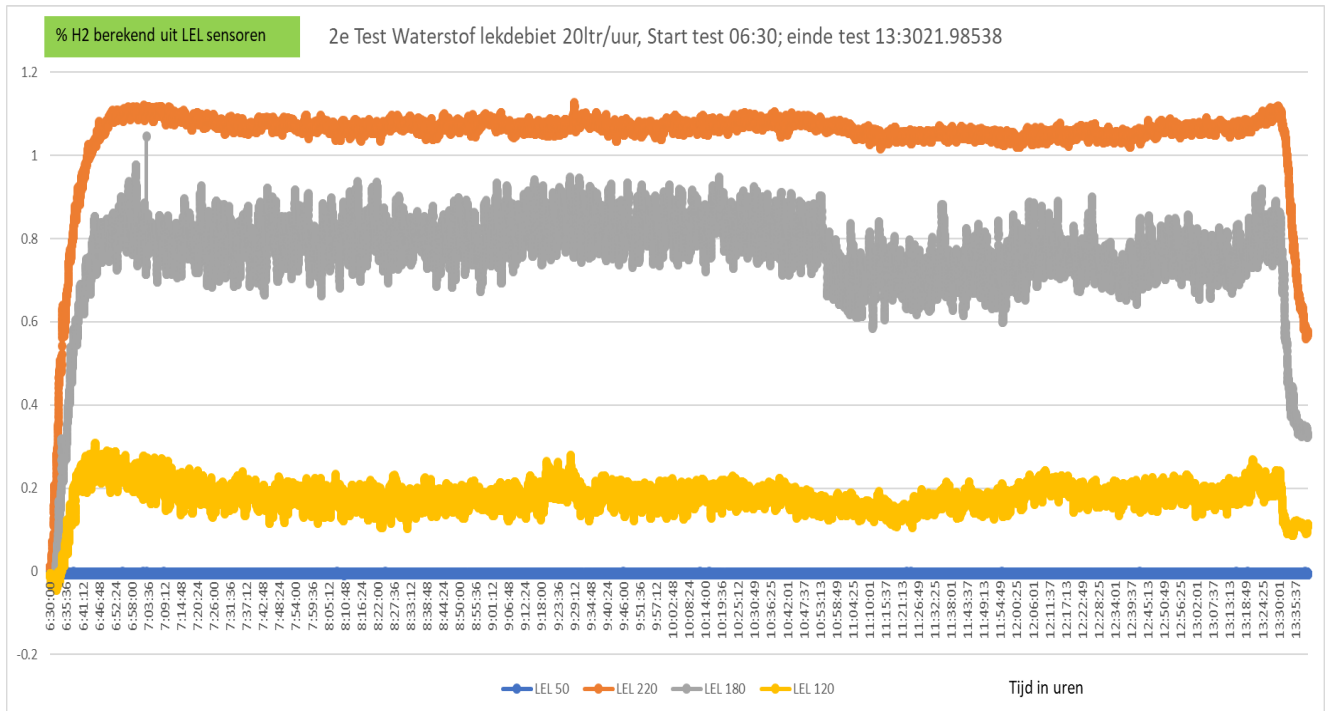
Test 15 ltr/uur



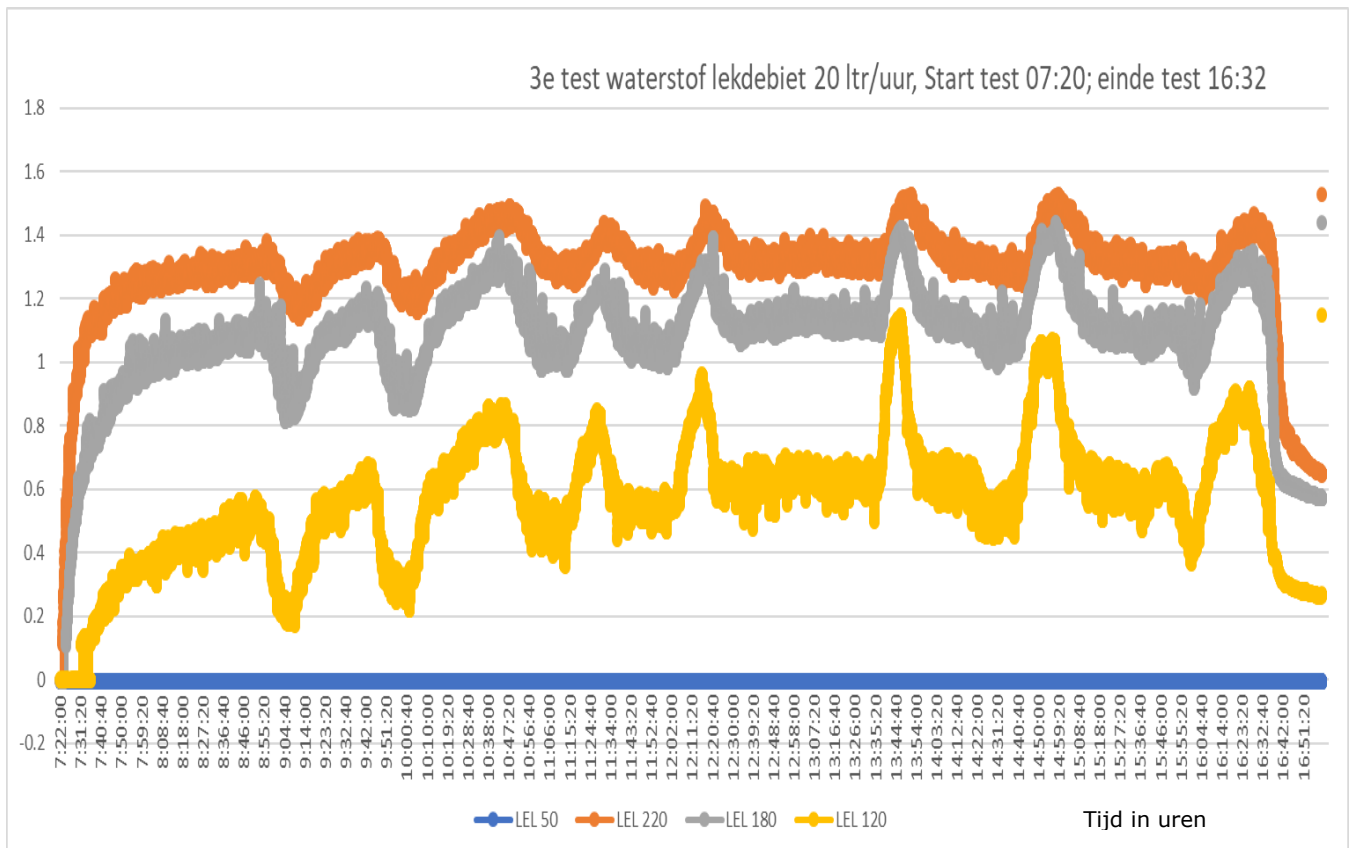
Test 15 ltr/uur 2^e meting



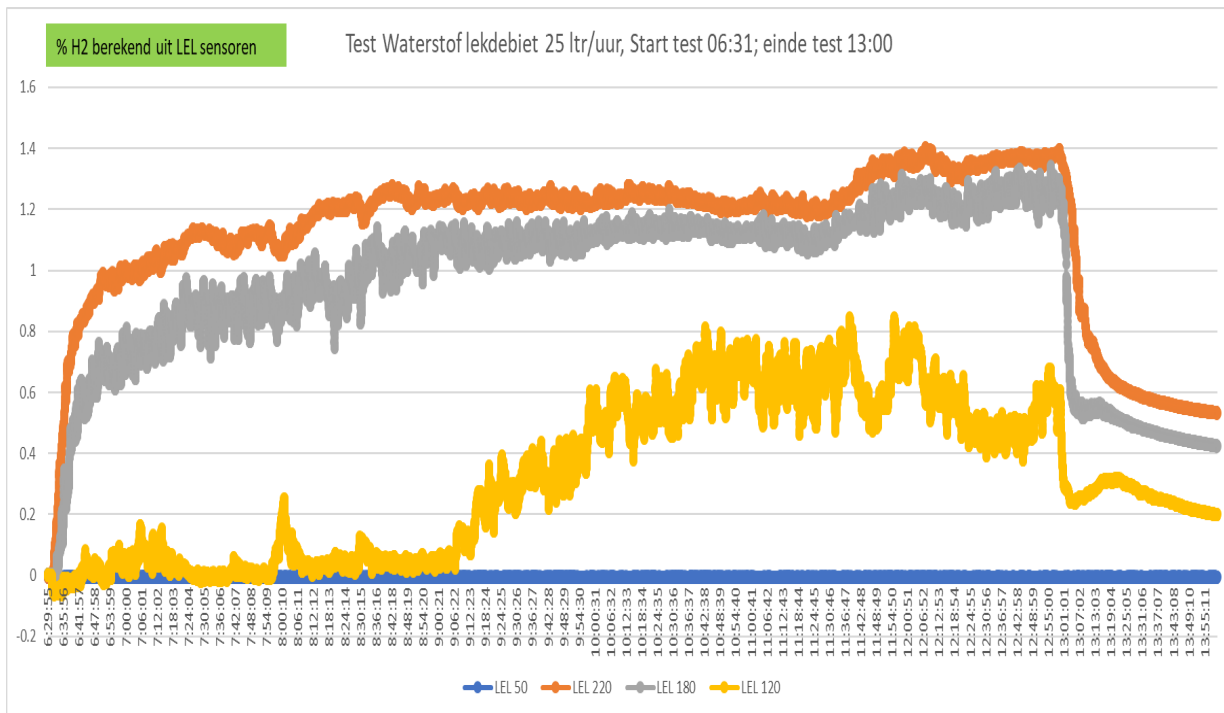
Test 20 ltr/uur



Test 20 ltr/uur meting 3

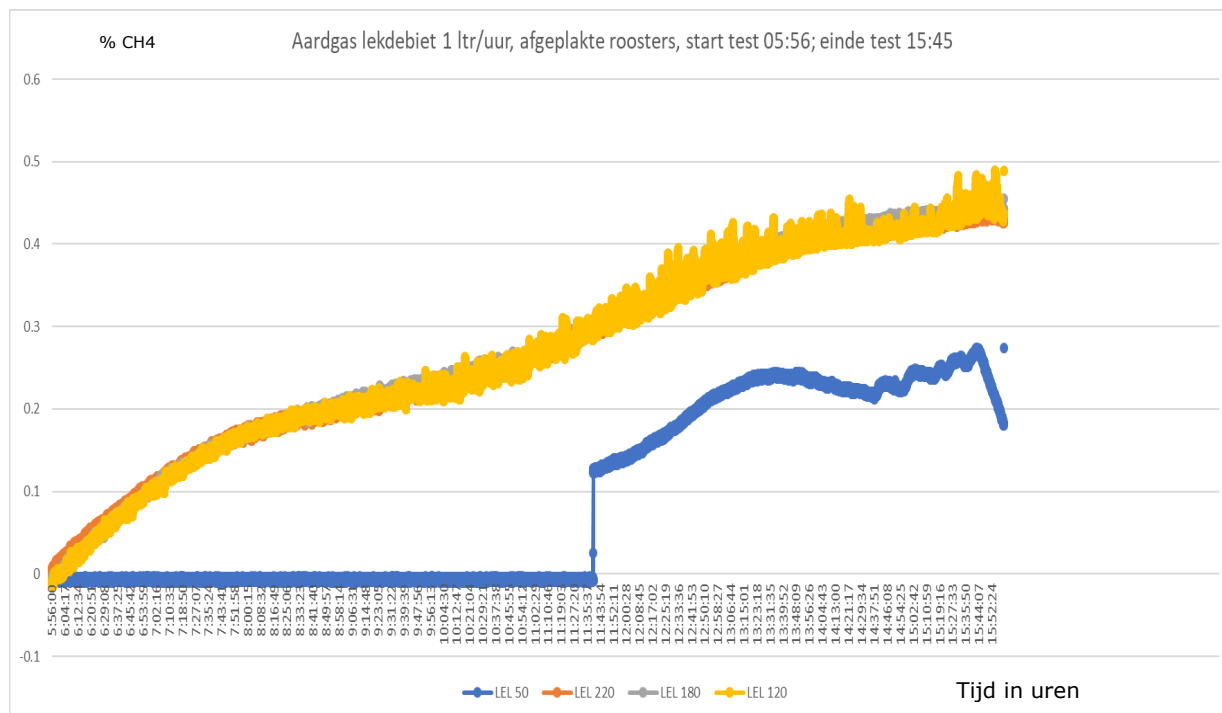


Test 25 ltr/uur

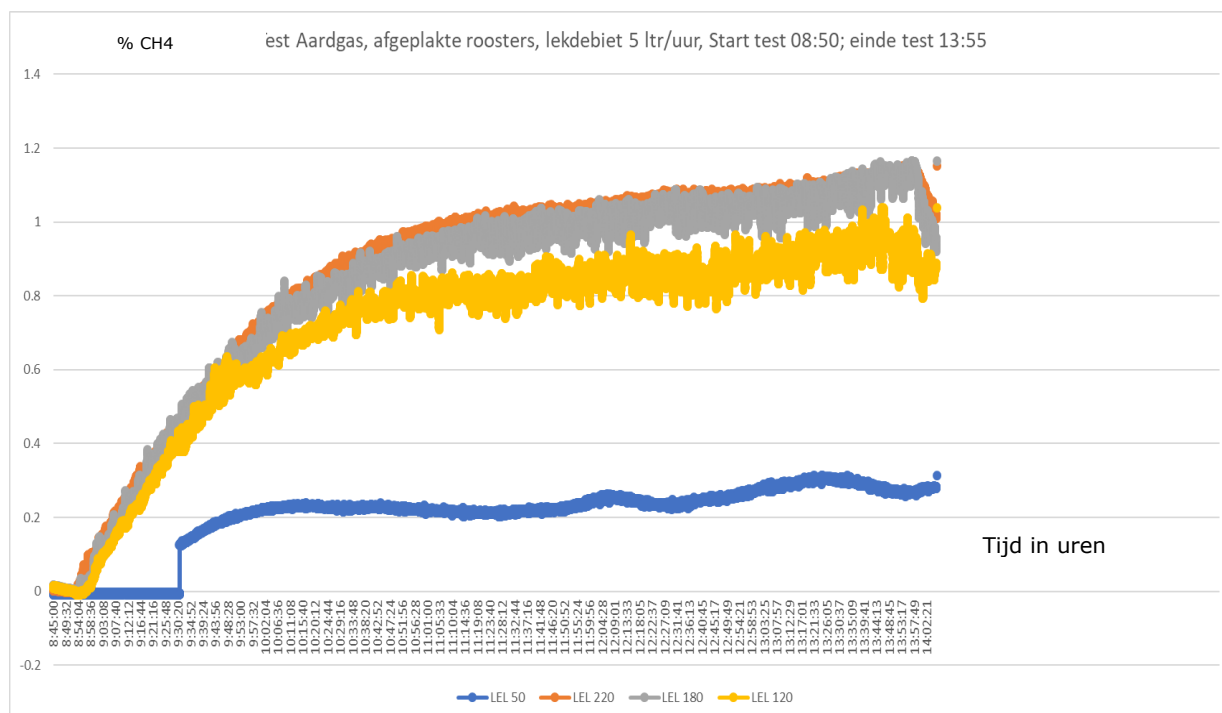


BIJLAGE E: GRAFIEKEN 100% AARDGAS, LEKDEBIETEN 1, 5 EN 10 LITER PER UUR, VENTILATIEROOSTERS AFGEPLAKT

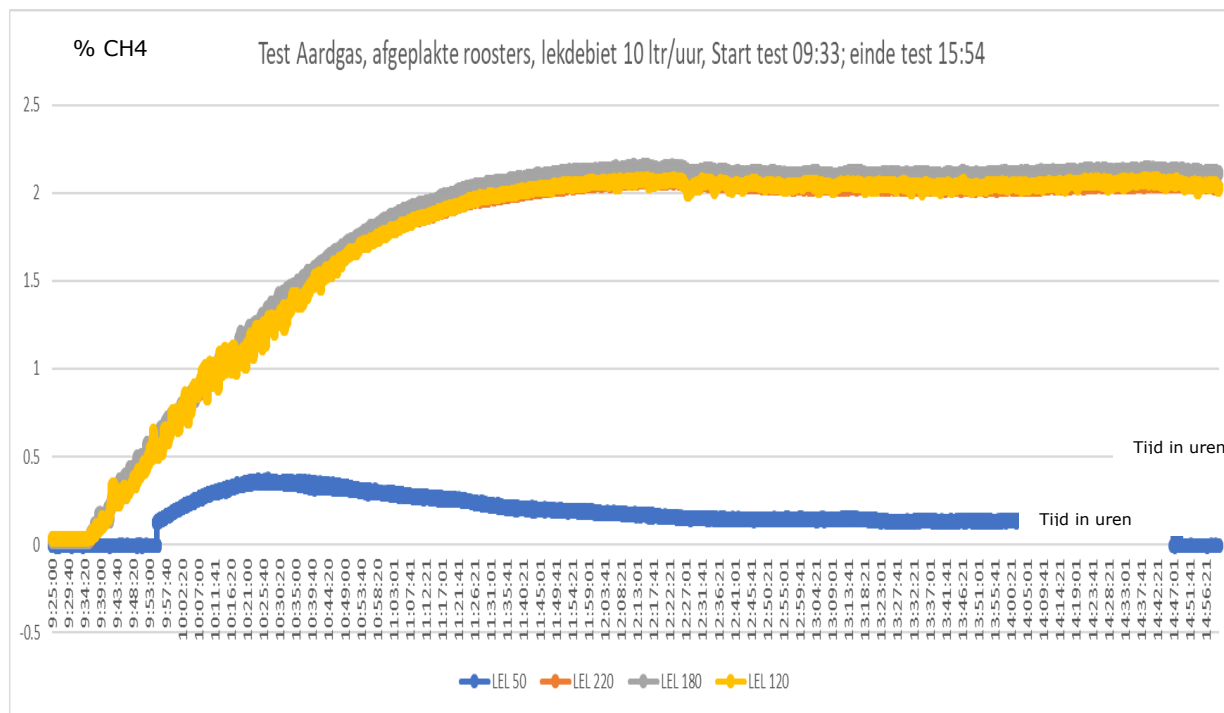
1 ltr/uur



5 ltr/uur

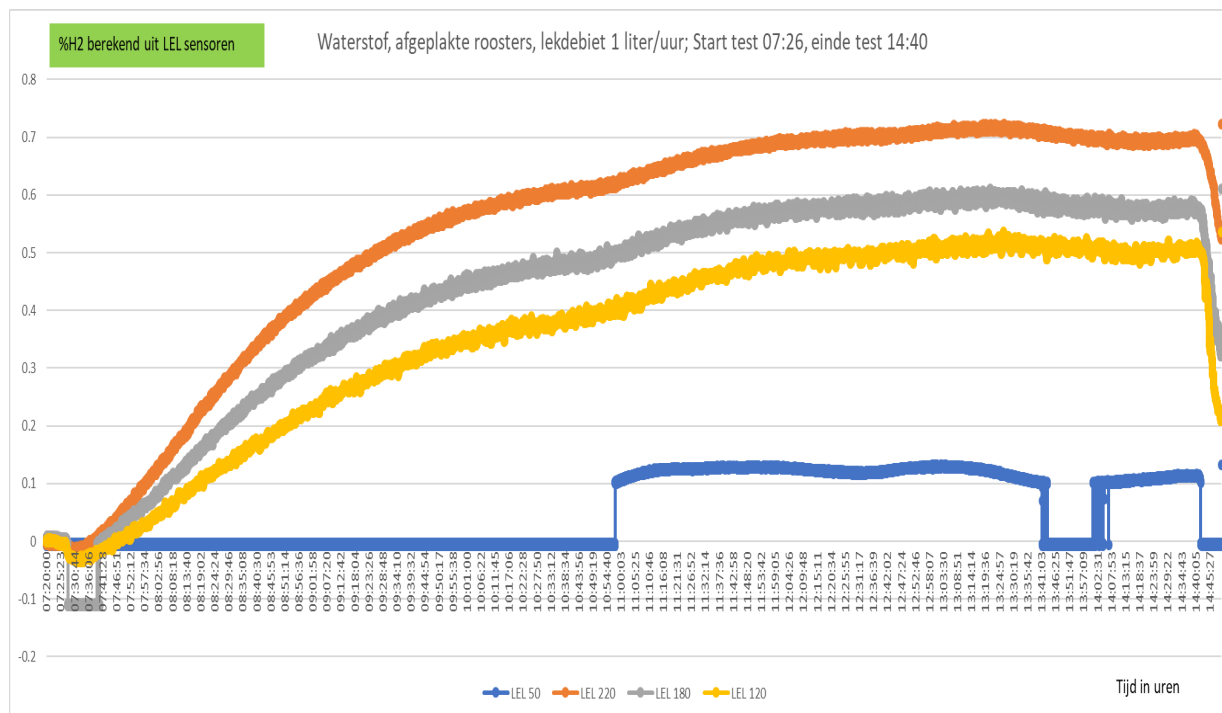


10 ltr/uur

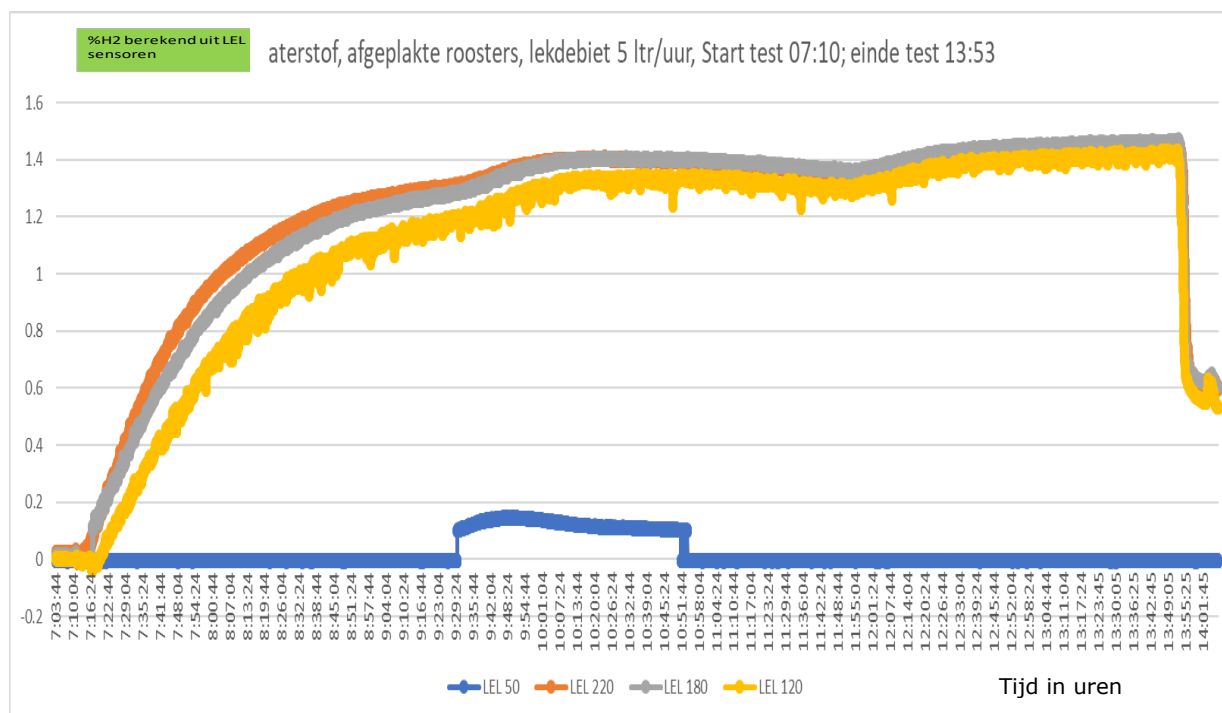


BIJLAGE F: GRAFIEKEN 100% WATERSTOF, LEKDEBIETEN 1, 5 EN 10 LOTER PER UUR, VENTILATIEROOSTERS AFGEPLAKT

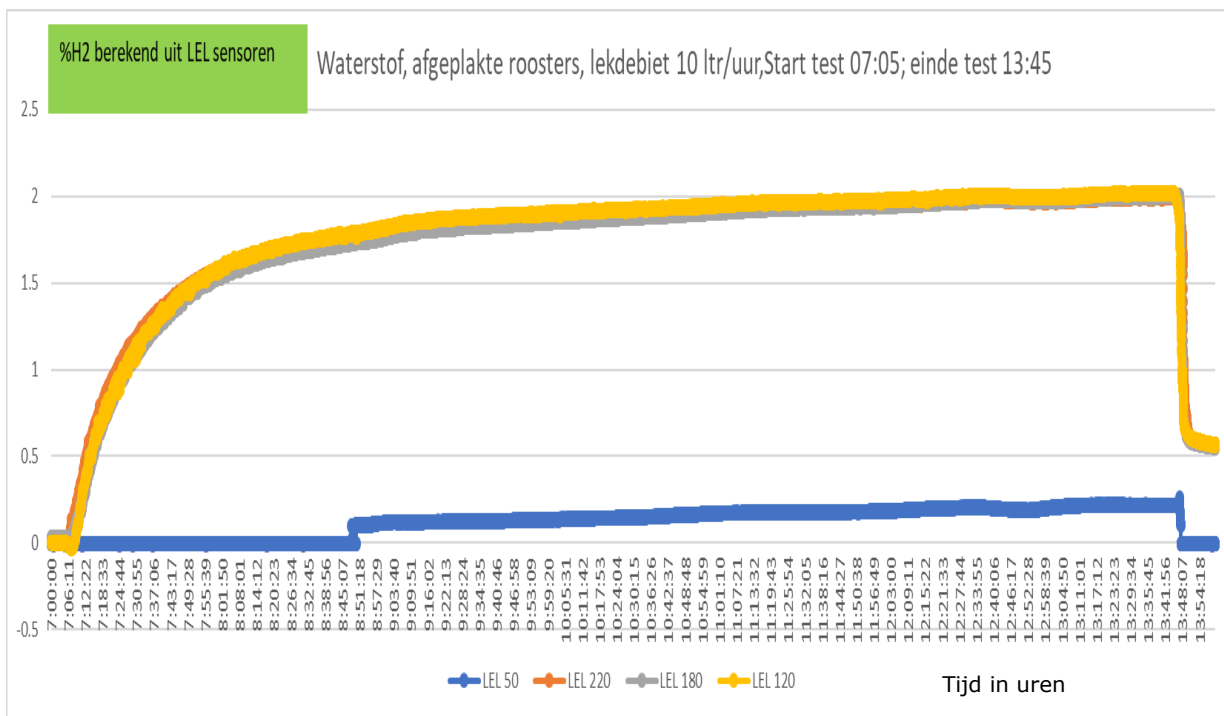
1 ltr/uur



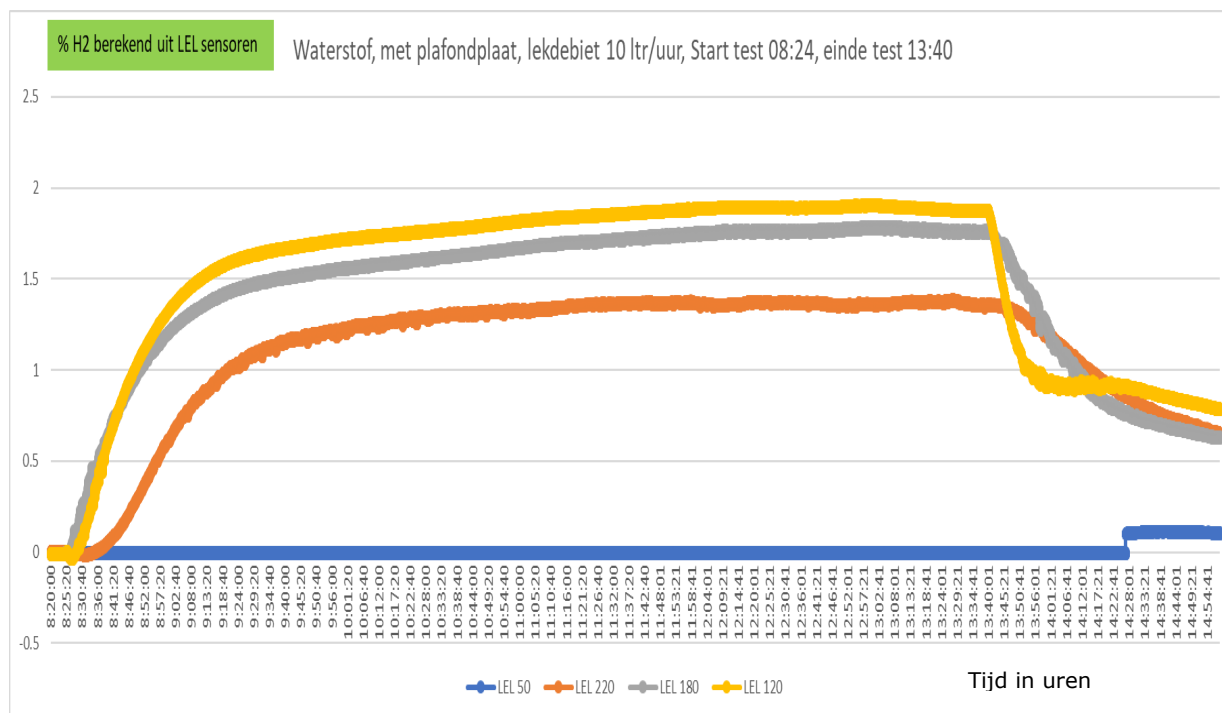
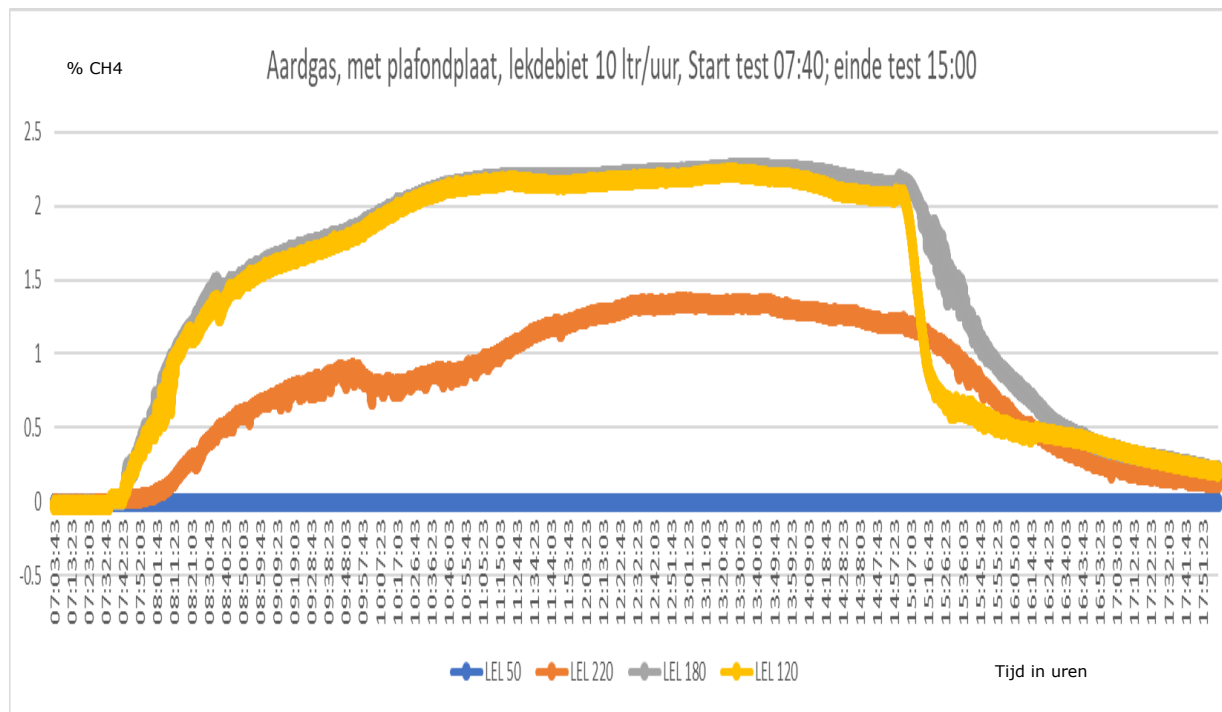
5 ltr/uur



10 ltr/uur



BIJLAGE G: GRAFIEKEN 100% AARDGAS EN 100% WATERSTOF, LEKDEBIET 10 LITER PER UUR, MET PLAFONDPLAAT





REFERENTIES

- ✓ Manual NL_ST450EC_v1.08_Buveco_1215511
- ✓ Manual NL_ST650EX_ST350EX_v3.05_Buveco_1215508
- ✓ Manual how to use EasyConverter programma
- ✓ Manual BuTouch (Gas detectie controle unit)
- ✓ Gassen lijst Buveco
- ✓ Bronkhorst instruction manual Flow-bus interface for digital Mass Flow instruments
- ✓ Bronkhorst manual Mass Flow meters
- ✓ Nederlandse norm NEN 2768+A1 Meetruimten en bijbehorende bouwkundige voorzieningen in woningen
- ✓ NEN7244-7 Beproevingen: 4.4.3.2 Maximale lekgrootte bij drukdalingsbeproeving



About DNV GL

Driven by our purpose of safeguarding life, property and the environment, DNV GL enables organizations to advance the safety and sustainability of their business. We provide classification and technical assurance along with software and independent expert advisory services to the maritime, oil & gas and energy industries. We also provide certification services to customers across a wide range of industries. Operating in more than 100 countries, our professionals are dedicated to helping our customers make the world safer, smarter and greener.